



---

**Antecedentes para la elaboración de una Norma Primaria de  
Calidad del Aire para Arsénico y revisión de la Norma de  
Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de  
Arsénico**

**ID Licitación: 608897-23-LP21**

**Estudio solicitado por Subsecretaría del Medio Ambiente**

**INFORME FINAL – Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico**

**Santiago, 17 de junio de 2022**

### Título del Proyecto

Antecedentes para la elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico y revisión de la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico

### Autores:

Jefe de proyecto: Luis Cifuentes

Asesores expertos: Fabio Carrera (PUCV), Daniel Rebolledo (CITUC)

Equipo operativo: José Miguel Valdés, Viviana Cerda Gho, Valentina Morandé, Alejandro Bañados, Simón Burgos, Anne-Lise Bohaud Ausset, María Teresa Alarcón.

Dictuc S.A.

Vicuña Mackenna N° 4860, Macul – Santiago

### Datos Mandante

Razón Social: Subsecretaría del Medio Ambiente

RUT: 61.979.930-5

Dirección: San Martín 73, Santiago

### Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo general proporcionar antecedentes para la elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire de Arsénico y también para la revisión de la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico, considerando un análisis técnico y económico, así como efectos en la salud y beneficios económicos asociados a reducciones de arsénico y otros contaminantes.

### Cuerpo del informe

463 hojas (incluye portada)

### Fecha del informe

17/junio/2022

### Información Contractual

Correlativo Contrato: 6591

OC N°: 608897-132-SE21

### Contraparte técnica

Nombre: Emmanuel Mesías Rojas

Cargo: Profesional Depto. Planes y Normas, DCA

E-mail: emesias@mma.gob.cl

---

Sr. Luis Cifuentes

Director GreenLab

Dictuc S.A.

---

Sr. Felipe Bahamondes

Gerente General

Dictuc S.A.

## Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos .....	I
Lista de Tablas .....	IV
Lista de Figuras.....	XIV
Acrónimos y Abreviaturas.....	XXI
<b>0. Resumen Ejecutivo.....</b>	<b>1</b>
<b>1. Objetivos del estudio .....</b>	<b>13</b>
1.1 Objetivo general.....	13
1.2 Objetivos específicos .....	13
<b>2. Comportamiento histórico de las concentraciones de Arsénico.....</b>	<b>15</b>
2.1 Coordinación con contraparte técnica .....	15
2.2 Fuentes de información disponible .....	15
2.2.1 Consolidación de base de datos con información sistematizada .....	23
2.3 Concentraciones históricas de arsénico .....	24
2.3.1 Diagnóstico a nivel nacional .....	24
2.3.2 Análisis longitudinal de As en MP10 por estaciones.....	29
2.3.3 Análisis longitudinal de As en MP2,5 por estaciones.....	110
2.3.4 Comparación entre estaciones.....	122
2.4 Diagnóstico del estado del arte de monitoreo de As en aire .....	124
2.4.1 Estado del arte a nivel nacional .....	124
2.4.2 Estado del arte a nivel internacional .....	133
<b>3. Emisión de arsénico .....</b>	<b>138</b>
3.1 Compilación de información disponible de emisiones.....	138
3.1.1 Fundiciones de cobre: Metodología de balance de masa.....	138
3.1.2 Resumen de información disponible para fundiciones de cobre .....	145
3.1.3 Fundiciones de cobre: Brechas de información identificadas y propuesta de estimación.....	145
3.1.4 Información proveniente del DS138/2005.....	149
3.2 Inventario de emisiones.....	150

3.3	Análisis de inventario: Fundiciones .....	157
3.3.1	<i>Fundición Chuquicamata</i> .....	157
3.3.2	<i>Fundiciones Altonorte</i> .....	165
3.3.3	<i>Fundición Potrerillos</i> .....	174
3.3.4	<i>Fundición Hernán Videla Lira</i> .....	184
3.3.5	<i>Fundición Ventanas</i> .....	195
3.3.6	<i>Fundición Chagres</i> .....	202
3.3.7	<i>Fundición Caletones</i> .....	210
3.3.8	<i>Comparación entre Fundiciones</i> .....	218
3.4	Proyección de inventario .....	231
3.4.1	<i>Metodología de proyección</i> .....	231
3.4.2	<i>Resultados de la proyección</i> .....	236
<b>4.</b>	<b>Efectos en salud y coeficientes de riesgo .....</b>	<b>237</b>
4.1	Caracterización de efectos adversos en salud asociados a la exposición de arsénico en el aire	237
4.1.1	<i>Fuentes de información consultadas</i> .....	237
4.1.2	<i>Antecedentes generales</i> .....	238
4.1.3	<i>Efectos adversos en salud asociados a la exposición de arsénico en el aire</i> .....	239
4.2	Perfil toxicológico arsénico .....	246
4.2.1	<i>Arsénico inorgánico – Número CAS: 7440-38-2</i> .....	246
4.2.2	<i>Trióxido de arsénico - Número CAS: 1327-53-3</i> .....	259
4.2.3	<i>Tricloruro de arsénico - Número CAS: 7784-34-1</i> .....	268
4.2.4	<i>Pentóxido de arsénico - Número CAS: 1303-28-2</i> .....	275
4.2.5	<i>Arsina - Número CAS: 7784-42-1</i> .....	280
4.3	Coeficientes de riesgo identificados .....	289
<b>5.</b>	<b>Relación entre emisión y concentración de arsénico en el aire .....</b>	<b>291</b>
5.1	Metodología de estimación de relación entre emisión y concentración .....	291
5.1.1	<i>Modelización meteorológica</i> .....	292
5.1.2	<i>Validación de modelo meteorológico WRF con red de monitoreo nacional</i> .....	299
5.1.3	<i>Definición de las estaciones de monitoreo de calidad del aire</i> .....	301
5.1.4	<i>Determinación de puntos de interés de estudio</i> .....	302

5.1.5	<i>Determinación de la relación emisión-concentración</i>	302
5.1.6	<i>Determinación del aporte basal</i>	309
5.2	Estimación de relación emisión - concentración	313
5.2.1	<i>Análisis de incertidumbre meteorológico</i>	313
5.2.2	<i>Relación emisión-concentración</i>	317
<b>6.</b>	<b>Propuestas regulatorias para la elaboración de una norma primaria de calidad del aire para arsénico</b>	<b>356</b>
6.1	Escenario regulatorio internacional	356
6.2	Comparación de beneficios estimados en evaluaciones internacionales	367
6.3	Coefficientes de riesgo unitario para concentración de arsénico en el aire	372
6.4	Metodología para calcular los efectos en salud por la reducción en concentración marginal	375
6.5	Escenarios regulatorios propuestos y sus beneficios	377
6.5.1	<i>Escenarios regulatorios</i>	383
6.5.2	<i>Evaluación de beneficios</i>	386
<b>7.</b>	<b>Evaluación de costos de propuestas regulatorias</b>	<b>394</b>
7.1	Costos de tecnologías para la reducción de emisión	394
7.1.1	<i>Identificación y selección de tecnologías</i>	394
7.1.2	<i>Metodología para estimar costos unitarios</i>	395
7.2	Variables operacionales con influencia en las emisiones	400
7.2.1	<i>Características del concentrado</i>	400
7.2.2	<i>Características del proceso</i>	402
7.2.3	<i>Niveles de producción</i>	403
7.3	Costos de las alternativas regulatorias propuestas y beneficios	404
7.3.1	<i>Selección de medidas de mitigación</i>	405
7.3.2	<i>Costos totales de alternativas regulatorias</i>	409
7.3.3	<i>Estimación de co-beneficios</i>	411
7.3.4	<i>Comparación de costos y beneficios</i>	415
<b>8.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>420</b>
<b>9.</b>	<b>Referencias</b>	<b>432</b>
<b>10.</b>	<b>Anexos</b>	<b>439</b>
10.1	Anexo 1: Identificación de valores anómalos	439

10.2	Anexo 2: Metodología para estimación de rango de emisiones de HVL.....	439
10.3	Anexo 3: Rosas de viento estaciones.....	439
10.3.1	<i>Rosas de Viento Fundición Chuquicamata.....</i>	<i>439</i>
10.3.2	<i>Rosas de Viento Fundición Altonorte.....</i>	<i>439</i>
10.3.3	<i>Rosas de Viento Fundición Potrerillos.....</i>	<i>439</i>
10.3.4	<i>Rosas de Viento Fundición Hernán Videla Lira.....</i>	<i>439</i>
10.3.5	<i>Rosas de Viento Fundición Ventanas.....</i>	<i>439</i>
10.3.6	<i>Rosas de Viento Fundición Chagres.....</i>	<i>439</i>
10.3.7	<i>Rosas de Viento Fundición Caletones.....</i>	<i>439</i>
10.4	Anexo 4: Comparación de concentración basal de arsénico.....	439
10.5	Anexo 5: Corroboración de equivalencia entre factores de corrección.....	439
10.6	Anexo 6: Puntos de interés en modelación de calidad del aire.....	439
10.7	Anexo 7: Inventario de emisiones modelado.....	439
10.8	Anexo 8: Análisis datos modelados versus observados.....	439
10.9	Anexo 9: Evaluación de metodología de modelación de emisiones.....	439
10.10	Anexo 10: ACB para escenario regulatorio.....	439
10.11	Anexo 11: Análisis comparativo de concentraciones de arsénico en rocas.....	439

## Lista de Tablas

Tabla 0-1	Inventario de estimación de emisiones [ton/año] de Arsénico 2020.....	2
Tabla 0-2	Intensidad de emisiones [g As/t Cu fino], periodo 2017 a 2020.....	3
Tabla 0-3	Efectos agudos no carcinogénicos según forma química de arsénico.....	4
Tabla 0-4	Efectos crónicos no carcinogénicos según forma química de arsénico.....	6
Tabla 0-5	Efectos carcinogénicos según forma química de arsénico.....	7
Tabla 0-6	Coeficientes de riesgo asociados a efectos cancerígenos.....	7
Tabla 0-7	Factores emisión concentración para localidades en dominio.....	9
Tabla 0-8	Indicadores descriptivos de beneficios costos por escenarios, año de referencia.....	12
Tabla 2-1	Descripción de fuentes y sus estaciones cercanas con medición de arsénico.....	15
Tabla 2-2	Cantidad de datos disponibles de As en MP10 sin errores de concentración de As, por estación de cada zona.....	18
Tabla 2-3	Resumen de los valores disponibles de As en MP10 documentados sin valor numérico, sistematizados como errores en la base de datos compilada.....	21
Tabla 2-4	Campos de la base de datos de sistematización de concentraciones medidas.....	23

Tabla 2-5 Resumen concentraciones de arsénico en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] por estación en el año 2020 .....	27
Tabla 2-6 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías termoeléctrica Tocopilla, estación Escuela E-10 .....	31
Tabla 2-7 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías termoeléctrica Tocopilla, estación Super Site .....	31
Tabla 2-8 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías Termoeléctrica Tocopilla, estación Escuela E-10 .....	32
Tabla 2-9 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías Termoeléctrica Tocopilla, estación Super Site .....	32
Tabla 2-10 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Aukahuasi.....	38
Tabla 2-11 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación C.P.V.K .....	38
Tabla 2-12 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación CD 23 de Marzo.....	39
Tabla 2-13 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Centro.....	40
Tabla 2-14 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre.....	40
Tabla 2-15 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Servicio Médico Legal.....	40
Tabla 2-16 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Chiu-Chiu .....	41
Tabla 2-17 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Nueva Chiu-Chiu.....	42
Tabla 2-18 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Aukahuasi .....	44
Tabla 2-19 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación C.P.V.K .....	44
Tabla 2-20 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación CD 23 de Marzo .....	44
Tabla 2-21 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Centro .....	45
Tabla 2-22 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre .....	45
Tabla 2-23 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Servicio Médico Legal .....	45
Tabla 2-24 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Chiu-Chiu .....	46
Tabla 2-25 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Nueva Chiu-Chiu.....	46

Tabla 2-26 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías minera Spence, estación Sierra Gorda.....	49
Tabla 2-27 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías minera Spence, estación Spence .....	50
Tabla 2-28 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías Minera Spence, estación Sierra Gorda ....	51
Tabla 2-29 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías Minera Spence, estación Spence .....	51
Tabla 2-30 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Ferrocarril .....	53
Tabla 2-31 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación J.J. Latorre.....	54
Tabla 2-32 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Subestación Eléctrica.....	54
Tabla 2-33 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Ferrocarril.....	55
Tabla 2-34 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación J.J. Latorre .....	56
Tabla 2-35 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Subestación Eléctrica .....	56
Tabla 2-36 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Altonorte, estación Coviefi .....	61
Tabla 2-37 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Altonorte .....	61
Tabla 2-38 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Inacal .....	62
Tabla 2-39 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Altonorte, estación Sur .....	62
Tabla 2-40 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Altonorte, estación Coviefi .....	63
Tabla 2-41 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Altonorte.....	64
Tabla 2-42 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Inacal .....	64
Tabla 2-43 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Altonorte, estación Sur .....	64
Tabla 2-44 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Potrerillos, estación CAP.....	69
Tabla 2-45 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Potrerillos, estación Cine Inca.....	69
Tabla 2-46 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Potrerillos, estación Doña Inés .....	70
Tabla 2-47 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Potrerillos, estación Intelec .....	70
Tabla 2-48 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Potrerillos, estación CAP.....	73
Tabla 2-49 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Potrerillos, estación Cine Inca .	73

Tabla 2-50 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Potrerillos, estación Doña Inés	73
Tabla 2-51 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Potrerillos, estación Intelec .....	73
Tabla 2-52 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Copiapó.....	77
Tabla 2-53 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Paipote.....	77
Tabla 2-54 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación San Fernando.....	78
Tabla 2-55 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Tierra Amarilla .....	78
Tabla 2-56 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Copiapó.....	80
Tabla 2-57 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Paipote .....	80
Tabla 2-58 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación San Fernando.....	80
Tabla 2-59 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Tierra Amarilla.....	81
Tabla 2-60 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Ventanas, estación La Greda .....	85
Tabla 2-61 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Ventanas, estación Los Maitenes .....	85
Tabla 2-62 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Ventanas, estación Puchuncaví .....	86
Tabla 2-63 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero .....	86
Tabla 2-64 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero Centro .....	87
Tabla 2-65 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Ventanas, estación Sur.....	87
Tabla 2-66 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Ventanas, estación Valle Alegre .....	88
Tabla 2-67 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Ventanas, estación Ventanas.....	88
Tabla 2-68 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación La Greda ...	90
Tabla 2-69 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Los Maitenes .....	90
Tabla 2-70 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Puchuncaví	90
Tabla 2-71 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero ...	90
Tabla 2-72 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero Centro .....	91
Tabla 2-73 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Sur .....	91

Tabla 2-74 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Valle Alegre .....	91
Tabla 2-75 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Ventanas ..	92
Tabla 2-76 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Colmo .....	95
Tabla 2-77 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Concón .....	95
Tabla 2-78 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Junta de Vecinos .....	95
Tabla 2-79 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Las Gaviotas .....	96
Tabla 2-80 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Colmo .....	97
Tabla 2-81 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Concón .....	97
Tabla 2-82 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Junta de Vecinos .....	97
Tabla 2-83 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Las Gaviotas .....	98
Tabla 2-84 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Chagres, estación Catemu .....	102
Tabla 2-85 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Chagres, estación Lo Campo .....	102
Tabla 2-86 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chagres, estación Catemu .....	103
Tabla 2-87 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chagres, estación Lo Campo ..	103
Tabla 2-88 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Club .....	106
Tabla 2-89 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Población .....	107
Tabla 2-90 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Caletones, estación Sewell .....	107
Tabla 2-91 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Club	108
Tabla 2-92 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Población .....	109
Tabla 2-93 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Caletones, estación Sewell ....	109
Tabla 2-94 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m3N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación C.P.V.K .....	114
Tabla 2-95 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m3N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación CD 23 de Marzo .....	114
Tabla 2-96 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m3N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Centro .....	114

Tabla 2-97 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Chiu-Chiu.....	115
Tabla 2-98 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Nueva Chiu-Chiu.....	115
Tabla 2-99 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Servicio Médico Legal.....	115
Tabla 2-100 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre.....	116
Tabla 2-101 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Ferrocarril.....	117
Tabla 2-102 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación J.J. Latorre.....	117
Tabla 2-103 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m <sup>3</sup> N] en la región de Valparaíso.....	118
Tabla 2-104 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m <sup>3</sup> N] en la estación Parque O'Higgins de la ciudad de Santiago.....	119
Tabla 2-105 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m <sup>3</sup> N] en la ciudad de Temuco.....	121
Tabla 2-106 Comparación de estaciones con mayores concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N].....	123
Tabla 2-107 Equipos de monitoreo utilizados en todas las estaciones de interés para la medición discreta de MP.....	125
Tabla 2-108 Metodología de análisis, laboratorio y frecuencia de muestreo de MP10, MP2,5 y As.....	129
Tabla 2-109 Descripción general de las técnicas de muestreo utilizadas para medir las concentraciones de arsénico en el aire ambiental.....	134
Tabla 2-110 Ejemplos de procedimientos de recolección y análisis de muestras para el arsénico en el aire ambiente.....	135
Tabla 2-111 Estudios de arsénico en aire ambiente y comparación de metodologías de estudio.....	136
Tabla 3-1 Flujos Establecidos por el Protocolo de Balance de Masa.....	141
Tabla 3-2 Requisitos de muestreo.....	144
Tabla 3-3 Resumen de información sistematizada de emisiones de arsénico.....	145
Tabla 3-4 Número de meses y promedio de emisiones negativas.....	146
Tabla 3-5 Fuentes y establecimientos con emisiones reportadas de arsénico por sobre lo esperado.....	150
Tabla 3-6 Fuentes con sobre estimación de emisiones para el año 2020.....	150
Tabla 3-7 Inventario de estimación de emisiones [ton/año] de Arsénico 2020.....	151
Tabla 3-8 Estimación de emisiones de arsénico [ton/año] por chimenea con regulación de As en la actual norma, año 2020.....	153
Tabla 3-9 Equipos e instalaciones principales de fundición Chuquicamata.....	158
Tabla 3-10 Equipos e instalaciones principales de fundición Altonorte.....	167
Tabla 3-11 Equipos e instalaciones principales de fundición Potrerillos.....	175

Tabla 3-12 Variación de flujos de inventario, Potrerillos 2020 .....	177
Tabla 3-13 Equipos e instalaciones principales de fundición Hernán Videla Lira .....	186
Tabla 3-14 Variación de flujos de inventario, HVL 2020.....	188
Tabla 3-15 Equipos e instalaciones principales de fundición Ventanas .....	195
Tabla 3-16 Equipos e instalaciones principales de fundición Chagres .....	203
Tabla 3-17 Equipos e instalaciones principales de fundición Caletones .....	211
Tabla 3-18 Emisiones de Arsénico [TMF] y Razón entre material de limpieza y emisión acumulada por fundición, periodo 2017-2020.....	218
Tabla 3-19 Holgura de emisiones respecto de límite de emisión, en períodos de entrada en vigencia del DS 28 por fundición.....	221
Tabla 3-20 Captura y fijación de As(%) por fundición, período 2017 a 2020 .....	226
Tabla 3-21 Intensidad de emisiones [g As/t Cu fino], periodo 2017 a 2020 .....	227
Tabla 3-22 Principales flujos y su proporción respecto del total por fundición, año 2020.....	229
Tabla 3-23 Cronograma de cierre de centrales a carbón considerado en proyección.....	233
Tabla 3-24 Proyección de inventario de arsénico [ton/año], 2020-2035.....	236
Tabla 4-1 Efectos agudos no carcinogénicos según forma química de arsénico .....	242
Tabla 4-2: Efectos crónicos no carcinogénicos según forma química de arsénico .....	244
Tabla 4-3 Efectos carcinogénicos según forma química de arsénico .....	245
Tabla 4-4 Clasificación carcinogénica – arsénico inorgánico.....	250
Tabla 4-5 Valores de referencia exposición aguda inhalatoria - arsénico inorgánico.....	251
Tabla 4-6 Valores de referencia exposición crónica inhalatoria: cancerígenos - arsénico inorgánico .....	252
Tabla 4-7 Valores de referencia exposición crónica inhalatoria: no cancerígenos - arsénico inorgánico .....	252
Tabla 4-8 Valores de toxicidad arsénico inorgánico .....	253
Tabla 4-9 Límites ocupacionales de exposición inhalatoria- arsénico inorgánico.....	254
Tabla 4-10 Clasificación carcinogénica - Trióxido de arsénico .....	264
Tabla 4-11 Valores de referencia exposición aguda inhalatoria – trióxido de arsénico .....	265
Tabla 4-12 Valores de toxicidad - trióxido de arsénico .....	265
Tabla 4-13 Límites ocupacionales de exposición inhalatoria - trióxido de arsénico .....	266
Tabla 4-14 Clasificación carcinogénica - Tricloruro de arsénico.....	273
Tabla 4-15 Valores de toxicidad - tricloruro de arsénico.....	274
Tabla 4-16 Límites ocupacionales de exposición inhalatoria tricloruro de arsénico.....	274
Tabla 4-17 Clasificación carcinogénica - Pentóxido de arsénico .....	278
Tabla 4-18 Valores de toxicidad - pentóxido de arsénico.....	279
Tabla 4-19 Límites ocupacionales de exposición inhalatoria pentóxido de arsénico .....	279
Tabla 4-20 Clasificación carcinogénica - Arsina .....	283
Tabla 4-21 Valores de referencia exposición aguda inhalatoria - arsina.....	284
Tabla 4-22 Valores de referencia exposición crónica inhalatoria: no cancerígenos - arsina .....	284
Tabla 4-23 Valores de toxicidad arsina .....	285
Tabla 4-24: Límites ocupacionales de exposición inhalatoria- arsina .....	286
Tabla 4-25 Coeficientes de riesgo asociados a efectos cancerígenos .....	290

Tabla 5-1 Características dominios WRF.....	293
Tabla 5-2 Criterios estadísticos para evaluar el grado de validez de los resultados obtenidos por el modelo WRF.....	299
Tabla 5-3 Criterios de tolerancia de diferencia absoluta de variables modeladas.....	300
Tabla 5-4 Estaciones de monitoreo por dominio de estudio .....	301
Tabla 5-5 Puntos de interés por dominio de estudio .....	302
Tabla 5-6 Estaciones representativas por localidad y dominio .....	309
Tabla 5-7 Concentración basal [ng/m <sup>3</sup> ] estimada estadísticamente para calibración .....	312
Tabla 5-8 Variables de incertidumbre – Velocidad del viento.....	313
Tabla 5-9 Variables de incertidumbre – Dirección del viento .....	313
Tabla 5-10 Variables de incertidumbre – Temperatura .....	313
Tabla 5-11 Variables de incertidumbre – Velocidad del viento.....	315
Tabla 5-12 Variables de incertidumbre – Dirección del viento .....	315
Tabla 5-13 Variables de incertidumbre – Velocidad del viento.....	316
Tabla 5-14 Variables de incertidumbre – Dirección del viento .....	316
Tabla 5-15 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Chuquicamata .....	318
Tabla 5-16 Estación representativa por localidad – Fundición Chuquicamata .....	320
Tabla 5-17 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Chuquicamata .....	321
Tabla 5-18 Factor de corrección por receptor – Fundición Chuquicamata.....	321
Tabla 5-19 Factor FEC por fuente – Estación CD 23 de marzo, Fundición Chuquicamata .....	321
Tabla 5-20 Factor FEC por fuente – Estación Nueva ChiuChiu, Fundición Chuquicamata .....	322
Tabla 5-21 Factor FEC corregido por fuente – Estación CD 23 de marzo, Fundición Chuquicamata .....	322
Tabla 5-22 Factor FEC corregido por fuente – Estación Nueva ChiuChiu, Fundición Chuquicamata .....	322
Tabla 5-23 Relación FEC por receptor – Fundición Chuquicamata.....	322
Tabla 5-24 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Altonorte .....	323
Tabla 5-25 Estación representativa por localidad – Fundición Altonorte .....	326
Tabla 5-26 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Altonorte .....	327
Tabla 5-27 Factor de corrección por receptor – Fundición Altonorte.....	327
Tabla 5-28 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación Coviefi, Fundición Altonorte.....	327
Tabla 5-29 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación Inacal, Fundición Altonorte .....	327
Tabla 5-30 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación Coviefi, Fundición Altonorte .....	328
Tabla 5-31 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación Inacal, Fundición Altonorte.....	328
Tabla 5-32 Relación FEC por receptor – Fundición Altonorte .....	328
Tabla 5-33 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Potrerillos.....	329
Tabla 5-34 Estación representativa por localidad – Fundición Potrerillos .....	331
Tabla 5-35 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Potrerillos .....	332
Tabla 5-36 Factor de corrección por receptor – Fundición Potrerillos.....	332

Tabla 5-37 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación Cine Inca, Fundición Potrerillos.....	332
Tabla 5-38 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación CAP, Fundición Potrerillos .....	332
Tabla 5-39 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación Cine Inca, Fundición Potrerillos .....	333
Tabla 5-40 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación CAP, Fundición Potrerillos.....	333
Tabla 5-41 Relación <i>FEC</i> por receptor – Fundición Potrerillos .....	333
Tabla 5-42 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Hernán Videla Lira .....	334
Tabla 5-43 Estación representativa por localidad – Fundición Hernán Videla Lira .....	336
Tabla 5-44 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Hernán Videla Lira .	337
Tabla 5-45 Factor de corrección por receptor – Fundición Hernán Videla Lira .....	337
Tabla 5-46 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación Paipote, Fundición Hernán Videla Lira .....	337
Tabla 5-47 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación Tierra Amarilla, Fundición Hernán Videla Lira.....	337
Tabla 5-48 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación Paipote, Fundición Hernán Videla Lira	338
Tabla 5-49 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación Tierra Amarilla, Fundición Hernán Videla Lira.....	338
Tabla 5-50 Relación <i>FEC</i> por receptor – Fundición Hernán Videla Lira .....	338
Tabla 5-51 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Ventanas.....	339
Tabla 5-52 Estación representativa por localidad – Fundición Ventanas.....	342
Tabla 5-53 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Ventanas.....	343
Tabla 5-54 Factor de corrección por receptor – Fundición Ventanas .....	343
Tabla 5-55 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación Puchuncaví, Fundición Ventanas.....	343
Tabla 5-56 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación Quintero, Fundición Ventanas.....	343
Tabla 5-57 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación Ventanas, Fundición Ventanas .....	344
Tabla 5-58 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación Puchuncaví, Fundición Ventanas .....	344
Tabla 5-59 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación Quintero, Fundición Ventanas .....	344
Tabla 5-60 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación Ventanas, Fundición Ventanas .....	344
Tabla 5-61 Relación <i>FEC</i> por receptor – Fundición Ventanas.....	344
Tabla 5-62 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Chagres.....	345
Tabla 5-63 Estación representativa por localidad – Fundición Chagres.....	347
Tabla 5-64 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Chagres .....	348
Tabla 5-65 Factor de corrección por receptor – Fundición Chagres .....	348
Tabla 5-66 Factor <i>FEC</i> por fuente – Estación Lo Campo, Fundición Chagres .....	348
Tabla 5-67 Factor <i>FEC</i> por fuente – Punto de interés Llayllay, Fundición Chagres .....	348
Tabla 5-68 Factor <i>FEC</i> por fuente – Punto de interés Panquehue, Fundición Chagres.....	349
Tabla 5-69 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Estación Lo Campo, Fundición Chagres.....	349
Tabla 5-70 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Punto de interés Llayllay, Fundición Chagres....	349
Tabla 5-71 Factor <i>FEC</i> corregido por fuente – Punto de interés Panquehue, Fundición Chagres .....	349
Tabla 5-72 Relación <i>FEC</i> por receptor – Fundición Chagres .....	350

Tabla 5-73 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Caletones.....	351
Tabla 5-74 Estación representativa por localidad – Fundición Caletones.....	353
Tabla 5-75 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Caletones.....	354
Tabla 5-76 Factor de corrección por receptor – Fundición Caletones .....	354
Tabla 5-77 Factor FEC por fuente – Estación Coya Población, Fundición Caletones .....	354
Tabla 5-78 Factor FEC corregido por fuente – Estación Puchuncaví, Fundición Caletones .....	354
Tabla 5-79 Relación FEC por fuente – Fundición Caletones .....	355
Tabla 6-1 Tipos y valores límites anuales de concentración de As en el aire de fuentes internacionales [ng/Nm <sup>3</sup> ].....	357
Tabla 6-2 Estándares de calidad del aire primarios de normativas internacionales para arsénico, según periodo de evaluación [ng/Nm <sup>3</sup> ].....	359
Tabla 6-3 Valores límites de contribución a la concentración anual de As en el aire con enfoque entorno a las fuentes emisoras de contaminantes [ng/Nm <sup>3</sup> ] .....	363
Tabla 6-4 Costos estimados del cumplimiento de los valores límite de arsénico propuestos, para la industria de producción de cobre, y cantidad de sitios en que se espera que se pueda cumplir el límite indicado [millones EUR/año] .....	369
Tabla 6-5 Síntesis de estado de cuantificación y valorización de cada beneficio identificado en la evaluación económica de la Directiva 2004/107/CE .....	371
Tabla 6-6 Normas de calidad anual en EEUU y nivel de riesgo equivalente .....	378
Tabla 6-7 Concentraciones [ng/m <sup>3</sup> N] de arsénico en MP10 proyectadas en el año de referencia para escenarios normativos.....	388
Tabla 6-8 Variación en los niveles de riesgo para escenarios normativos, para año referencial .....	389
Tabla 6-9 Riesgo poblacional proyectado por escenario para año referencial, en casos esperados por año .....	391
Tabla 6-10 Valorización de los beneficios anuales [UF/año] asociados a los escenarios de NPCA para el año de referencia.....	393
Tabla 6-11 Sensibilización de los beneficios anuales [UF/año] para el año de referencia al parámetro IUR.....	393
Tabla 7-1 Costo de inversión unitaria [UF según unidad indicada] .....	397
Tabla 7-2 Costo operación y mantención unitaria [UF/ton concentrado procesado] .....	398
Tabla 7-3 Costo por reducción del nivel de producción para dar cumplimiento a la NPCA .....	400
Tabla 7-4 Ratio entre cobre producido y concentrados procesados.....	402
Tabla 7-5 Fracción de captura y fijación de As por fundición año 2020, según balance de masa .....	403
Tabla 7-6 Capacidad, procesamiento y factor de planta 2020 por fundición [ton/año].....	403
Tabla 7-7 Paquete de medidas seleccionadas para cada fundición en propuestas de escenarios de NPCA .....	407
Tabla 7-8 Estimación de reducción de emisiones lograda y requerida .....	409
Tabla 7-9 Costos totales de alternativas regulatorias [UF/año], por fundición y tipo de costo para año de referencia .....	411

Tabla 7-10 Coeficientes de Dosis-Respuesta para MP2,5 (por  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ..... 412

Tabla 7-11 Ratio de contribución de fundiciones a As y MP2,5 ..... 413

Tabla 7-12 Estimación de beneficios [UF/año], por escenario y localidad para año de referencia ..... 414

Tabla 7-13 Estimación de co-beneficios [UF/año], por escenario y efecto considerado, para año de referencia ..... 414

Tabla 7-14 Sensibilización de co-beneficios [UF/año] por escenario y escenario de relación As : MP2,5 en HVL, para año de referencia ..... 415

Tabla 7-15 Beneficios de la NPCA [UF/Año] por reducciones adicionales de arsénico, para año de referencia ..... 415

Tabla 7-16 Beneficios estimados [UF/año] por alternativa regulatoria, para año de referencia ..... 416

Tabla 7-17 Indicadores descriptivos de beneficios costos por escenarios, año de referencia .. 417

Tabla 7-18 Indicadores descriptivos de beneficios costos por fundición para escenario de alternativa regulatoria “Esc 2 en 10k (46,6)”, año de referencia ..... 418

Tabla 7-19 Indicadores descriptivos de beneficios costos por fundición para escenario de alternativa regulatoria “Esc 1 en 10k (23,3)”, año de referencia ..... 418

Tabla 7-20 Indicadores descriptivos de beneficios costos por fundición para escenario de alternativa regulatoria “Esc Cont Lim (15,0)”, año de referencia ..... 418

Tabla 7-21 Costos y benéficos medios por fundición y escenario, año de referencia ..... 419

Tabla 7-22 Sensibilidad de B/C frente a IUR y escenario As : MP2,5 en HVL ..... 419

Tabla 8-1 Intensidad de emisiones [g As/t Cu producido], periodo 2017 a 2020 ..... 422

Tabla 8-2 Indicadores descriptivos de beneficios costos por escenarios, año de referencia .... 429

Tabla 8-3 Sensibilidad de B/C frente a IUR y escenario As : MP2,5 en HVL ..... 430

## Lista de Figuras

Figura 2-1 Mapa valores mediana concentración As en MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], año 2020, nacional... 26

Figura 2-2 Mapa termoeléctrica Tocopilla, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas ..... 29

Figura 2-3 Concentraciones de As en MP10 [ $\text{ng}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías termoeléctrica Tocopilla, todas las estaciones ..... 30

Figura 2-4 Fracción de As en MP10 [%] cercanías Termoeléctrica Tocopilla, estación Super Site ..... 32

Figura 2-5 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ $\text{ng}/\text{m}^3\text{N}$ ], cercanías Termoeléctrica Tocopilla, estación Super Site ..... 33

Figura 2-6 Mapa fundición Chuquicamata, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas ..... 34

Figura 2-7 Concentraciones de As en MP10 [ $\text{ng}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones, excepto Hospital El Cobre..... 36

Figura 2-8 Concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre .....	37
Figura 2-9 Concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en Chuquicamata, estaciones C.P.V.K y CD 23 de Marzo, valores inferiores a 200 ng/m <sup>3</sup> N .....	39
Figura 2-10 Fracción de As en MP10 [%] cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones .....	43
Figura 2-11 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N], cercanías fundición Chuquicamata, estación Aukahuasi .....	47
Figura 2-12 Mapa minera Spence, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas	48
Figura 2-13 Concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías minera Spence, todas las estaciones .....	49
Figura 2-14 Fracción de As en MP10 [%] cercanías Minera Spence, todas las estaciones.....	50
Figura 2-15 Mapa termoeléctricas Andina y Mejillones, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas .....	52
Figura 2-16 Concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, todas las estaciones .....	53
Figura 2-17 Fracción de As en MP10 [%] cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, todas las estaciones .....	55
Figura 2-18 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N], cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Subestación Eléctrica .....	57
Figura 2-19 Mapa fundición Altonorte, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas .....	58
Figura 2-20 Concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Altonorte, todas las estaciones .....	60
Figura 2-21 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Altonorte, todas las estaciones ..	63
Figura 2-22 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N], cercanías fundición Altonorte, estación Sur .....	65
Figura 2-23 Mapa fundición Potrerillos, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas .....	66
Figura 2-24 Concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Potrerillos, todas las estaciones .....	68
Figura 2-25 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Potrerillos, todas las estaciones .	72
Figura 2-26 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N], cercanías fundición Potrerillos, estación CAP .....	74
Figura 2-27 Mapa fundición Hernán Videla Lira, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas .....	75
Figura 2-28 Concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, todas las estaciones .....	76
Figura 2-29 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Hernán Videla Lira, todas las estaciones .....	79
Figura 2-30 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N], cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Paipote .....	81

Figura 2-31 Mapa fundición Ventanas, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas .....	82
Figura 2-32 Concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Ventanas, todas las estaciones .....	84
Figura 2-33 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Ventanas, todas las estaciones...	89
Figura 2-34 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N], cercanías fundición Ventanas, estación La Greda .....	92
Figura 2-35 Mapa refinería ENAP Aconcagua, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas .....	93
Figura 2-36 Concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías refinería ENAP, todas las estaciones .....	94
Figura 2-37 Fracción de As en MP10 [%], cercanías refinería ENAP, todas las estaciones .....	96
Figura 2-38 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N], cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Las Gaviotas .....	98
Figura 2-39 Mapa fundición Chagres, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas .....	99
Figura 2-40 Concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chagres, todas las estaciones .....	101
Figura 2-41 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Chagres, todas las estaciones...	103
Figura 2-42 Mapa fundición Caletones, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas .....	104
Figura 2-43 Concentraciones de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Caletones, todas las estaciones .....	106
Figura 2-44 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Caletones, todas las estaciones	108
Figura 2-45 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m <sup>3</sup> N], cercanías fundición Caletones, estación Sewell .....	110
Figura 2-46 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones, excepto Hospital El Cobre.....	111
Figura 2-47 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre .....	112
Figura 2-48 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones, años 2015 a 2021, valores inferiores a 250 ng/m <sup>3</sup> N .....	113
Figura 2-49 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m <sup>3</sup> N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, todas las estaciones .....	116
Figura 2-50 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m <sup>3</sup> N] en la región de Valparaíso .....	118
Figura 2-51 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m <sup>3</sup> N] en la estación Parque O'Higgins de la ciudad de Santiago.....	119
Figura 2-52 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m <sup>3</sup> N] en estaciones de la ciudad de Temuco .....	120
Figura 3-1 Sistema, Flujos y límites de balance de masa.....	139
Figura 3-2 Estimación de emisiones [ton/año] de Arsénico 2020 según fuente.....	154
Figura 3-3 Emisiones de arsénicos en escala lineal y logarítmica por comuna .....	156

Figura 3-4 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Chuquicamata.....	158
Figura 3-5 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Chuquicamata 2020 .....	159
Figura 3-6 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual.....	160
Figura 3-7 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Chuquicamata, 1993-2020.....	161
Figura 3-8 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Chuquicamata, 2017-2020 .....	162
Figura 3-9 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Chuquicamata, periodo 2017-2020 .....	163
Figura 3-10 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Chuquicamata 2017-2020. ....	164
Figura 3-11 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Chuquicamata 2017-2020.....	165
Figura 3-12 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Altonorte .....	166
Figura 3-13 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Altonorte 2020..	168
Figura 3-14 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual .....	169
Figura 3-15 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Altonorte, 2004-2020.....	170
Figura 3-16 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Altonorte, 2017-2020 .....	171
Figura 3-17 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Altonorte, periodo 2017-2020 .....	172
Figura 3-18 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Altonorte 2017-2020. ....	173
Figura 3-19 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Altonorte 2017-2020. ....	174
Figura 3-20 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Potrerillos .....	175
Figura 3-21 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Potrerillos 2020.	176
Figura 3-22 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual .....	177
Figura 3-23 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Potrerillos, 2014-2020 .....	178
Figura 3-24 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Potrerillos, 2017-2020 .....	180
Figura 3-25 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Potrerillos, 2017-2020 (escala entre 65% y 100%).....	180
Figura 3-26 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Potrerillos, periodo 2017-2020 .....	182
Figura 3-27 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Potrerillos 2017-2020. ....	183
Figura 3-28 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Potrerillos 2017-2020. ....	184
Figura 3-29 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Hernán Videla Lira .....	185
Figura 3-30 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Hernán Videla Lira 2020 .....	187
Figura 3-31 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual .....	189
Figura 3-32 Emisiones anuales [TMF] de arsénico Hernán Videla Lira, 1999-2020 .....	190
Figura 3-33 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición HVL, 2017-2020 .....	191

Figura 3-34 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición HVL, periodo 2017-2019 .....	192
Figura 3-35 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Hernán Videla Lira 2017-2020. ....	193
Figura 3-36 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Hernán Videla Lira 2017-2020.....	194
Figura 3-37 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Ventanas.....	195
Figura 3-38 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Ventanas 2020 ..	196
Figura 3-39 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual .....	197
Figura 3-40 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Ventanas, 2005-2020 .....	198
Figura 3-41 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Ventanas, 2017-2020.....	199
Figura 3-42 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Ventanas, periodo 2017-2020 .....	200
Figura 3-43 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Ventanas 2017-2020. ....	200
Figura 3-44 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Ventanas 2017-2020.....	201
Figura 3-45 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Chagres .....	202
Figura 3-46 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Chagres 2020 ....	204
Figura 3-47 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual .....	205
Figura 3-48 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Chagres, 2014-2020 .....	206
Figura 3-49 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Chagres, 2017-2020.....	207
Figura 3-50 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Chagres, periodo 2017-2020 .....	208
Figura 3-51 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Chagres 2017-2020.....	208
Figura 3-52 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Chagres 2017-2020.....	209
Figura 3-53 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Caletones .....	210
Figura 3-54 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Caletones 2020 .	212
Figura 3-55 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual .....	213
Figura 3-56 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Caletones, 2010-2020 .....	214
Figura 3-57 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Caletones, 2017-2020.....	215
Figura 3-58 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Caletones, periodo 2017-2020 .....	216
Figura 3-59 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Caletones 2017-2020. ....	216
Figura 3-60 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Caletones 2017-2020.....	217
Figura 3-61 Razón Material de Limpieza/Emisión Acumulada, por fundición y año.....	220
Figura 3-62 Holguras de emisión respecto al Límite por fundición, año 2019.....	222
Figura 3-63 Holguras de emisión respecto al Límite por fundición, año 2020.....	223

Figura 3-64 Porcentaje de captura y fijación de As (%) para el periodo 2017-2020.....	225
Figura 3-65 Intensidad de emisiones [g As/t Cu fino], periodo 2017 a 2020 .....	227
Figura 3-66 Contenido Arsénico en concentrados de cobre [ppm], año 2020 .....	229
Figura 3-67 Proyección de producción de concentrados de cobre refinados y sin refinar .....	234
Figura 5-1 Diagrama de flujo de información meteorológica numérica y fuentes de emisión atmosféricas para la modelación de las emisiones atmosféricas según el SEIA. ....	291
Figura 5-2 Anidado de cuatro dominios WRF utilizado para cada una de las ubicaciones correspondientes a las 8 plantas .....	294
Figura 5-3 Dominio – Fundición Chuquicamata.....	295
Figura 5-4 Dominio – Planta Tostación Ministro Hales .....	295
Figura 5-5 Dominio – Fundición Altonorte .....	296
Figura 5-6 Dominio – Fundición Potrerillos .....	296
Figura 5-7 Dominio – Fundición Hernán Videla Lira .....	297
Figura 5-8 Dominio – Fundición Chagres .....	297
Figura 5-9 Dominio – Fundición Ventanas.....	298
Figura 5-10 Dominio – Fundición Caletones.....	298
Figura 5-11 Supuesto de la relación lineal entre emisiones y concentraciones.....	303
Figura 5-12 Ejemplo de cadena markoviana oculta para estimar concentración basal.....	311
Figura 5-13 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Chuquicamata 2020 .....	319
Figura 5-14 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Chuquicamata 2020 .....	320
Figura 5-15 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Altonorte 2020.....	325
Figura 5-16 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Altonorte 2020 .....	326
Figura 5-17 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Potrerillos 2020.....	330
Figura 5-18 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Potrerillos 2020 .....	331
Figura 5-19 Evolución del error de la concentración modelada versus observada - Fundición Hernán Videla Lira 2020.....	335
Figura 5-20 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Hernán Videla Lira 2020.....	336
Figura 5-21 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Ventanas 2020 .....	341
Figura 5-22 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Ventanas 2020 .....	342
Figura 5-23 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Chagres 2020.....	346
Figura 5-24 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Chagres 2020 .....	347

Figura 5-25 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Caletones 2020 ..... 352

Figura 5-26 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Caletones 2020 ..... 353

Figura 6-1 Coeficientes de riesgos para cáncer identificados ..... 373

Figura 6-2 Relación entre riesgo incremental y concentraciones de arsénico para coeficientes de riesgo de US-EPA y de la OMS..... 374

Figura 6-3 Proyección base de concentración de Arsénico en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] al 2035 ..... 380

Figura 6-4 Riesgo incremental individual de cáncer para proyección base 2035 ..... 382

Figura 6-5 Escenarios regulatorios propuestos ..... 385

Figura 6-6 Riesgo individual incremental por escenario y comparación con proyección base, para años referencial ..... 389

Figura 6-7 Distribución de la reducción del riesgo poblacional por escenario para año referencial, en casos anuales esperados..... 392

Figura 7-1 Contenido promedio de As en concentrados de cobre procesados [ppm], año 2020 ..... 401

Figura 7-2 Efectos socioeconómicos de las medidas de mitigación ..... 404

Figura 7-3 Beneficios estimados [UF/año] por alternativa regulatoria, para año de referencia ..... 416

Figura 8-1 Proyección base de concentración de Arsénico en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] al 2035 ..... 427

Figura 8-2 Escenarios regulatorios propuestos ..... 428

Figura 10-1 Observaciones con candidatos a ser excluidos para Estación J.J. Latorre, Termoeléctrica Andina..... 439

Figura 10-2 Emisión reportada mensualmente [g As/TMF Cu] ..... 439

## Acrónimos y Abreviaturas

### Instituciones

MINSAL:	Ministerio de Salud
MMA:	Ministerio del Medio Ambiente
OCDE:	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico
OMS:	Organización Mundial de la Salud
PNUMA:	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
US-EPA:	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

### Monedas

CLP:	Pesos de Chile
UF:	Unidad de Fomento Chilena
USD:	Dólares de Estados Unidos

### Abreviaturas

ACB:	Análisis Costo Beneficio
AGIES:	Análisis General del Impacto Económico y Social
BAT:	Mejores Tecnologías Disponibles, por sus siglas en inglés “ <i>Best Available Technologies</i> ”
CIE10:	Clasificación Internacional de Enfermedades, 10ª edición
COI:	Costo de Enfermedad, por sus siglas en inglés “ <i>Cost of illness</i> ”
FE:	Factor de Emisión
FEC:	Factor Emisión-Concentración
GEI:	Gases de Efecto Invernadero
MP:	Material Particulado
NPCA:	Norma Primaria de Calidad Ambiental
PNM:	Política Nacional Minera
PPDA:	Plan de Prevención y Descontaminación Ambiental
SNIFA:	Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental
TIR:	Tasa Interna de Retorno
TR:	Tracto Respiratorio
VAN:	Valor Actual Neto
VVE:	Valor de la Vida Estadística
WTP:	Disposición a Pagar, por sus siglas en inglés “ <i>Willingness to Pay</i> ”

### Prefijos

T: Tera ( $10^{12}$ )  
G: Giga ( $10^9$ )  
M: Mega ( $10^6$ )  
k: Kilo ( $10^3$ )  
m: Mili ( $10^{-3}$ )  
 $\mu$ : Micro ( $10^{-6}$ )  
n: Nano ( $10^{-9}$ )

## 0. Resumen Ejecutivo

El presente informe se enmarca en una consultoría cuyo objetivo general es proporcionar antecedentes para la elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire de Arsénico (NPCA) y también para la revisión del DS 28/2013 del MMA. En particular este documento se refiere al primero de los objetivos específicos, dedicado a presentar antecedentes para una NPCA para Arsénico, pero se ve complementado por los contenidos desarrollados en el informe complementario dedicado a la revisión de la Norma de Emisión.

### **Comportamiento histórico de arsénico y diagnóstico de la calidad de aire por arsénico**

Se recopiló, procesó y sistematizó información respecto a niveles de arsénico atmosférico para 46 estaciones de monitoreo en el país. Estas estaciones, no se distribuyen equitativamente en el territorio, sino que se concentran en las regiones de Antofagasta (18), Valparaíso (14) y Atacama (8), mientras que las restantes estaciones se ubican entre la RM, O'Higgins y La Araucanía. Lo anterior, responde principalmente a la distribución de las actividades productivas, observándose que el 72% de las estaciones con medición de arsénico se encuentran en zonas impactadas por fundiciones de cobre.

Las estaciones en torno a fundiciones no sólo son más numerosas, sino que también son las que presentan series de datos con un historial de mayor intervalo de tiempo, así como mayor número de mediciones anuales. Se observa que las estaciones con mayor número de mediciones anuales, están midiendo a intervalos de 3 días, lo que permite limitar el intervalo de confianza para estadígrafos de interés como la media o la mediana. Entre todas las estaciones se observa que desde el año 2016 se están acumulando en torno a 3 mil mediciones válidas anuales de arsénico.

El análisis de los resultados da cuenta de situaciones muy diversas en el país, las cuales se ven influenciadas por la meteorología, topografía, condiciones basales y emisiones del contaminante. En este sentido, se constata que las mayores concentraciones de arsénico observadas se encuentran en estaciones cercanas a las fundiciones. De esta forma, el 2020 se observan concentraciones medias superiores a los 50 ng/m<sup>3</sup> en estaciones cercanas a las fundiciones tales como Doña Inés, Intelec (ambas en Potrerillos), Sur (Altonorte), Aukahuasi (Calama), Sewell (Caletones), Quintero, Quintero Centro (ambas cercas de Ventanas) y Paipote (HVL). De estas estaciones, sólo las tres últimas cuentan con representatividad poblacional de MP10, todas ubicándose en el rango de 50-60 ng/m<sup>3</sup>. En el resto de las localidades con estaciones con EMRP para MP10 en zonas de influencia de las fundiciones, se observan concentraciones medias superiores a 20 ng/m<sup>3</sup>, como en Calama (Chuquicamata) y en San Fernando y Tierra Amarilla (HVL).

Sin perjuicio de lo anterior, de forma general se observa una tendencia a la mejora en los niveles atmosféricos de arsénico en la última década, el cual se ve acentuado especialmente tras la entrada en efecto de todos los límites establecidos en el DS 28/2013 del MMA. Observándose zonas con reducciones cercanas de hasta el 70%. Se reconoce, sin embargo, que parte de esta

reducción se ve influenciada por la baja de emisión durante el proceso de instalación de la instalación y puesta en marcha de los sistemas de abatimiento.

Por su parte, las estaciones sin influencia de las fundiciones, tienen valores medios menores a 4 ng/m<sup>3</sup>, salvo las estaciones ubicadas en el entorno de la minera Spence en la comuna de Antofagasta. Se trata de dos estaciones con medias de 10 ng/m<sup>3</sup> (total de 24 datos), la cual se ve afectada por el aporte basal del desierto en dicha zona.

### Inventario de emisiones y análisis de las principales fuentes emisoras

El DS28/2013 del MMA además de resultar en reducciones de las emisiones y mejora en la calidad del aire, permitió la disponibilización de información comparable entre las diferentes fundiciones, así como de la planta de tostación de Ministro Hales. Esta información, se complementó con estimaciones levantadas a partir de otras fuentes de información disponibles en la institucionalidad ambiental, para dar forma al inventario de emisiones (ver Tabla 0-1).

**Tabla 0-1 Inventario de estimación de emisiones [ton/año] de Arsénico 2020**

Tipo de fuente	Fuente	Emisiones As [ton/año]	Origen de estimación de emisiones
Fundiciones	Fundición Chuquicamata	180,8	Balances de masa DS28/2013
	Fundición Altonorte	117,8	Balances de masa DS28/2013
	Fundición Potrerillos	(1) 51,0	Balances de masa DS28/2013
	Fundición HVL	(2) 18,7	Reestimación basado en intensidad de emisiones
	Fundición Ventanas	28,4	Balances de masa DS28/2013
	Fundición Chagres	8,6	Balances de masa DS28/2013
	Fundición Caletones	67,0	Balances de masa DS28/2013
Planta Tostación	Ministro Hales	0,0	(4) Medición isocinética de planta de ácido.
Otras Fuentes	Termoeléctrica	(3) 0,24	Reestimación a partir de RETC DS138/2005
	Otras fuentes	(3) 0,38	Reestimación a partir de RETC DS138/2005
<b>Total</b>		<b>473,0</b>	

- (1) Emisiones reportadas las cuales consideran dos meses con emisiones reportadas negativas. De no considerar estas emisiones el estimado es 107,1 ton.
- (2) Reestimación basada en intensidad de emisiones considerando reportes del titular a ENAMI en el periodo oct2020 a sep2021. Las emisiones reportadas hasta agosto 2020, registran dos meses con valores negativos y fueron estimadas con una metodología que no se ajusta totalmente a la metodología que se encuentra aprobada bajo la Res. Ex. 1479/2021 SMA. El titular presentó una versión revisada a las SMA para el año 2020 con emisiones referenciales de 12,9 ton.
- (3) Originalmente RETC presenta estimaciones más altas, la diferencia se explica principalmente por la reestimación considerando eficiencia de abatimientos, y problemas puntuales solucionado tal como se detalla en la Sección 3.1.4.
- (4) La planta de tostación Ministro Hales no se encuentra afecta a límite máximo de emisión anual de As.

Fuente: Elaboración propia en base a origen de estimaciones reportadas

Del inventario de estimación de emisiones se observa que más del 99% de las emisiones de arsénico tendrían su origen en las fundiciones de cobre del país. La fracción restante se reparte entre cerca de 4.900 fuentes, distribuidas en 234 comunas, que cuentan con alguna estimación de sus emisiones de arsénico. De ellas se destaca la planta de tostación de Ministro Hales, la cual

también está afecta por el DS28/2013, y cuenta con sistemas de abatimiento para la mitigación de las emisiones, así como las termoeléctricas a carbón. Respecto a estas últimas, se destaca que el cierre de estas unidades en el marco de la estrategia de descarbonización del país, tendrá como co-beneficio la reducción de estas emisiones.

Respecto a la proyección de las emisiones, se consideró las proyecciones de Cochilco respecto de la producción de cobre en las refinerías del país, la cual se traduce en un aumento de la producción desde cerca de 1.300 kt a poco más de 1.500 kt. Este aumento se concentraría principalmente en aquellas fundiciones que durante el 2020 operaron con un nivel de producción restringido por el proceso de puesta en marcha de las nuevas tecnologías, especialmente en Chuquicamata (aumento de 56% de sus emisiones) y Potrerillos (23%). Con estas proyecciones, las emisiones de arsénico alcanzarían las 592 ton/año, es decir, un aumento de 25%.

Respecto a las emisiones de las fundiciones, se observa que todas estarían cumpliendo con la eficiencia de 95% de captura y fijación de arsénico. Sin perjuicio, de esto se observan diferencias en las emisiones de las fundiciones, las cuales no sólo se explican por el nivel de procesamiento de las fundiciones, sino que también se ve influenciada por las características del concentrado y las tecnologías instaladas en cada una de las fundiciones. Lo anterior se refleja en la Tabla 0-2, donde se presenta las emisiones de arsénico por tonelada de producción. Se observa que las mayores emisiones ocurren en las fundiciones del norte del país, las cuales se ven perjudicadas por un alta contenido de arsénico que supera el 0,5% promedio en Chuquicamata, Altonorte y Potrerillos, mientras el resto de las fundiciones tienen contenidos de arsénico promedios menores a 0,15%.

**Tabla 0-2 Intensidad de emisiones [g As/t Cu fino], periodo 2017 a 2020**

Año	DCH	ALN	POT	HVL R/RE (1)	VEN	CHG	CAL
2017	1.854	407	7.744	242	252	192	495
2018	442	425	4.255	91	151	229	420
2019	615	383	883	-77/130	149	276	162
2020	840	453	760	165/237	174	174	209

(1) Para los años 2019 y 2020 se presentan los valores reportados y recalculados. R corresponde a emisión reportada con cuestionamientos sobre la aplicación de la metodología y su representación de la operación real. RE corresponde a estimación revisada según método basado en intensidad de emisiones promedio reportado en periodo oct/2020 a sep/2021 y nivel de actividad reportado para los años respectivos.

Fuente: Elaboración propia

De la misma Tabla 0-2 se observan mejoras relevantes en la intensidad de emisión de arsénico en las fundiciones, producto de la implementación de medidas para aumentar la captura y fijación del arsénico. Al comparar la intensidad de emisiones 2017 y 2020 se observan mejoras de 90% (Potrerillos), 58% (Caletones), 55% (Chuquicamata) y 31% (Ventanas).

### **Efectos sobre efectos en salud y coeficientes de riesgo**

Para caracterizar los efectos adversos en la salud asociados a la exposición de arsénico en el aire, se elaboró un perfil toxicológico del metaloide y de sus formas químicas disponibles, mediante la

recopilación y revisión de información científica relacionada a exposiciones ambientales. En las tablas siguientes se presenta un resumen de los efectos adversos en salud asociados a la exposición aguda y crónica por vía inhalatoria (en negro) y otras vías (en rojo) de las especies químicas de arsénico con información disponible.

**Tabla 0-3 Efectos agudos no carcinogénicos según forma química de arsénico**

Órgano/sistema	Arsénico inorgánico	Trióxido de arsénico	Tricloruro de arsénico	Pentóxido de arsénico	Arsina
	Cas: 7440-38-2	Cas: 1327-53-3	Cas: 7784-34-1	Cas: 1303-28-2	Cas: 7784-42-1
<b>Nervioso</b>	Coma, encefalopatía tóxica, neuropatía, tetraplejía, convulsiones, amnesia	Encefalopatía tóxica, neuropatía, temblor, coma, convulsiones, mareos, dolor de cabeza, neuropatía periférica, pseudo tumor cerebral, fatiga	Encefalopatía tóxica, neuropatía periférica secundaria,	Encefalopatía tóxica, neuropatía, convulsiones	Jaqueca
<b>Respiratorio</b>	Apnea, lesión pulmonar, bronquitis	Insuficiencia respiratoria aguda, lesión pulmonar aguda, síndrome de distrés respiratorio agudo, disnea, sangrado de nariz, tos, hipoxia, derrame pleural, neumonitis	Edema de laringe, síntoma de irritación de membranas mucosas de nariz y garganta, lesión pulmonar aguda, apnea, lesión pulmonar aguda,	Tos, apnea, lesión pulmonar aguda, síndrome de distrés respiratorio agudo	Insuficiencia respiratoria aguda, derrame pleural
<b>Cardiovascular</b>	Arritmia cardíaca, hipotensión	Taquicardia ventricular, torsade de pointes, hipotensión, cardiomiopatía, arritmia cardíaca, bradicardia, intervalo QT prolongado, edema	Arritmia cardíaca	Arritmia cardíaca, hipovolemia por filtración capilar, hipotensión	Arritmia cardíaca, hipotensión

Órgano/sistema	Arsénico inorgánico Cas: 7440-38-2	Trióxido de arsénico Cas: 1327-53-3	Tricloruro de arsénico Cas: 7784-34-1	Pentóxido de arsénico Cas: 1303-28-2	Arsina Cas: 7784-42-1
<b>Circulatorio</b>	Hemólisis, pancitopenia, anemia, leucopenia, coagulación intravascular diseminada	Hemólisis, pancitopenia, leucocitosis, mielo supresión, anomalías de la coagulación, anemia,	Hemólisis, pancitopenia,	Hemólisis, pancitopenia, anemia, coagulación intravascular diseminada	Hemólisis, leucocitosis
<b>Endocrino</b>	Hiperglicemia	Hiperglicemia		Hiperglicemia	
<b>Hepático</b>	Daño hepático, enzimas hepáticas anormales. Falla hepática	Daño hepático, enzimas hepáticas aumentadas, lesión de hígado	Daño hepático	Daño hepático	Ictericia, enzimas hepáticas aumentada, hepatomegalia
<b>Renal</b>	Falla renal	Falla renal, nefrotoxicidad,	Falla renal	Falla renal	Falla renal
<b>Reproductivo y del desarrollo</b>	Efectos en el embarazo: nacimiento de un bebé muerto, trastornos del embarazo	Efectos en el embarazo: muerte neonatal, muerte fetal,	Efectos en el embarazo: muerte neonatal	Efectos en el embarazo: muerte neonatal, encefalopatía, incremento abortos espontáneos, toxicidad fetal	
<b>Dermatológico</b>	Líneas de mees, herpes, quemaduras (prurito, Rush cutáneo)	Trastornos dérmicos (rubor, diaforesis, hiperqueratosis palmar, edema periférico y dermatitis exfoliativa), piel seca, prurito, dermatitis de contacto, líneas de mees	Irritación cutánea, erupción bulbosa, envenenamiento, dermatitis (rubor, diaforesis, hiperqueratosis palmar, edema periférico y dermatitis exfoliativa), línea de mee's.	Dermatitis.	
<b>Gastrointestinal</b>	Gastroenteritis	Dolor abdominal, vómitos, diarrea acuosa o sanguinolenta, debilidad y enrojecimiento de la piel	Irritación gastrointestinal, hemorragia gastrointestinal, gastroenteritis	Gastroenteritis, sabor a ajo	Náuseas y vómitos, pérdida de apetito, dolor abdominal
<b>Otros efectos</b>	Deshidratación, hipocalemia				

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 0-4 Efectos crónicos no carcinogénicos según forma química de arsénico**

Órgano/sistema	Arsénico inorgánico	Trióxido de arsénico	Tricloruro de arsénico	Pentóxido de arsénico	Arsina
	Cas: 7440-38-2	Cas: 1327-53-3	Cas: 7784-34-1	Cas: 1303-28-2	Cas: 7784-42-1
<b>Nervioso</b>	Encefalopatía tóxica, comportamiento anormal, neuropatía, enfermedad cerebrovascular, nistagmo, deterioro cognitivo, perturbación en el pensamiento,			neuropatía	
<b>Respiratorio</b>	Bronquitis asmática, irritación de las membranas mucosas, lesión del sistema respiratorio, bronquiectasias				
<b>Cardiovascular</b>	Miocarditis, isquemia, hipertensión, infarto al miocardio			Miocarditis, isquemia, incremento de presión arterial, infarto al miocardio	
<b>Circulatorio</b>	Anemia hemolítica, pancitopenia, anemia, macrocitosis		Pancitopenia	Pancitopenia, anemia, macrocitosis	
<b>Endocrino</b>	Diabetes mellitus				
<b>Hepático</b>	Daño hepático			Daño hepático	
<b>Reproductivo y del desarrollo</b>	Efectos en el embarazo (aborto espontáneo, muerte fetal, mortalidad neonatal y mortalidad infantil, así como una reducción significativa del peso al nacer). Disfunción eréctil	Efectos en el embarazo (muerte fetal, mortalidad neonatal), deterioro de la fertilidad masculina	Efectos en el embarazo (aborto espontáneo, muerte fetal, mortalidad neonatal y mortalidad infantil, así como una reducción significativa del peso al nacer)	Disfunción eréctil	
<b>Dermatológico</b>	Alopecia		Dermatitis (rubor, diaforesis, hiperqueratosis palmar, edema periférico, hiperpigmentación y dermatitis exfoliativa)		

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 0-5 Efectos carcinogénicos según forma química de arsénico**

Órgano/sistema afectado	Arsénico inorgánico	Trióxido de arsénico	Tricloruro de arsénico	Pentóxido de arsénico	Arsina
	Cas: 7440-38-2	Cas: 1327-53-3	Cas: 7784-34-1	Cas: 1303-28-2	Cas: 7784-42-1
<b>Respiratorio</b>	Cáncer de pulmón	Cáncer de pulmón	Mayor riesgo de cáncer de pulmón.	Cáncer de pulmón	
<b>Renal</b>	Cáncer de vejiga, de riñón	Cáncer de vejiga, de riñón	Cáncer de vejiga, de riñón	Cáncer de vejiga, de riñón	
<b>Hepático</b>	Angiosarcoma hepático (*)	Angiosarcoma hepático (*)	Angiosarcoma hepático (*)	Angiosarcoma hepático (*)	
<b>Dermatológico</b>	Cáncer de pie de tipo no melanoma.	Cáncer de pie de tipo no melanoma.	Cáncer de pie de tipo no melanoma.	Cáncer de pie de tipo no melanoma.	
<b>Otros órganos/sistemas afectados</b>	Ganglios linfáticos, médula ósea, próstata (*)	Ganglios linfáticos, médula ósea, próstata, genotóxico (mutación en leucocitos)	Parece ser mutagénico	próstata(*)	Carcinoma

(\*): Asociado solo a exposiciones del tipo ocupacional.

Fuente: Elaboración propia

La estimación del riesgo extra de cáncer (RECV) para sustancias cancerígenas por la vía de inhalación, se lleva a cabo usando las concentraciones en el aire de la sustancia cancerígena y el criterio de toxicidad que en este caso corresponde el Riesgo Unitario Inhalatorio (IUR<sup>1</sup> por su sigla en inglés). En la tabla siguiente se presentan los niveles disponibles encontrados de riesgo unitario inhalatorio, con las concentraciones asociadas a un nivel de riesgo de 1 persona en 100.000.

**Tabla 0-6 Coeficientes de riesgo asociados a efectos cancerígenos**

Inhalation Unit Risk (IUR) (por ng/m <sup>3</sup> )	Concentración asociada con riesgo de 1e-5 (ng/m <sup>3</sup> )	Efecto crítico	Fuente
4,3e-6	2,3	Cáncer pulmonar	(US-EPA, 2011)
3,3e-6	3,0		(CARB, 1990)
0,2e-6	66,7		TCEQ (Erraguntla, Sielken, Valdez-Flores, & Grant, 2012)
0,7e-6	14,3		Netherlands (Dutch Expert Committee on Occupational Safety, DECOS) (Lewis, Beyer, & Zu, 2015)
1,5e-6	6,7		WHO Air Quality Guidelines for Europe.

Fuente: Elaboración propia

<sup>1</sup> El riesgo unitario inhalatorio (IUR) es la estimación cuantitativa en términos de riesgo por volumen de aire respirado expresado generalmente en unidades de ug/m<sup>3</sup> de la sustancia cancerígena.(US-EPA, 1994)

### **Relación emisión-concentración de arsénico atmosférico**

Para determinar la relación emisión – concentración mediante la definición de un factor (FEC), se supuso una relación lineal entre la variación de las emisiones atmosféricas de un contaminante y su concentración ambiental resultante, evaluada en diferentes receptores discretos. Por lo tanto, para cada dominio de simulación en donde se emplazan las 7 fundiciones y la planta de tostación se realizó una modelación de dispersión. Se seleccionaron estos dominios considerando que son los que tienen las mayores concentraciones observadas, así como más del 99% de las emisiones estimadas. De acuerdo con el inventario de emisiones procedentes de cada fuente de emisión reportada, se realizó la modelación del año 2020 completo de sus emisiones atmosféricas, así como la meteorología (WRF), contrastando con la información recogida en cada estación de monitoreo de calidad del aire del SINCA definidas de acuerdo con su representatividad por comuna y dominio.

Durante este desarrollo, y según los datos registrados en las estaciones del SINCA, se planteó la hipótesis de que pueda existir un nivel basal de arsénico, por el efecto de la resuspensión de material particulado depositado sobre el suelo, considerando este nivel basal dentro de la determinación del FEC. Para determinar esta contribución basal, se realizó un estudio estadístico que permitió contar con una estimación de la contribución basal para estaciones que representan las localidades dentro del dominio modelado.

Al realizar un análisis comparativo entre los resultados modelados y los observados de arsénico en las estaciones, en la mayoría de los casos se apreció una buena correlación. No obstante, los resultados del modelo de dispersión atmosférica aplicado presentaron, en líneas generales, una sobreestimación homogénea en los niveles de concentración de arsénico en las estaciones. Sin embargo, gracias a la metodología propuesta, la cual incorpora un factor de corrección (FC) asociado al error sistemático del modelo, se logró disminuir el sesgo entre los resultados modelados y los medidos en cada receptor de estudio. Esto permite corregir las diferencias sistemáticas resultantes de la aplicación del modelo meteorológico y de dispersión atmosférica, reflejado en la aproximación a la realidad en variables tales como topografía, uso de suelo, turbulencia atmosférica o la propia estimación de emisiones fugitivas. Se destaca que esta metodología resulta válida siempre y cuando se trate de un valor promedio anual y no un análisis episódico (horario o diario), por lo tanto, es válido en el caso del presente estudio de arsénico dado que los riesgos a la salud de las personas están asociados a una exposición crónica y no aguda.

Al analizar el impacto que representa la emisión a la atmósfera de una tonelada de arsénico por tipo de fuente, de acuerdo con el FEC (ver Tabla 0-7), dependerá de las condiciones meteorológicas, topográficas, la ubicación de las estaciones respecto de las fuentes y las características de las fuentes fugitivas. Todos estos parámetros se resumen en ecuaciones matemáticas que explican la relación entre las concentraciones observadas y las emisiones de las fuentes.

**Tabla 0-7 Factores emisión concentración para localidades en dominio**

Dominio	Receptor	Localidad	Relación FEC
Chuquicamata	Estación CD 23 de marzo	Calama	$C_{Calama} = \frac{E_{PA3}}{9.589} + \frac{E_{PA4}}{9.3367} + \frac{E_{PAS}}{79.901} + \frac{E_{FUGITIVA}}{8.948} + 0,009$
	Estación Nueva Chiu Chiu	ChiuChiu	$C_{Chiu-chiu} = \frac{E_{PA3}}{94.475} + \frac{E_{PA4}}{91.182} + \frac{E_{PAS}}{7.418} + \frac{E_{FUGITIVA}}{128.604} + 0,0037$
Altonorte	Estación Coviefi	Antofagasta	$C_{Antofagasta} = \frac{E_{PAS1}}{32.381} + \frac{E_{PAS3}}{31.473} + \frac{E_{FUGITIVA}}{18.383} + 0,0014$
	Estación Inacal	La Negra	$C_{La Negra} = \frac{E_{PAS1}}{113.860} + \frac{E_{PAS3}}{117.110} + \frac{E_{FUGITIVA}}{4.576} + 0,0161$
Potrerillos	Estación Cine Inca	Salvador	$C_{Salvador} = \frac{E_{PAS}}{20.810} + \frac{E_{FUGITIVA}}{15.912} + 0,002$
	Estación CAP	Potrerillos	$C_{Potrerillos} = \frac{E_{PAS}}{5.578} + \frac{E_{FUGITIVA}}{2.038} + 0,0055$
Hernán Videla Lira	Estación Paipote	Copiapó	$C_{Copiapó} = \frac{E_{HLE}}{2.968} + \frac{E_{PTGC}}{2.683} + \frac{E_{FUGITIVA}}{349} + 0,0017$
	Estación Tierra Amarilla	Tierra Amarilla	$C_{Tierra Amarilla} = \frac{E_{HLE}}{694} + \frac{E_{PTGC}}{776} + \frac{E_{FUGITIVA}}{588} + 0,0028$
Ventanas	Estación Puchuncaví	Puchuncaví	$C_{Puchuncaví} = \frac{E_{HTE}}{5.597} + \frac{E_{PAS}}{4.482} + \frac{E_{FUGITIVA}}{5.660} + 0,0047$
	Estación Quintero	Quintero	$C_{Quintero} = \frac{E_{HTE}}{2.507} + \frac{E_{PAS}}{2.159} + \frac{E_{FUGITIVA}}{1.096} + 0,0047$
	Estación Ventanas	Ventanas	$C_{Ventanas} = \frac{E_{HTE}}{2.678} + \frac{E_{PAS}}{2.022} + \frac{E_{FUGITIVA}}{4.290} + 0,0024$
Chagres	Estación Lo Campo	Lo Campo	$C_{Lo Campo} = \frac{E_{PAS}}{1.259} + \frac{E_{HORNO}}{724} + \frac{E_{FUGITIVA}}{1.405} + 0,0094$
	Punto de interés Llayllay	Llayllay	$C_{Llayllay} = \frac{E_{PAS}}{2.699} + \frac{E_{HORNO}}{1.824} + \frac{E_{FUGITIVA}}{3.146} + 0,0094$
	Punto de interés Panquehue	Panquehue	$C_{Panquehue} = \frac{E_{PAS}}{598} + \frac{E_{HORNO}}{526} + \frac{E_{FUGITIVA}}{1.921} + 0,0094$
Caletones	Estación Coya Población	Coya	$C_{Coya} = \frac{E_{PLG1}}{41.338} + \frac{E_{PLG2}}{58.074} + \frac{E_{FUGITIVA}}{14.584} + 0,0018$

Fuente: Elaboración propia

### Antecedentes y propuesta de escenarios regulatorios de NPCA para arsénico

La propuesta de escenarios regulatorias de NPCA sigue un enfoque basado en el riesgo por exposición al Arsénico atmosférico. Dado que sus efectos comprobados se asocian a efectos crónicos, los escenarios propuestos siguen los lineamientos de las regulaciones internacionales estableciendo límites de concentración sobre los promedios anuales.

Internacionalmente, se observan diferentes regulaciones que buscan limitar las concentraciones atmosféricas de arsénico. Los valores límites usualmente consideran oscilan entre los 0,2 hasta los 24 ng/m<sup>3</sup>, con la mayor parte de los valores ubicándose en torno a 6 ng/m<sup>3</sup>. Al respecto, se hacen dos observaciones, 1) las regulaciones más estrictas no aplican a lugares que cuenten con fundiciones de cobre, y 2) las regulaciones que aplican a lugares con fundiciones de cobre consideran criterios de flexibilización. Para definir el valor de 6 ng/m<sup>3</sup> varias regulaciones hacen referencia a la regulación europea (Directiva 2004/107/CE). Vale destacar que dicha regulación no establece una NPCA, sino que el valor de 6 ng/m<sup>3</sup> corresponde a un valor objetivo, estableciendo un espacio de flexibilidad. Al respecto en su considerando número 5 se establece que:

*“Los valores objetivos no exigirán medidas que supongan costos desproporcionados. En lo que respecta a las instalaciones industriales, dichos valores no implicarán la adopción de medidas que vayan más allá de la aplicación de las mejores técnicas disponibles (BAT), tal como establece la Directiva 96/6/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación y, en particular, o conducirán al cierre de ninguna instalación. Ahora bien, exigirán que los Estados miembros adopten todas las medidas de reducción rentables necesarias en los sectores afectados” - Directiva 2004/107/CE*

Adicionalmente a lo anterior, se considera como antecedente las concentraciones actuales, especialmente en las zonas con fundiciones de cobre, y la relación estimada de emisiones y concentración. Considerando todo lo anterior, los escenarios normativos se diferencian sólo por el límite anual establecido, los cuales se relacionan con un determinado riesgo incremental *acceptable*. En particular los escenarios son:

- Escenario 2 en 10k (46,6): Escenario donde el riesgo incremental aceptado es equivalente a 2e-4, es decir, 2 casos en 10k durante toda la vida. Este escenario implica un riesgo incremental de cáncer similar al aceptado en las concentraciones de arsénico permitidas en el agua potable. Este riesgo incremental es equivalente a una concentración promedio anual de 46,6 ng/m<sup>3</sup> de arsénico en MP10, considerando el IUR de la US-EPA.
- Escenario 1 en 10k (23,3): Escenario donde el riesgo incremental aceptado es equivalente a 1e-4, es decir, 1 caso en 10k durante toda la vida. Este escenario implica un nivel de riesgo incremental similar a la parte alta del rango del riesgo aceptado normalmente en EE.UU. Este riesgo incremental es equivalente a una concentración promedio anual de 23,3 ng/m<sup>3</sup> de arsénico en MP10, considerando el IUR de la US-EPA.
- Escenario contribución limitada (15,0): Escenario de mayor ambición donde la contribución de las fundiciones es limitada. Para estimar el valor límite homogéneo se consideró que las contribuciones basales más altas están en torno a 9 ng/m<sup>3</sup>, sobre lo cual se consideró el valor objetivo de la normativa europea, alcanzando una concentración promedio anual permitida de 15 ng/m<sup>3</sup>. El resultado de esta norma, es que en aquellas zonas cuya contribución basal sea de 9 ng/m<sup>3</sup>, el aporte de las fuentes de emisión no pueda superar el valor objetivo europeo. Los 15 ng/m<sup>3</sup> representan un riesgo

incremental aceptado equivalente a  $6,7e-5$ , es decir, 0,67 casos en 10k durante toda la vida.

Cabe destacar que, dada la actual estimación de la contribución basal, niveles como el valor objetivo de la regulación europea, no serían alcanzables en localidades como Calama. La estimación basal presentada se basa en un análisis estadístico de las series de tiempo de concentraciones y puede ser complementada por otras técnicas que permitan afinar este valor. Asimismo, en los análisis exploratorios por medio de simulaciones se observó que escenarios más ambiciosos no podrían ser alcanzados en algunas regulaciones sin reducción de la producción de las fundiciones en más de 20%. Al respecto, como toda modelación, está sujeta a los supuestos e incertidumbres propias del modelo, sin embargo, los resultados son consistente con las observaciones realizadas.

### **Evaluación de costos y beneficios de escenarios regulatorios propuestos**

Para dar cumplimiento a los escenarios se identificaron conjuntos de medidas para cada fundición que implementadas de forma conjunta permitieran dar cumplimiento a los escenarios regulatorios propuestos. El criterio para la selección de las posibles medidas de mitigación fue la minimización del costo total de ellas. En este proceso se consideró los costos de inversión, operación y mantenimiento, costos por detención durante el proceso de instalación y de productividad reducida durante el tiempo de puesta en marcha.

Adicionalmente, además de tecnologías de mitigación, también se incluye la opción de que la fundición disminuyera su producción para dar cumplimiento a la propuesta de regulación, lo cual tiene el costo asociado a la producción perdida. Esta medida para dar cumplimiento, especialmente costosa de forma unitaria, es seleccionada cuando se tratan de diferencias muy pequeñas, por lo cual es más costo-eficiente reducir la producción levemente a instalar una nueva tecnología, o cuando la meta de reducción es tan ambiciosa que las medidas consideradas no alcanzar a dar cumplimiento.

Respecto a los beneficios, es posible que la implementación de las medidas, al no ser un ejercicio continuo, resulte en reducciones mayores a las estrictamente necesarias, las cuales son valorizadas según su impacto en la reducción de riesgo de cáncer de la población expuesta. De la misma forma, la implementación de las medidas también implica una reducción de otros contaminantes con efecto en la salud humana. En particular, se valorizan también los beneficios en salud por la reducción del riesgo de la población por mejora en los índices de MP2,5 asociadas a la implementación de las medidas. Vale destacar que, del total de beneficios estimados, la reducción de riesgo de mortalidad por reducción de las concentraciones de MP2,5 corresponde a cerca del 97% en todos los escenarios evaluados.

En vista de lo anterior, el resumen de los escenarios se presenta en la Tabla 0-8, donde se observa que de los escenarios evaluados sólo el escenario con un riesgo equivalente a 2 en 10 mil ( $46,6 \text{ ng/m}^3$ ), presenta beneficios superiores a los costos. Se observa también, que el escenario más

ambicioso tiene una relación B/C cercana a 0,04 la cual se ve impactada por la necesidad de reducir la producción para poder dar cumplimiento a la normativa.

**Tabla 0-8 Indicadores descriptivos de beneficios costos por escenarios, año de referencia**

Escenario	D Emisión [t/año]	Costos [UF/año]	D Cáncer [casos/año]	D Mortalidad [casos/año]	Beneficios [UF/año]	B/C
<b>Esc 2 en 10k (46,6)</b>	11	100.051	0,2	5,4	105.802	1,06
<b>Esc 1 en 10k (23,3)</b>	196	713.756	0,7	18,9	369.031	0,52
<b>Esc Cont Lim (15,0)</b>	266	11.542.409	0,8	22,6	441.151	0,04

D Emisión: Delta emisión o reducción de emisión; D Cáncer: Delta cáncer o reducción en los casos esperados de cáncer; D Mortalidad: Delta mortalidad o reducción de casos esperados de mortalidad prematura; B/C: Beneficios divididos por costos (adimensional).

Fuente: Elaboración propia

Al hacer un análisis por fundición, se observan realidades diferentes, observándose que en aquellas fundiciones que actualmente tienen implementadas mayor número de tecnologías de mitigación, los costos suelen ser mayores. Lo anterior tiene sentido económico, puesto que se ven obligadas a implementar medidas más costosas, mientras que las otras fundiciones tienen mayor flexibilidad para seleccionar medidas más costo-eficientes. Por otro lado, los beneficios guardan relación directamente con, por un lado, el tamaño de la población expuesta, como también con las condiciones de dispersión que se resumen en los factores emisión-concentración.

#### Otros productos desarrollados

Si bien, los resultados presentados en el presente estudio representan la mejor información disponible para el consultor, es esperable que en la medida que las fundiciones, principales emisores de arsénico, alcancen su operación en régimen puedan variar en alguna medida los resultados. Asimismo, la información disponible por el DS 28/2013 del MMA aumenta mes a mes, lo cual permite complementar la información base y generar conclusiones más robustas. De esta forma, es esperable que nuevos análisis se puedan realizar a futuro.

Por esta razón, junto con el informe, se entregan una serie de anexos en un documento aparte, junto con anexos digitales con las bases de datos, planillas, modelos y otros antecedentes relevantes. Todos estos documentos fueron desarrollados considerando que eventualmente podrían ser actualizados, para refinar, complementar y generar nuevos análisis.

# 1. Objetivos del estudio

De acuerdo con las bases técnicas de la licitación, los objetivos son:

## 1.1 Objetivo general

Proporcionar antecedentes para la elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire de Arsénico y también para la revisión de la Norma de Emisión para fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico, considerando un análisis técnico y económico, así como efectos en la salud y beneficios económicos asociados a reducciones de arsénico y otros contaminantes.

## 1.2 Objetivos específicos

**Objetivo Específico 1: Obtener antecedentes para Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico;** a través de:

- a. Analizar el comportamiento histórico de la concentración de arsénico en material particulado, según disponibilidad de información a nivel nacional, y realizar un diagnóstico de la calidad del aire por arsénico en material particulado.
- b. Revisar y compilar inventarios de emisión disponibles a nivel nacional para arsénico en material particulado, identificando las fuentes emisoras a lo largo del país.
- c. Recopilar y sistematizar estudios sobre efectos en salud y coeficientes de riesgo asociados a la exposición a concentraciones de arsénico en el aire, en sus diferentes formas, según sea necesario.
- d. Proponer una metodología y desarrollar los antecedentes necesarios que permita estimar relaciones entre emisión y concentración de arsénico en aire.
- e. Generar y recopilar los antecedentes técnico-económico para fundamentar, a lo menos, tres alternativas de propuestas regulatorias, para la elaboración de una norma primaria de calidad del aire para arsénico.
- f. Evaluar costo de la aplicación de las alternativas de propuestas regulatorias.

**Objetivo Específico 2: Revisión de la Norma de emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico;** a través de:

- a. Estimar la evolución y cambios en calidad del aire (gases y material particulado), desde el momento de dictación de la Norma de Fundiciones (D.S. 28 de 2013) hasta la actualidad, para las comunas aledañas a fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico.
- b. Analizar y describir el escenario nacional e internacional para Fundiciones de Cobre y fuentes emisoras de arsénico.
- c. Analizar la regulación internacional para emisiones al aire de Fundiciones de Cobre y fuentes emisoras de arsénico.
- d. Identificar las potenciales tecnologías de abatimiento para reducir las emisiones de gases y partículas (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, MP y arsénico) en fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico, en cada uno de los tipos de procesos (con y sin combustión), estimando los costos de inversión, operación y mantención.

- e. Estimar el potencial de reducción de emisiones para las actuales fuentes emisoras de arsénico.
- f. Resumir resultados de investigaciones científicas que aporten actualizaciones sobre efectos adversos a las personas o a los recursos naturales, y metodologías de medición de emisiones para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico.
- g. Elaborar al menos tres escenarios de actualización de la norma existente, con aplicación a nivel nacional, considerando lo solicitado por el reglamento para la dictación de normas de calidad ambiental y de emisión.

## 2. Comportamiento histórico de las concentraciones de Arsénico

En la presente sección se analiza la evolución de la concentración de arsénico en material particulado observada en los antecedentes disponibles de las estaciones de monitoreo de calidad del aire cercanas a fundiciones. En primer lugar, se describe las fuentes de información, para luego profundizar el detalle de los niveles de concentraciones históricas, a nivel de estación.

### 2.1 Coordinación con contraparte técnica

Con el objetivo de alinear las expectativas, acordar métodos y presentar avances, se acordó con la contraparte técnica una primera reunión el día 30 de agosto 2021. En esta reunión se discutieron algunos aspectos relacionados a la información provista en el marco del estudio. También se acuerda una segunda reunión con presencia de la SMA.

En la segunda reunión, realizada el 7 de septiembre 2021. El equipo consultor realiza una exposición sobre diferentes hallazgos realizados en la información revisada. La SMA entrega nuevos antecedentes para la consideración del consultor y compromete nuevos antecedentes complementarios.

### 2.2 Fuentes de información disponible

La información disponible que fue analizada corresponde a reportes de todas las estaciones de monitoreo de calidad del aire en las zonas donde se encuentran las fundiciones de cobre y otras fuentes de emisión de arsénico. En ellas se miden, entre otros contaminantes, MP10, MP2,5 y arsénico (As). Estas se detallan en la siguiente Tabla 2-1. Además, en esta tabla se indica si la estación de monitoreo cuenta con representatividad poblacional y para cuáles contaminantes. Las condiciones para considerar una estación de monitoreo como representativa para los contaminantes MP10 y MP2,5 se establecen en la Resolución Exenta N°744 de 2017 y la Resolución Exenta N°106 de 2013, de la Superintendencia del Medio Ambiente, respectivamente.

**Tabla 2-1 Descripción de fuentes y sus estaciones cercanas con medición de arsénico**

Zona, fuente principal	Región – Provincia	Cantidad estaciones	Nombre Estación	Representatividad poblacional
<b>Tocopilla, Termoeléctrica</b>	Antofagasta – Tocopilla	1	Super Site	MP10, MP2,5, SO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>2</sub>
<b>Chuquicamata, Fundición</b>	Antofagasta – El Loa	8	Aukahuasi	N/A
			C.P.V.K <sup>2</sup>	MP10, MP2,5
			CD 23 de Marzo <sup>3</sup>	MP10, MP2,5
			Centro	MP10, MP2,5
			Chiu-Chiu	N/A

<sup>2</sup> Colegio Pedro Vergara Keller, en adelante C.P.V.K.

<sup>3</sup> Centro deportivo 23 de marzo, en adelante CD 23 de Marzo

Zona, fuente principal	Región – Provincia	Cantidad estaciones	Nombre Estación	Representatividad poblacional
			Nueva Chiu-Chiu	MP10
			Hospital El Cobre	MP10, MP2,5, SO <sub>2</sub>
			Servicio Médico Legal	SO <sub>2</sub>
<b>Spence, Minera</b>	Antofagasta – Antofagasta	2	Sierra Gorda	MP10
			Spence	S/I
<b>Andina, Termoeléctrica</b>	Antofagasta – Antofagasta	3	Ferrocarril	MP10, SO <sub>2</sub>
<b>Mejillones, Termoeléctrica</b>	Antofagasta – Antofagasta		J.J. Latorre	N/A
			Subestación Eléctrica	N/A
<b>Altonorte, Fundición (ver Nota 1)</b>	Antofagasta – Antofagasta	4	Coviefi	MP10, SO <sub>2</sub>
			La Negra-Altonorte	S/I
			La Negra-Inacal	S/I
			Sur	N/A
<b>Potreros, Fundición</b>	Atacama – Chañaral	4	CAP	N/A
			Cine Inca*	N/A
			Doña Inés	N/A
			Intelec*	N/A
<b>Hernán Videla Lira, Fundición</b>	Atacama – Copiapó	4	Copiapó	MP10, MP2,5, SO <sub>2</sub>
			Paipote	MP10, SO <sub>2</sub>
			San Fernando	MP10, SO <sub>2</sub>
			Tierra Amarilla	MP10, SO <sub>2</sub>
<b>Ventanas, Fundición</b>	Valparaíso – Valparaíso	8	La Greda	MP10, MP2,5, SO <sub>2</sub>
			Los Maitenes	MP10, MP2,5, SO <sub>2</sub>
			Puchuncaví	MP10, MP2,5, SO <sub>2</sub>
			Quintero	MP10, MP2,5, SO <sub>2</sub>
			Quintero Centro*	MP10, SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , CO, O <sub>3</sub> , Pb
			Sur	N/A
			Valle Alegre	MP10, MP2,5, SO <sub>2</sub>
			Ventanas*	N/A
<b>ENAP Aconcagua, Refinería</b>	Valparaíso - Valparaíso	4	Colmo	MP10, SO <sub>2</sub>
			Concón	MP10, MP2,5, SO <sub>2</sub>
			Junta de Vecinos	MP10, SO <sub>2</sub>
			Las Gaviotas	SO <sub>2</sub>
<b>Santiago, Ciudad</b>	Metropolitana - Santiago	1	Parque O'Higgins	MP10, SO <sub>2</sub> , CO, O <sub>3</sub>
<b>Chagres, Fundición</b>	Valparaíso – San Felipe de Aconcagua	2	Catemu	MP10
			Lo Campo	MP10, SO <sub>2</sub>
<b>Caletones, Fundición</b>	O'Higgins – Cachapoal	3	Coya Club	N/A
			Coya Población	MP10, SO <sub>2</sub>
			Sewell	N/A
<b>Temuco, Ciudad</b>	La Araucanía – Cautín	2	Las Encinas	MP2,5
			Padre Las Casas	S/I

Nota 1: Antecedentes de mediciones de la estación La Negra de Altonorte también se obtienen bajo el nombre de estación Norte, que en adelante se tratará bajo el nombre La Negra-Altonorte. Empresa Incesa tiene otra estación llamada La Negra, que se denominará La Negra-Inacal. Ambas dejaron de ser representativas el presente año. Sin embargo, los datos analizados a continuación fueron medidos durante el período en que dichas estaciones eran representativas para los contaminantes MP10 y SO<sub>2</sub>.

Nota 2: Las estaciones marcadas con \* consideran la representatividad informada en el SINCA, ya que no se encontró información de otra fuente

Nota 3: N/A indica que la estación no tiene representatividad poblacional para ningún contaminante.

Nota 4: S/I indica que no se dispone de información de representatividad para esa estación

Fuente: Elaboración propia

Para estas zonas la cantidad de datos de medición de arsénico disponibles es variable, tanto entre estaciones como por año. En la Tabla 2-2 se presenta la cantidad de datos numéricos<sup>4</sup> disponibles de medición de arsénico en MP, desde 2012 a 2020. Se puede observar que hay escasos antecedentes de medición de arsénico disponibles para el periodo previo a 2014. Lo anterior coincide con la publicación del D.S. N°28, de 2013, del Ministerio del Medio Ambiente, en diciembre de 2013, que establece la norma de emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico. A partir de la publicación de dicha norma se ha avanzado en la estandarización y sistematización de la información relativa a las concentraciones atmosféricas de arsénico, lo cual ha resultado en un aumento relevante en la disponibilidad de información.

Respecto a mayores detalles metodológicos asociados al monitoreo, en la Sección 2.4.1 se presenta la metodología utilizada para el análisis de As en MP10 y el laboratorio a cargo de dicho análisis.

---

<sup>4</sup> Es decir, donde se cuenta con un valor numérico de medición. Existen mediciones que no reportan valores numéricos, lo que se puede deber a valores menores al límite de detección del instrumento, datos declarados inválidos por distintos motivos (por ejemplo, falla de energía, falla del equipo, mantención del equipo, valor fuera de rango, etc.) o simplemente declarados nulos.

**Tabla 2-2 Cantidad de datos disponibles de As en MP10 sin errores de concentración de As, por estación de cada zona**

Fuente principal	Estación	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Tocopilla	Super Site													3	36	35	21	35	26	12	
	Escuela E-10											36	36	33							
Chuquicamata*	Aukahuasi											116	114	118	117	111	120	109	104	37	
	C.P.V.K											95	104	107	88	110	117	102	118	35	
	CD 23 de Marzo											88	70	78	93	110	119	118	121	40	
	Centro											78	83	111	110	117	121	116	120	40	
	Hospital El Cobre	121	121	120	99	85	91	79	90	81	81	75	80	85	112	120	122	117	121	40	
	Chiu-Chiu						66	93	67	68	71	116	119	117	116	122	121	14			
	Nueva Chiu-Chiu																		85	117	39
Servicio Médico Legal						76	95	112	102	96	99	97	10	108	119	119	115				
Spence	Sierra Gorda										8	18	24	18	10	17	11	7	13	3	
	Spence										8	15	15	11	13	14	10	13	11	3	
Mejillones	Ferrocarril													20	60	58	60	60	54	25	
Andina	J.J. Latorre													17	49	45	47	48	43	20	
	Subestación Eléctrica													17	50	47	47	48	42	20	
Altonorte*	Coviefi									122	110	110	99	92	119	100	101	104	93		
	La Negra-Altonorte								122	121	122	122	111	118	119	113	45				
	La Negra-Inacal								119	103	105	104	122	120	107	107	108	109	110	42	
	Sur								119	115	103	121	116	120	118	115	116	116	96		
Potrerillos*	CAP									24	24	24	24	24	24	24	24	22	23		
	Cine Inca											18	20	19	24	15	17	20	22		
	Doña Inés									24	22	22	22	22	22	24	22	22	18		
	Intelec												1	2	1						
Hernán Videla Lira*	Copiapó								115	97	121	107	119	121	114	149	83	103	121		
	Paipote								117	107	121	120	121	127	121	165	116	116	119		
	San Fernando								113	107	122	119	119	132	112		16	112	120		
	Tierra Amarilla								117	107	119	118	122	133	122	168	120	120	122		
Ventanas*	La Greda										9	107	119	117	120	117	120	120	121	11	
	Los Maitenes										10	107	118	118	121	122	118	119	119	10	
	Puchuncaví										9	107	122	118	120	121	119	118	119	10	
	Quintero										9	103	112	108	115	116	101	115	110	8	
	Quintero Centro																	12	12	9	
	Sur										10	106	116	114	118	115	117	116	118	10	
	Valle Alegre										10	105	119	113	118	117	113	118	119	11	
	Ventanas											70	116	113	121	121	113	119	120	11	
Refinería ENAP Aconcagua	Colmo									2	22	23	21	20	24	19	24	22	24	20	
	Concón									2	21	22	20	17	23	23	24	24	24	20	

Fuente principal	Estación	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
	Junta de Vecinos									2	22	23	17	19	22	21	23	24	24	20
	Las Gaviotas									2	21	24	22	19	24	21	24	24	24	20
<b>Chagres*</b>	Catemu												4	4	4	4	8	12	12	
	Lo Campo												4	4	4	4	8	12	11	
<b>Caletones*</b>	Coya Club												12	12	27	48	46	47	47	46
	Coya Población												12	12	57	113	107	105	108	110
	Sewell												12	12	24	50	48	45	48	46

Nota 1: Todas las zonas marcadas con \* corresponden a zonas con fundiciones de cobre.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados por contraparte

A modo informativo, en la Tabla 2-3 se presenta el detalle de los datos documentados sin valor numérico. En total son 2.866 datos reportados sin valor por distintos motivos, donde los principales son valores inferiores al límite de detección (47%), datos inválidos<sup>5</sup> (30%), y el resto son reportados como nulos sin indicar el motivo. Algunos motivos por los que se pueden declarar datos sin valor numérico son datos inválidos por falla de energía, datos inválidos por falla de equipo, sin dato por precipitación, etc. Cabe destacar que los 2.866 datos disponibles sin valor numérico representan el 9,24% de los datos disponibles totales.

---

<sup>5</sup> De acuerdo a la normativa establecida en el D.S. N°61/2008 del MINSAL

**Tabla 2-3 Resumen de los valores disponibles de As en MP10 documentados sin valor numérico, sistematizados como errores en la base de datos compilada**

Fuente principal	Estación	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>Tocopilla</b>	Super Site														1	15	1	4	
<b>Chuquicamata*</b>	Aukahuasi										6	8	3	5	11	5	12	18	3
	C.P.V.K										27	18	14	34	12	8	9	4	5
	CD 23 de Marzo										33	52	13	29	12	6	3	1	
	Centro										44	39	10	12	5	4	5	2	
	Hospital El Cobre	1	1	23	36	28	43	32	40	40	47	42	6	10	2	3	4	1	
	Chiu-Chiu					15	26	55	53	51	5	3	4	6		4	5		
	Nueva Chiu-Chiu																6	5	1
	Servicio Médico Legal						2	27	10	19	26	23	25		14	3	6	6	
<b>Spence</b>	Sierra Gorda										6		6	14	7	13	17	11	11
	Spence										9	9	5	11	10	14	11	13	11
<b>Mejillones</b>	Ferrocarril														2			6	
<b>Andina</b>	J.J. Latorre														4	1		5	
	Subestación Eléctrica														2	1		6	
<b>Altonorte*</b>	Coviefi									1	2	17	27	3	21	21	16	17	
	La Negra-Altonorte								1		1	10	9	3	9	7			
	La Negra-Inacal							4	20	18	19	1	3	16	22	14	13	7	9
	Sur							1	7	19	1	4	2	4	6	6	6	14	
<b>Potreros*</b>	Cine Inca									2	6	4	5		1	3	2		
	Doña Inés									2									
	Intelec									2	24	23	20	23	16				
<b>Hernán Videla Lira*</b>	Copiapó							7	5	1	4	3	23	8	23	38	18	1	
	Paipote							5	5	1	1	1	8	2	7	5	5	3	
	San Fernando							9	5		2	3	6	10	172	105	9	2	
	Tierra Amarilla							5	5	3	3		8		4	1	1		
<b>Ventanas*</b>	La Greda									1	4	3	4	2	5	2	1	1	
	Los Maitenes										2	4	3	1		4	2	3	1
	Puchuncaví									1	4		3	2	1	3	3	3	1
	Quintero									1	8	10	13	7	6	21	6	12	3
	Sur										5	6	7	4	7	5	5	4	1
	Valle Alegre										5	3	8	4	5	9	3	3	
	Ventanas											6	8	1	1	9	2	2	
<b>Refinería ENAP Aconcagua</b>	Colmo									2	1	3	2		3				
	Concón									3		4	5	1	1				
	Junta de Vecinos									2	1	3	3	2	3				
	Las Gaviotas									3		2	3		3				

Fuente principal	Estación	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
<b>Chagres*</b>	Lo Campo																		1	
<b>Caletones*</b>	Coya Club															2	1	1	2	
	Coya Población													1	3	13	16	14	12	
	Sewell																2		1	

Nota 1: Todas las zonas marcadas con \* corresponden a zonas con fundiciones de cobre

Nota 2: Estación Escuela E-10 de la Termoeléctrica Tocopilla, estación CAP de la fundición Potrerillos, estación Quintero Centro de la fundición Ventanas y estación Catemu de fundición Chagres no presentan este tipo de errores en sus mediciones.

Fuente: Elaboración propia en base a información provista por contraparte técnica

### 2.2.1 Consolidación de base de datos con información sistematizada

Los antecedentes disponibles de medición de concentraciones de arsénico y otros contaminantes regulados fueron sistematizados en una base de datos única. Los campos utilizados en esta base de datos se describen en la Tabla 2-4.

**Tabla 2-4 Campos de la base de datos de sistematización de concentraciones medidas**

Campo BD	Descripción
<b>Origen_informacion</b>	Indica la carpeta de origen de la información dentro de la carpeta compartida por la contraparte técnica o bien a partir del SINCA
<b>Informe</b>	Indica el documento del cual se obtuvieron los datos.
<b>Fuente</b>	Fundición emisora de los contaminantes evaluados.
<b>Estacion</b>	Estación de monitoreo de calidad del aire de la fuente emisora.
<b>Forma_medicion</b>	Indica si la medición es discreta o continua.
<b>Contaminante</b>	Indica el contaminante medido. Los contaminantes sistematizados son As en MP10, MP10, MP2,5, NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> y As en MP2,5.
<b>Detalle</b>	Indica si la concentración medida es promedio, máxima, o directa, según los términos utilizados en los reportes.
<b>Tipo</b>	Indica si es mensual, diaria, horaria, cada 5 minutos o por minuto.
<b>Hora</b>	Hora de la medición, si aplica.
<b>Fecha</b>	Fecha de la medición.
<b>Dia</b>	Día de la medición.
<b>Mes</b>	Mes de la medición.
<b>Ano</b>	Año de la medición.
<b>Valor_documento</b>	Valor indicado en el reporte, incluyendo valores no numéricos (errores, datos no válidos)
<b>Valor_numerico</b>	Valor numérico indicado en los reportes. Toma valor cero si el valor del documento tiene algún error.
<b>Error</b>	Indica el valor no numérico reportado en el reporte si es un error o no válido, y toma el valor "Sin error" para todos los valores numéricos reportados.
<b>Justificacion_error</b>	Describe la justificación del error, en caso de que se indique el motivo en el informe del cual se obtuvieron los datos.
<b>ID_Filtro</b>	Identificador del filtro, si la información estaba disponible.
<b>Unidad</b>	Unidad de medida de la concentración medida.
<b>ID_Fuente_Estacion</b>	Identificador que concatena la fuente con la estación.
<b>Estacion_editada</b>	Nombre unificado de las estaciones, por ejemplo, para el caso de las estaciones La Negra y Chiu-Chiu cuyas mediciones se han reportado bajo distintos nombres de estación.
<b>Valor_numerico_corregido</b>	En los casos en que el SO <sub>2</sub> fue reportado en la unidad de medida ppb, se realiza una transformación a µg/m <sup>3</sup> utilizando el peso molar del SO <sub>2</sub> .
<b>Unidad_corregida</b>	En los casos en que el SO <sub>2</sub> fue reportado en la unidad de medida ppb, se realiza una transformación a µg/m <sup>3</sup> utilizando el peso molar del SO <sub>2</sub> y la unidad registrada en la columna Unidad pasa a ser µg/m <sup>3</sup>
<b>Tipo de información</b>	Para la información proveniente del SINCA se indica si los registros son validados, preliminares o no validados. La demás información se indica como proporcionada por la contraparte técnica.

Fuente: Elaboración propia

La base de datos sistematizada se entrega como anexo digital en la carpeta “**Anexo A: Calidad del Aire**” en el documento “**NORMAAS-BD\_concentraciones.xlsx**”. En esta planilla también se incorpora una hoja “Léeme” que describe los campos indicados en la Tabla 2-4, una hoja con los estadígrafos de la concentración de As en MP10, y una con algunas características descriptivas de las estaciones.

## 2.3 Concentraciones históricas de arsénico

En la presente subsección se describe la evolución de las concentraciones históricas de arsénico medidas en MP10 en las estaciones de monitoreo descritas en la Sección 2.2. Además, se incorpora el análisis de la respectiva evolución de As en MP2,5 en los casos en que se dispone de datos pertinentes (específicamente en las zonas de las fundiciones Chuquicamata y Ventanas, además de en los alrededores de las termoeléctricas Andina y Mejillones y en las estaciones de las ciudades de Santiago y Temuco). En la Sección 2.4.1 se presentan las metodologías de análisis de material particulado y arsénico utilizadas para medir las concentraciones en los filtros de las distintas estaciones.

### 2.3.1 Diagnóstico a nivel nacional

En la presente subsección se presenta un diagnóstico de la calidad del aire por arsénico a nivel nacional, con énfasis en ciudades aledañas a las siete fundiciones de cobre localizadas en las regiones de Antofagasta, Atacama, Valparaíso y O’Higgins.

En la siguiente Figura 2-1 se presenta un mapa con las concentraciones medianas para 2020 de las estaciones que miden arsénico a lo largo del país y en la Tabla 2-5 se presenta un resumen de las concentraciones de arsénico en MP10 por estación en el año 2020.

Se observa que, para los años seleccionados, las mayores concentraciones medianas se encuentran en las cercanías a la fundición Caletones, cercana a Rancagua y de la fundición Altonorte, cercana a Antofagasta, con medianas sobre 60 [ng/m<sup>3</sup>N], siendo las estaciones con mayores concentraciones Sur en el caso de Altonorte y Sewell en el caso de Caletones. Se debe tener en cuenta que ambas estaciones se encuentran cercanas a las respectivas fundiciones, con sólo 1,4 y 6,8 kilómetros respectivamente de distancia, y que en general el viento proviene desde la dirección de las fundiciones (la mayor parte del tiempo en la estación Sur – ver Anexo de la Sección 10.3.7 – y alrededor de un 30% del tiempo en la estación Sewell – ver Anexo de la Sección 10.4.2). Se debe considerar también que ninguna de las dos es estación representativa de MP10.

Le siguen las concentraciones observadas en la cercanía a la fundición Chuquicamata, con medianas entre 45 y 60 [ng/m<sup>3</sup>N] en Calama, en donde las mayores concentraciones de arsénico se registran en las estaciones Aukahuasi, estación próxima a la fundición, y CD 23 de Marzo, ubicada en la ciudad de Calama. Luego, siguen las concentraciones medidas en la región de Valparaíso, con medianas entre 30 y 45 [ng/m<sup>3</sup>N], dominadas por las concentraciones de arsénico medidas en las estaciones Quintero, Quintero Centro y Los Maitenes.

Por otra parte, en las cercanías de Hernán Videla Lira y Potrerillos la mediana se encuentra en el orden de 15 a 30 [ng/m<sup>3</sup>N]. Las mayores concentraciones de arsénico se observan en las estaciones Tierra Amarilla y Paipote en el caso de Hernán Videla Lira y en la estación CAP<sup>6</sup> en el caso de Potrerillos.

En cuanto a las localidades cercanas a la fundición Chagres, las concentraciones medianas no superan los 15 [ng/m<sup>3</sup>N].

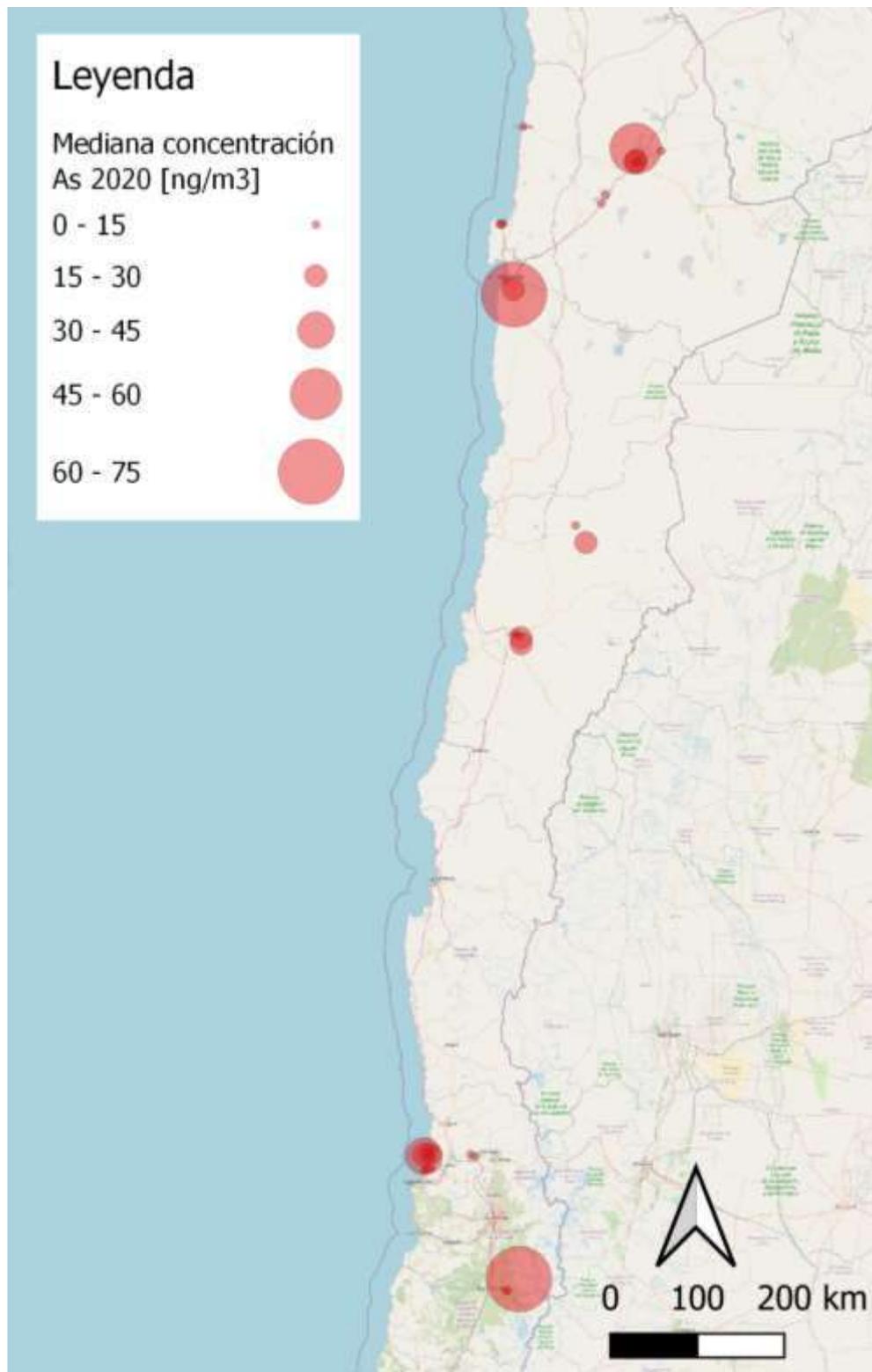
Respecto a las zonas que no cuentan con fundiciones de cobre, las termoeléctricas Andina, Mejillones y Tocopilla presentan las menores medianas, las que se corresponden a 1 [ng/m<sup>3</sup>N]. Estos valores son seguidos por los de las estaciones asociadas a la refinería ENAP, cuyas medianas se encuentran en el orden de 3 a 4 [ng/m<sup>3</sup>N]. Por último, se encuentran las concentraciones medidas por las estaciones asociadas a la minera Spence, cuyas medianas corresponden a 10 [ng/m<sup>3</sup>N].

Por último, la estación Parque O'Higgins, ubicada en Santiago y las estaciones Las Encinas y Padre Las Casas, ubicadas Temuco, únicamente miden MP<sub>2,5</sub>, por lo que sólo se dispone de información de As en MP<sub>2,5</sub>. La mediana de estas estaciones corresponde a 0 [ng/m<sup>3</sup>N].

En la siguiente sección se profundizan los resultados de las mediciones de cada estación, agrupadas según su cercanía a las fuentes emisoras, principalmente fundiciones de cobre, termoeléctricas y refinerías.

---

<sup>6</sup> Sin considerar la estación Doña Inés, cuyas concentraciones medidas están en un orden de magnitud mayor debido a que la estación se encuentra ubicada en la fundición misma, y la estación Intelec, cuyas mediciones más recientes son en el año 2016. Se debe tener en cuenta además que ninguna de estas dos estaciones es representativa de ningún contaminante.



(\*) No se incluyen los valores de Doña Inés, debido a que los valores tienen un orden de magnitud mayor.

**Figura 2-1 Mapa valores mediana concentración As en MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], año 2020, nacional**  
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-5 Resumen concentraciones de arsénico en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] por estación en el año 2020**

Zona, Fuente principal	Región – Provincia	Nombre Estación	Representatividad poblacional MP10	Número de datos	Promedio	Mediana	Máxima
<b>Tocopilla, Termoeléctrica</b>	Antofagasta – Tocopilla	Super Site	Sí	26	2	1	6
<b>Chuquicamata, Fundición</b>	Antofagasta – El Loa	Aukahuasi	No	102	72	50	483
		C.P.V.K	No	118	21	16	179
		CD 23 de Marzo	Sí	118	29	23	664
		Centro	Sí	117	7	6	26
		Nueva Chiu-Chiu	No	117	5	4	23
		Hospital El Cobre	Sí	121	6	5	23
		Servicio Médico Legal <sup>b</sup>	No	114	14	12	46
<b>Spence, Minera</b>	Antofagasta – Antofagasta	Sierra Gorda	Sí	13	10	10	18
		Spence	S/I <sup>h</sup>	11	10	10	15
<b>Andina, Termoeléctrica</b>	Antofagasta – Antofagasta	Ferrocarril	Sí	54	2	1	9
<b>Mejillones, Termoeléctrica</b>	Antofagasta – Antofagasta	J.J. Latorre	No	43	3	1	12
		Subestación Eléctrica	No	42	3	1	11
<b>Altonorte, Fundición</b>	Antofagasta – Antofagasta	Coviefi	Sí	93	8	5	39
		La Negra-Altonorte <sup>c</sup>	No	45	20	14	98
		La Negra-Inacal	No	110	42	28	199
		Sur	No	95	103	70	455
<b>Potreriillos, Fundición</b>	Atacama – Chañaral	CAP	No	23	30	25	118
		Cine Inca <sup>a</sup>	No	22	5	2	35
		Doña Inés	No	18	1.056	551	10.070
		Intelec <sup>a d</sup>	No	1	53	53	53
<b>Hernán Videla Lira, Fundición</b>	Atacama – Copiapó	Copiapó	Sí	120	19	8	167
		Paipote	Sí	119	54	20	559
		San Fernando	Sí	120	24	10	150
		Tierra Amarilla	Sí	122	34	23	227
<b>Ventanas, Fundición</b>	Valparaíso – Valparaíso	La Greda	Sí	121	14	7	71
		Los Maitenes	Sí	119	30	19	182
		Puchuncaví	Sí	119	14	8	92
		Quintero	Sí	110	50	20	321
		Quintero Centro <sup>a</sup>	Sí	12	57	43	166

Zona, Fuente principal	Región – Provincia	Nombre Estación	Representatividad poblacional MP10	Número de datos	Promedio	Mediana	Máxima
		Sur	No	118	22	10	245
		Valle Alegre	Sí	119	12	9	74
		Ventanas <sup>a</sup>	No	120	14	8	111
<b>ENAP Aconcagua, Refinería</b>	Valparaíso – Valparaíso	Colmo	Sí	23	3	4	8
		Concón	Sí	24	3	3	11
		Junta de Vecinos	Sí	24	3	3	8
		Las Gaviotas	No	24	4	4	9
<b>Santiago</b>	Metropolitana – Santiago	Parque O’Higgins <sup>e f</sup>	Sí	80	1	0	10
<b>Chagres, Fundición</b>	Valparaíso – San Felipe de Aconcagua	Catemu	Sí	12	10	8	20
		Lo Campo	Sí	11	16	11	31
<b>Caletones, Fundición</b>	O’Higgins – Cachapoal	Coya Club	No	47	10	5	42
		Coya Población	Sí	108	6	3	46
		Sewell	No	48	67	64	171
<b>Temuco</b>	La Araucanía – Cautín	Las Encinas <sup>e g</sup>	Sí	64	0	0	7
		Padre Las Casas <sup>e g</sup>	S/I <sup>h</sup>	61	1	0	31

- Cine Inca, Intelec, Ventanas y Quintero Centro utilizan la representatividad indicada en el SINCA, ya que no se encontró información proveniente de otra fuente.
- Para la estación Servicio Médico Legal se presenta información del año 2019 ya que este es el último año en el que dispone de información.
- Para la estación La Negra-Altonorte se presenta información del año 2018 ya que este es el último año en el que dispone de información.
- Para la estación Intelec se presenta información del año 2016 ya que es el último año en el que dispone de información.
- Las estaciones Parque O’Higgins, Las Encinas y Padre Las Casas miden solamente MP2,5, por lo que se presentan las mediciones de As en MP2,5.
- Para la estación Parque O’Higgins se presenta información del año 2018 ya que este es el último año en el que dispone de información.
- Para las estaciones Las Encinas y Padre Las Casas se presenta información del año 2019 ya que este es el último año en el que disponen de información.
- Sin información.

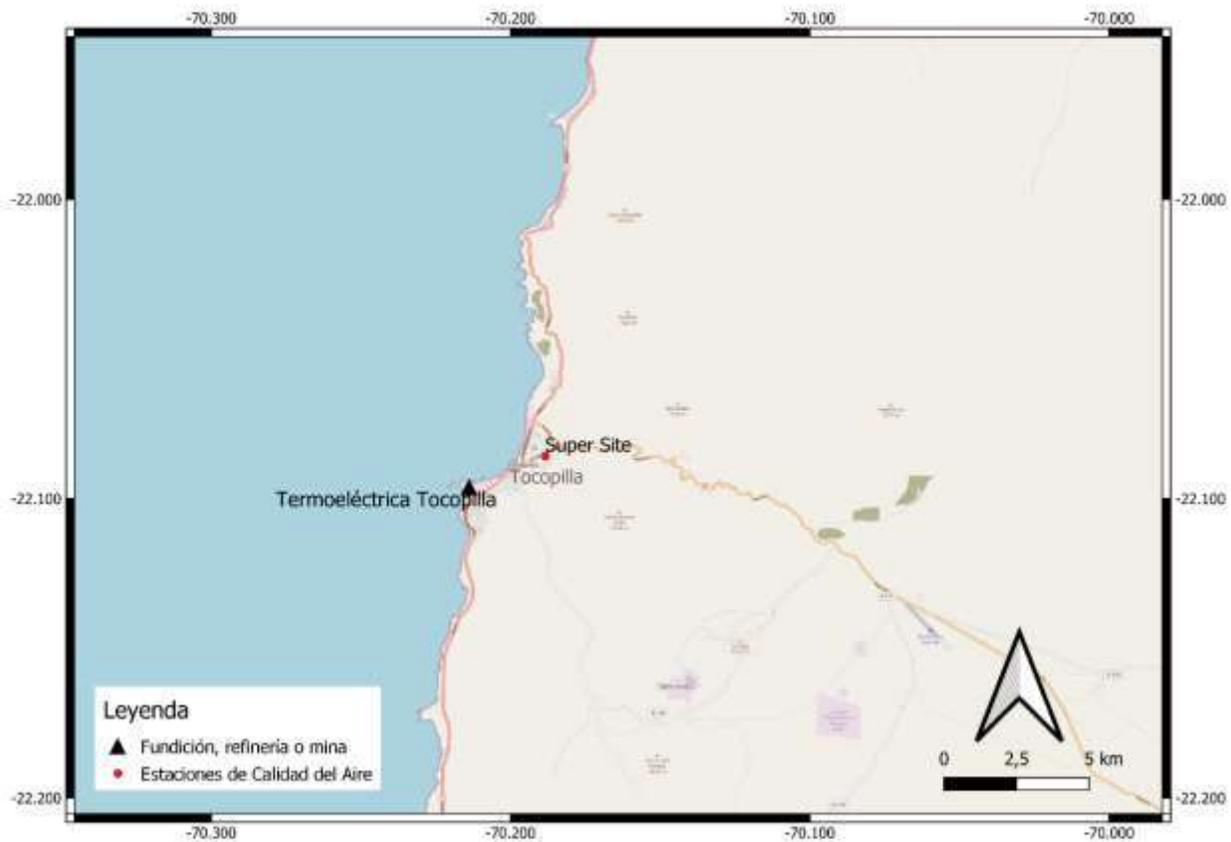
Fuente: Elaboración propia

### 2.3.2 Análisis longitudinal de As en MP10 por estaciones

A continuación, se describe la evolución en el tiempo de las concentraciones de arsénico medidas en cada fundición, con detalles por estación, tanto como concentraciones de arsénico en sí como la fracción de arsénico sobre el MP10. Junto con esto, también se presentan los perfiles anuales de concentración de As en MP10 para las estaciones con mayor cantidad de observaciones.

#### 2.3.2.1 Estaciones cercanas a termoeléctrica Tocopilla

En la Figura 2-2 se muestra la ubicación de la termoeléctrica Tocopilla, donde se observa su ubicación respecto a la ciudad de Tocopilla, donde se encuentra la estación Super Site, 2,9 km al noreste de la termoeléctrica. Esta estación antiguamente se denominaba “Escuela E-10” y fue reubicada a finales del año 2015 aproximadamente 50 metros hacia el oriente, cambiando su nombre a “Super Site”. La presentación de los datos a continuación se realiza por separado para la antigua estación “Escuela E-10” y para la estación “Super Site”.

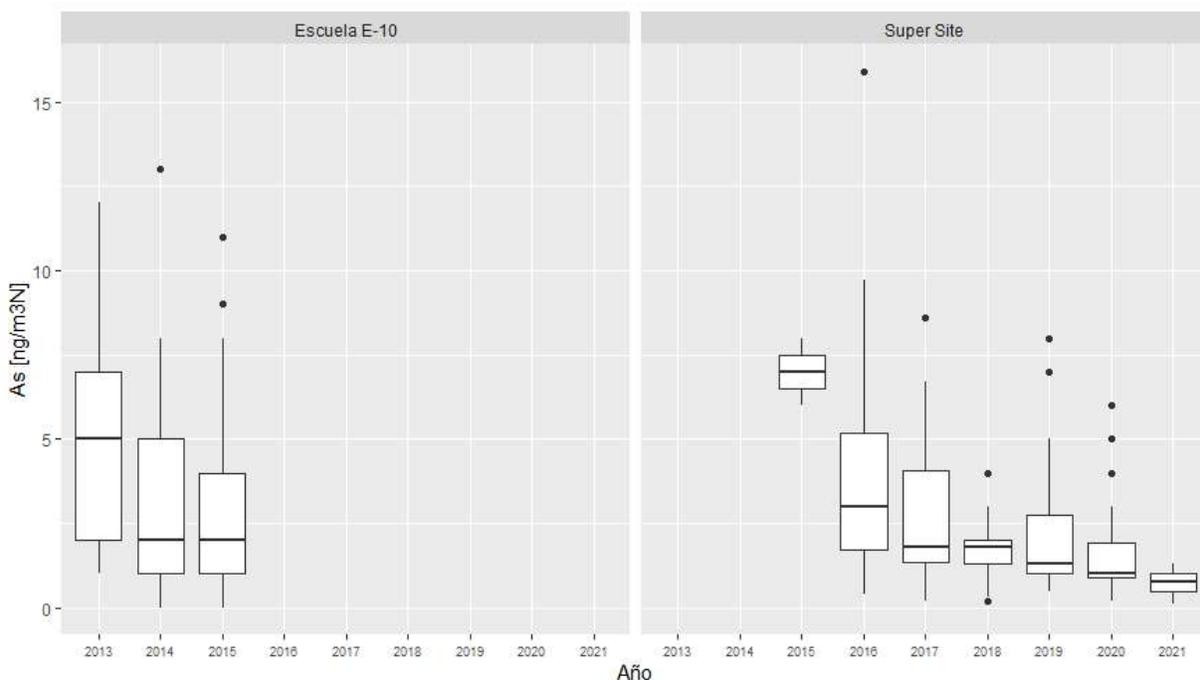


**Figura 2-2 Mapa termoeléctrica Tocopilla, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas**

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

En la Figura 2-3 se presenta la evolución de la concentración de As en MP10 medida en la antigua estación Escuela E-10 y en la actual Super Site, y los estadígrafos de ambas se resumen en la Tabla 2-6 y Tabla 2-7<sup>7</sup>. Se observa una tendencia a la disminución de las concentraciones, tanto en las medianas como en los valores máximos observados, con concentraciones medianas en el rango de 1 a 5 [ng/m<sup>3</sup>N] en todo el periodo. La única excepción corresponde a la concentración mediana del año 2015 en Super Site, sin embargo, se destaca que solo se registran 3 mediciones a fines de diciembre de dicho año. La disminución de las concentraciones entre el año 2019 y 2020 puede tener un origen en la desconexión de las unidades 12 y 13 de Engie Chile (termoeléctricas a carbón).

Cabe destacar que, en comparación con otras zonas, se observa una baja cantidad de mediciones para esta estación, las cuales se realizan tres veces al mes. Adicionalmente, en los años 2018, 2020 y 2021 no se dispone de información para todos los meses.



**Figura 2-3 Concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías termoeléctrica Tocopilla, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

<sup>7</sup> Para realizar la separación de los datos, se consideró que la estación Escuela E-10 realizó muestreos hasta el día 17 de noviembre de 2015. Luego esta estación fue reubicada, cambiando su nombre a Super Site y empezando a hacer muestreos el día 7 de diciembre de 2015. Cabe destacar que, a partir de la Resolución Exenta N°1413, de fecha 8 de octubre de 2019 de la Superintendencia del Medio Ambiente, los datos medidos de MP10 de la estación Super Site son válidos desde el 18 de diciembre de 2015. En el análisis de las concentraciones de la estación Super Site se incluye el valor de concentración de As medido el 17 de diciembre de 2015, a pesar de que los datos aún no estaban declarados como representativos de MP10.

**Tabla 2-6 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías termoeléctrica Tocopilla, estación Escuela E-10**

Año	2013	2014	2015
<b>N</b>	36	36	33
<b>Max.</b>	12	13	11
<b>3rd Qu.</b>	7	5	4
<b>Mediana</b>	5	2	2
<b>Media</b>	5	3	3
<b>1st Qu.</b>	2	1	1
<b>Min.</b>	1	0	0

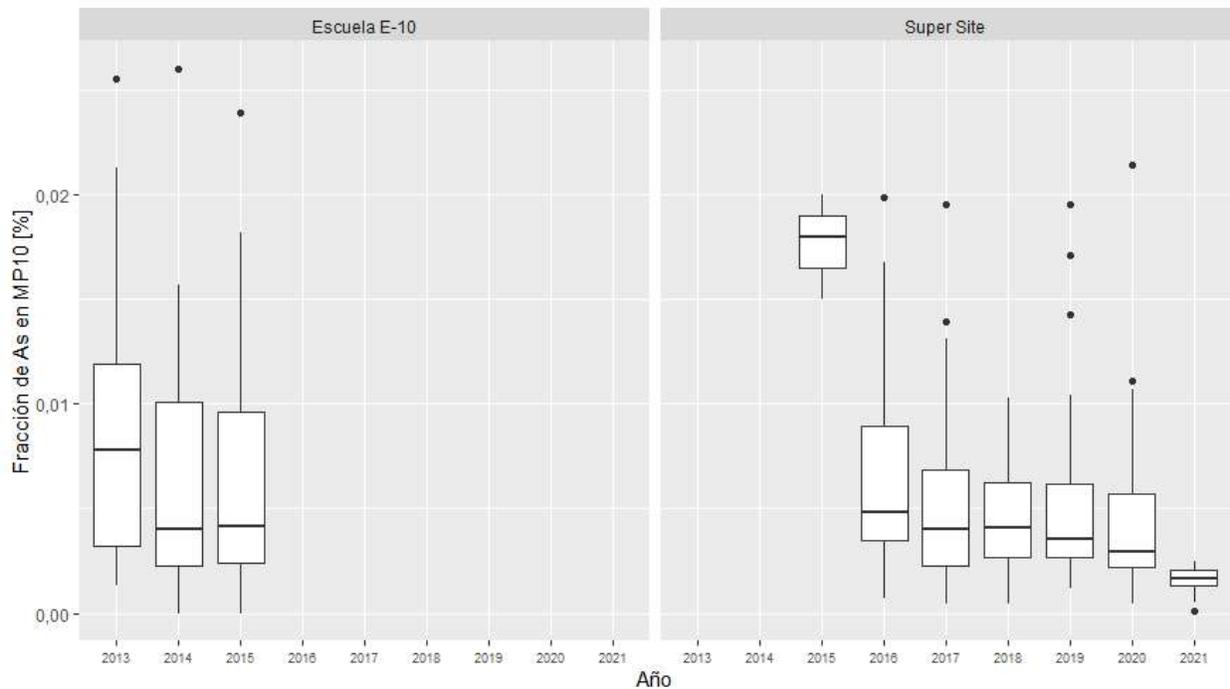
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-7 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías termoeléctrica Tocopilla, estación Super Site**

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	3	36	35	21	35	26	12
<b>Max.</b>	8	16	9	4	8	6	1
<b>3rd Qu.</b>	8	5	4	2	3	2	1
<b>Mediana</b>	7	3	2	2	1	1	1
<b>Media</b>	7	4	3	2	2	2	1
<b>1st Qu.</b>	7	2	1	1	1	1	1
<b>Min.</b>	6	0	0	0	1	0	0

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en la Figura 2-4 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas mediante el muestreo. Se observa que las fracciones de arsénico en MP10 han tendido a disminuir levemente a través del tiempo, estabilizándose en los últimos años. Los estadígrafos se presentan en la Tabla 2-8 y Tabla 2-9, observándose que para el año 2020 la mediana de la fracción era de 0,003%.


**Figura 2-4 Fracción de As en MP10 [%] cercanías Termoeléctrica Tocopilla, estación Super Site**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-8 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías Termoeléctrica Tocopilla, estación Escuela E-10**

Año	2013	2014	2015
<b>N</b>	36	36	33
<b>Max.</b>	0,026	0,026	0,024
<b>3rd Qu.</b>	0,012	0,010	0,010
<b>Mediana</b>	0,008	0,004	0,004
<b>Media</b>	0,008	0,006	0,006
<b>1st Qu.</b>	0,003	0,002	0,002
<b>Min.</b>	0,001	0,000	0,000

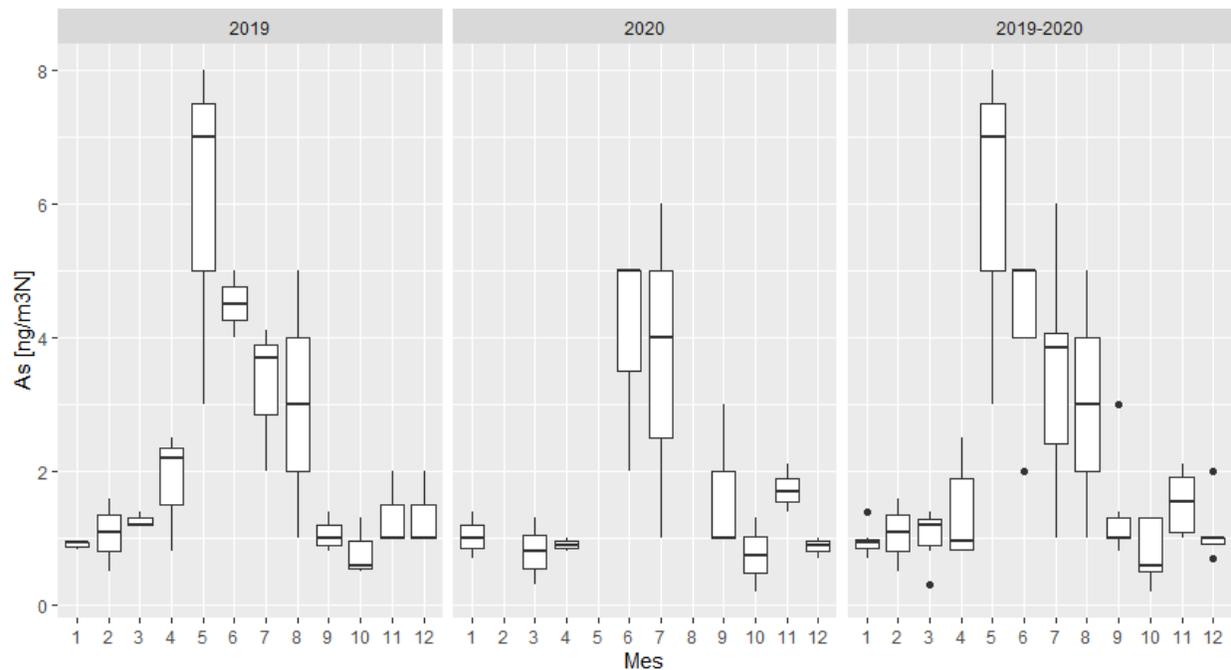
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-9 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías Termoeléctrica Tocopilla, estación Super Site**

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	3	36	35	21	35	26	12
<b>Max.</b>	0,020	0,020	0,020	0,010	0,020	0,021	0,002
<b>3rd Qu.</b>	0,019	0,009	0,007	0,006	0,006	0,006	0,002
<b>Mediana</b>	0,018	0,005	0,004	0,004	0,004	0,003	0,002
<b>Media</b>	0,018	0,006	0,005	0,004	0,005	0,005	0,002
<b>1st Qu.</b>	0,016	0,004	0,002	0,003	0,003	0,002	0,001
<b>Min.</b>	0,015	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 2-5 se presentan las concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] mensualmente para los años 2019, 2020 y ambos en conjunto de la estación Super Site. Se observa que la concentración de As aumenta durante el invierno en dichos años, siendo mayor entre los meses de mayo y agosto, tanto en el valor de la mediana como en los valores máximos.



**Figura 2-5 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N], cercanías Termoeléctrica Tocopilla, estación Super Site**

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.2.2 Estaciones cercanas a fundición Chuquicamata

En la Figura 2-6 se muestra la ubicación de la fundición Chuquicamata, donde se observa que su ciudad más cercana es Calama. Adicionalmente en Ministro Hales, existe también una planta de tostación que también es una fuente de emisiones de arsénico. Respecto de las estaciones de monitoreo de calidad del aire, se observa que la estación más cercana es Aukahuasi, que se encuentra 5,4 kilómetros al oeste de la fundición. Le sigue en cercanía las estaciones ubicadas al sur, en Calama: C.P.V.K.; Hospital El Cobre; Centro; CD 23 de Marzo; y Servicio Médico Legal, las cuales se encuentran a una distancia de la fundición de entre 15 y 17,3 kilómetros. A 24,6 kilómetros de la fundición en dirección este también se encuentra la estación Nueva Chiu-Chiu.

Es importante mencionar que la estación Nueva Chiu-Chiu vino a reemplazar la antigua estación de Chiu-Chiu, la cual tenía una ubicación cercana. La estación Chiu-Chiu estuvo activa hasta febrero del año 2019, mientras que la estación Nueva Chiu-Chiu (a 200 metros al este de la antigua estación) comenzó sus mediciones en abril del año 2019. La estación Nueva Chiu-Chiu

obtuvo su representatividad para MP10 a partir del 18 de julio del mismo año<sup>8</sup>. Actualmente, esta estación es representativa únicamente para MP10.



**Figura 2-6 Mapa fundición Chuquicamata, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas**

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

En la Figura 2-7 y Figura 2-8 se presenta la evolución de la concentración de As medida en las estaciones Aukahuasi, C.P.V.K, CD 23 de Marzo, Centro, Chiu-Chiu, Nueva Chiu-Chiu, Servicio Médico Legal y Hospital El Cobre, ubicadas en la zona. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 2-10, Tabla 2-11, Tabla 2-12, Tabla 2-13, Tabla 2-16, Tabla 2-17, Tabla 2-14 y Tabla 2-15, respectivamente.

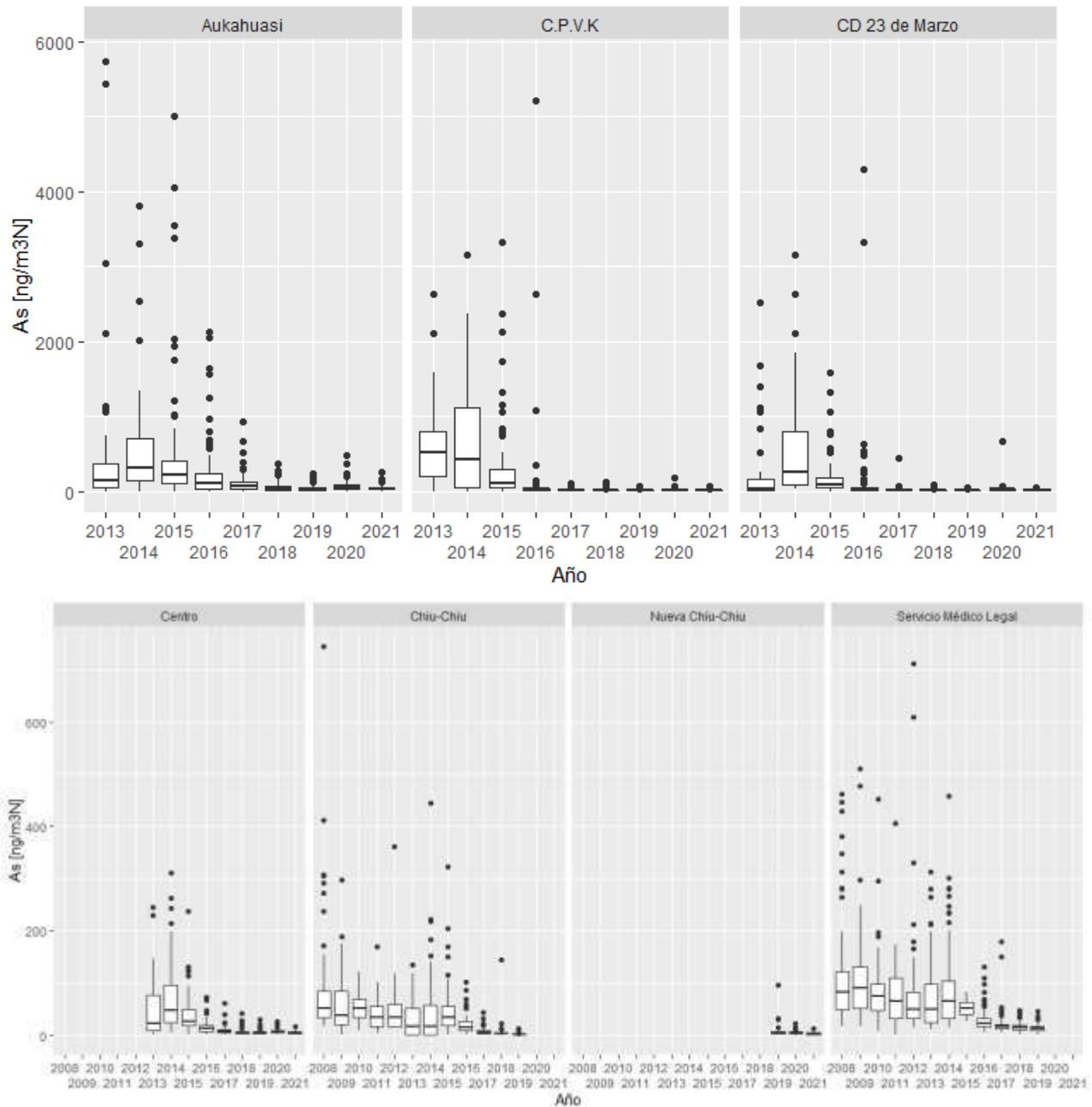
Cuando se publicó la norma de emisión (D.S. 28/2013 del MMA), Chuquicamata no contaba con plantas de ácido de doble contacto, por lo que de acuerdo con la regulación debía cumplir los

<sup>8</sup> Representatividad otorgada mediante la Resolución Exenta N°1084, de fecha 30 de julio de 2019 de la Superintendencia del Medio Ambiente. En el análisis de las concentraciones de la estación Nueva Chiu-Chiu se incluyen los valores de concentraciones de As medidas entre abril y el 18 de julio de 2018, a pesar de que la estación aún no estaba declarada como representativa de MP10.

límites de emisión establecidos por la norma de emisión a partir de diciembre 2018. Consistentemente con lo anterior, se observa que las concentraciones disminuyen entre el año 2018 y 2019, año en que comienza a aplicar los límites de emisión. Sin perjuicio de lo anterior, se observa que en el periodo 2016-2018 hubo reducciones en las concentraciones medidas de arsénico.

De las siete estaciones, se observa que las concentraciones de As en la estación Aukahuasi son los más altos. Lo anterior se explica, pues de las estaciones consideradas Aukahuasi se encuentra significativamente más cercana a la fundición, a una distancia de 5,4 km (ver Figura 2-6).

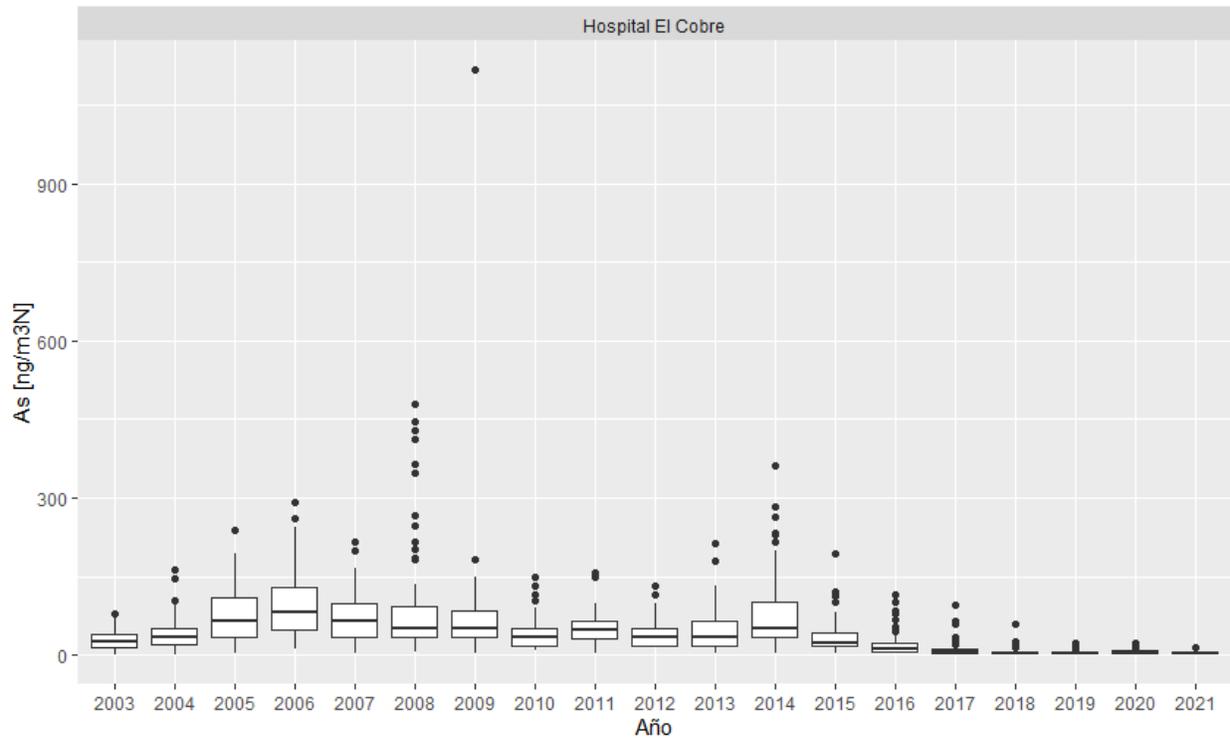
Si bien, dentro de las estaciones ubicadas en Calama se observan diferencias con las mayores concentraciones observadas en C.P.V.K. y CD 23 de Marzo, se observa de forma transversal una tendencia a la disminución de las concentraciones a lo largo del periodo en todas las estaciones, observándose un cambio relativamente evidente a partir del año 2016 en la medida que la Fundición Chuquicamata se preparaba para dar cumplimiento a las exigencias de la norma. Además, la aplicación de la norma de emisión a partir del año 2019 provocó que se realicen cambios significativos como la modificación del proceso de fusión, lo cual implicó una reducción de sus niveles de procesamiento durante el proceso de instalación de las nuevas tecnologías y *ramp-up*, lo que se traduce en la disminución de las concentraciones que se observa entre los años 2018 y 2019. En los años siguientes, a medida que la fundición va recuperando sus niveles de producción anteriores a las modificaciones motivadas por el DS28/2013, se observa un aumento en las concentraciones. El comportamiento general de las concentraciones se condice con las emisiones de arsénico anuales de la fundición (ver Figura 3-7 de la Sección 3.3.1), las cuales van en disminución desde el año 2014.



Nota: La gráfica del primer conjunto de estaciones (Aukahuasi, C.P.V.K, CD 23 de Marzo) tienen escalas de concentración diferente al segundo conjunto (Centro, Chiu-Chiu, Nueva Chiu-Chiu, y Servicio Médico Legal).

**Figura 2-7 Concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones, excepto Hospital El Cobre**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 2-8 Concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre**

Fuente: Elaboración propia

En la estación Aukahuasi (ver Tabla 2-10) se observa una constante disminución de la concentración mediana hasta el año 2019, pasando de 317 [ng/m<sup>3</sup>N] en 2014 a 30 [ng/m<sup>3</sup>N] en 2019. El año 2020 se identifica un leve aumento asociado a un aumento en los niveles de producción como consecuencia del proceso de *ramp-up*. Por otra parte, las concentraciones máximas también disminuyen entre los años 2014 a 2019, identificándose una disminución de un 57% entre los años 2015 y 2016 y luego nuevamente de un 57% entre los años 2016 y 2017.

**Tabla 2-10 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Aukahuasi<sup>9</sup>**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	105	109	117	117	111	119	109	102	37
<b>Max.</b>	5.734	3.814	5.003	2.129	924	368	233	483	249
<b>3rd Qu.</b>	368	700	408	230	124	76	60	89	52
<b>Mediana</b>	141	317	218	101	67	40	30	50	38
<b>Media</b>	372	499	444	228	107	57	45	72	48
<b>1st Qu.</b>	53	140	114	40	28	19	12	27	29
<b>Min.</b>	2	2	3	3	1	0	1	1	4

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de los días 7 de noviembre de 2014 y 18 de enero de 2015 correspondientes a 5.752 [ng/m<sup>3</sup>N] y 3.298 [ng/m<sup>3</sup>N] respectivamente, ya que se consideran *outliers*. Además, se excluyen los valores de 15 días diferentes correspondientes a 2 [ng/m<sup>3</sup>N] y de 3 días diferentes correspondientes a 0,1 [ng/m<sup>3</sup>N] por ser considerados *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En las demás estaciones (ver Tabla 2-11 a Tabla 2-15), se observa la misma tendencia que en la estación Aukahuasi pero en menores concentraciones: la mediana de las concentraciones disminuye a lo largo del periodo hasta el año 2019, y se observa un leve aumento en el año 2020.

Dentro del periodo 2013-2021, se identifica un peak en las concentraciones máximas en el año 2014 para todas las estaciones. Esto se condice con el peak de emisiones de la fundición para dicho periodo en el año 2014 (ver Figura 3-7 de la Sección 3.3.1). En la Figura 2-9 se grafica el detalle de las concentraciones de arsénico medidas en las estaciones C.P.V.K, CD 23 de Marzo y Centro, con concentraciones inferiores a 200 ng/m<sup>3</sup>N, para una mejor inspección.

**Tabla 2-11 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación C.P.V.K**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	86	76	89	88	109	117	102	118	35
<b>Max.</b>	2.631	3.158	3.316	5.211	98	123	70	179	77
<b>3rd Qu.</b>	789	1.120	290	37	26	20	17	29	20
<b>Mediana</b>	526	417	107	25	17	13	11	16	13
<b>Media</b>	599	718	323	134	22	19	14	21	18
<b>1st Qu.</b>	200	53	53	16	11	9	6	10	9
<b>Min.</b>	2	2	2	3	4	3	3	1	3

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de los días 11 de abril y 4 de junio de 2014, del 24 de septiembre de 2015 y del 30 de julio del 2017, correspondientes a 6.316 [ng/m<sup>3</sup>N], 4.375 [ng/m<sup>3</sup>N], 8.790 [ng/m<sup>3</sup>N] y 2.734 [ng/m<sup>3</sup>N] respectivamente, ya que se consideran *outliers*. Además, se excluyen los valores de 52 días diferentes entre los años 2013 y 2015, correspondientes a 2 [ng/m<sup>3</sup>N], por ser considerados *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

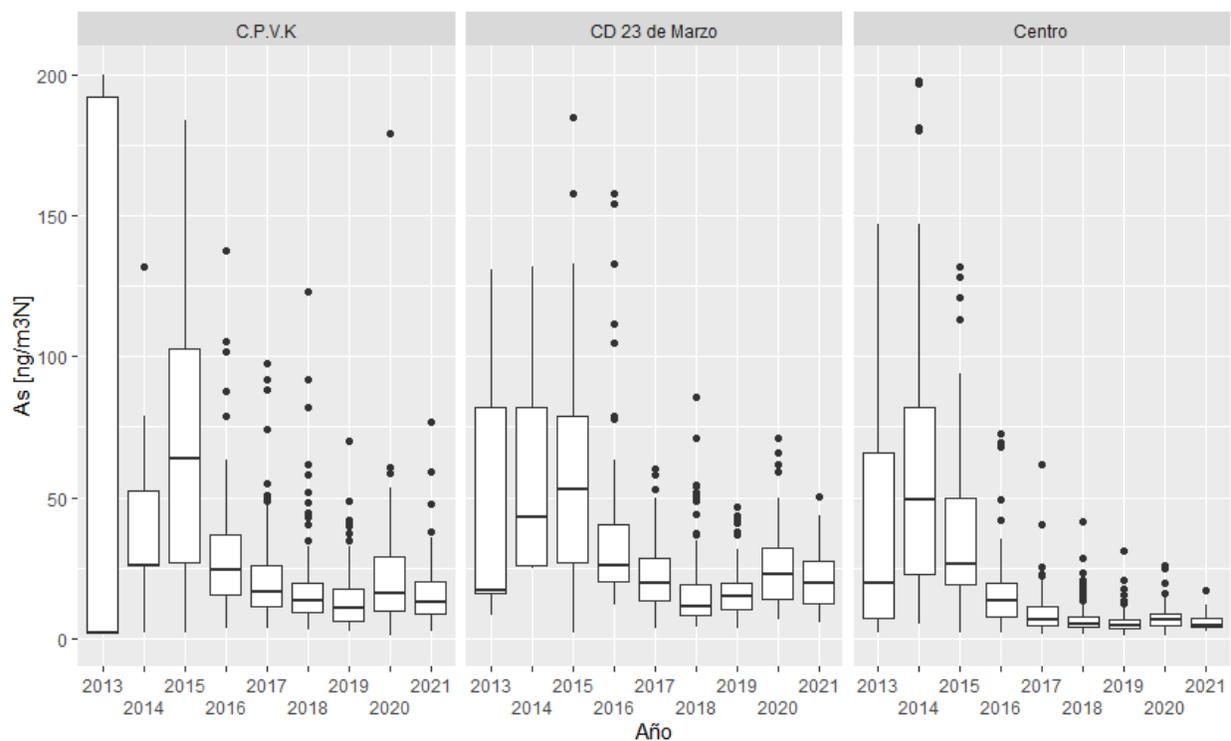
<sup>9</sup> En todas las tablas de estadígrafos de la Sección 2.3 se presenta: la cantidad de datos por año (N); el valor máximo medido (Máx.); la mediana (Median.); el valor mínimo (Min.); y los valores de primer cuartil (el 25% de los datos es menor a este valor) y el tercer cuartil (el 75% de los datos es menor a este valor).

**Tabla 2-12 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación CD 23 de Marzo**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	68	70	77	93	110	117	117	118	39
<b>Max.</b>	2.517	3.158	1.579	4.291	447	85	46	664	50
<b>3rd Qu.</b>	160	789	185	51	29	19	20	32	28
<b>Mediana</b>	41	263	79	27	20	11	15	23	20
<b>Media</b>	268	582	229	142	26	17	16	29	21
<b>1st Qu.</b>	16	80	42	20	13	8	10	14	12
<b>Min.</b>	8	25	2	12	3	4	4	6	6

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de 7 días diferentes, correspondientes a valores entre 0 y 3 [ng/m<sup>3</sup>N], por ser considerados outliers (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia



**Figura 2-9 Concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en Chuquicamata, estaciones C.P.V.K y CD 23 de Marzo, valores inferiores a 200 ng/m<sup>3</sup>N**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-13 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Centro**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	78	81	111	110	116	120	116	117	40
<b>Max.</b>	245	311	237	72	62	42	31	26	17
<b>3rd Qu.</b>	77	97	50	20	11	7	7	9	7
<b>Mediana</b>	24	49	27	13	7	5	4	6	5
<b>Media</b>	46	71	39	17	9	7	6	7	6
<b>1st Qu.</b>	9	24	20	8	5	4	3	5	4
<b>Min.</b>	2	5	2	2	1	1	1	1	3

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-14 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre**

Año	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
<b>N</b>	116	121	120	99	85	91	79	90	81
<b>Max.</b>	80	163	238	291	216	480	1.117	149	156
<b>3rd Qu.</b>	40	52	111	129	99	92	83	50	66
<b>Mediana</b>	26	33	65	81	66	50	50	33	49
<b>Media</b>	29	39	73	92	73	90	71	39	49
<b>1st Qu.</b>	15	19	33	49	34	33	33	17	32
<b>Min.</b>	1	1	2	11	4	7	3	8	2

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	81	75	80	85	112	120	122	116	121	40
<b>Max.</b>	132	214	362	194	116	94	60	22	23	14
<b>3rd Qu.</b>	50	66	102	43	22	10	7	6	8	6
<b>Mediana</b>	33	33	50	24	10	7	4	4	5	4
<b>Media</b>	40	47	83	35	19	10	6	5	6	5
<b>1st Qu.</b>	16	17	33	17	7	4	3	2	4	3
<b>Min.</b>	16	4	2	2	2	1	2	1	0	1

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de 6 días diferentes, correspondientes a 0 [ng/m3N], por ser considerados *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-15 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Servicio Médico Legal**

Año	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
<b>N</b>	76	90	112	102	96	99	97
<b>Max.</b>	462	511	452	406	711	313	459
<b>3rd Qu.</b>	121	132	99	111	83	99	105
<b>Mediana</b>	83	92	76	66	50	50	66
<b>Media</b>	116	106	79	76	78	74	90
<b>1st Qu.</b>	50	52	48	33	33	26	33
<b>Min.</b>	17	17	8	2	16	12	16

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	10	108	119	118	114	0	0
<b>Max.</b>	83	132	179	47	46	S/I	S/I
<b>3rd Qu.</b>	63	32	22	20	18	S/I	S/I
<b>Mediana</b>	52	22	17	15	12	S/I	S/I
<b>Media</b>	52	30	21	17	14	S/I	S/I
<b>1st Qu.</b>	40	17	12	11	9	S/I	S/I
<b>Min.</b>	27	6	5	3	3	S/I	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de 7 días diferentes, correspondientes a valores entre 1 y 7 [ng/m<sup>3</sup>N], por ser considerados outliers (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las estaciones Chiu-Chiu y Nueva Chiu-Chiu, cabe destacar que la estación Chiu-Chiu cambió de ubicación y se encuentra en el nuevo sitio desde abril de 2019, momento en que comienza a medir en Nueva Chiu-Chiu. Chiu-Chiu deja de reportar a fines de febrero de dicho año. Considerando que ambas estaciones se encuentran próximas, no se observan impactos mayores en este aspecto, siendo quizás el único cambio observable una disminución en el valor máximo reportado en 2019 si se compara con 2018, lo cual puede guardar relación también con las menores emisiones estimadas en dicho año (ver Figura 3-7 de la Sección 3.3.1).

**Tabla 2-16 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Chiu-Chiu**

Año	2008	2009	2010	2011	2012	2013
<b>N</b>	66	93	67	68	71	116
<b>Max.</b>	745	297	121	170	361	136
<b>3rd Qu.</b>	84	85	69	56	59	51
<b>Mediana</b>	51	39	51	34	34	17
<b>Media</b>	89	60	57	47	46	31
<b>1st Qu.</b>	34	21	34	17	17	2
<b>Min.</b>	17	2	10	3	17	2

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019
<b>N</b>	119	117	116	122	121	14
<b>Max.</b>	444	323	101	44	146	14
<b>3rd Qu.</b>	58	56	26	9	6	3
<b>Mediana</b>	17	34	15	5	4	2
<b>Media</b>	39	44	20	7	6	4
<b>1st Qu.</b>	2	19	9	3	3	2
<b>Min.</b>	2	2	1	1	1	1

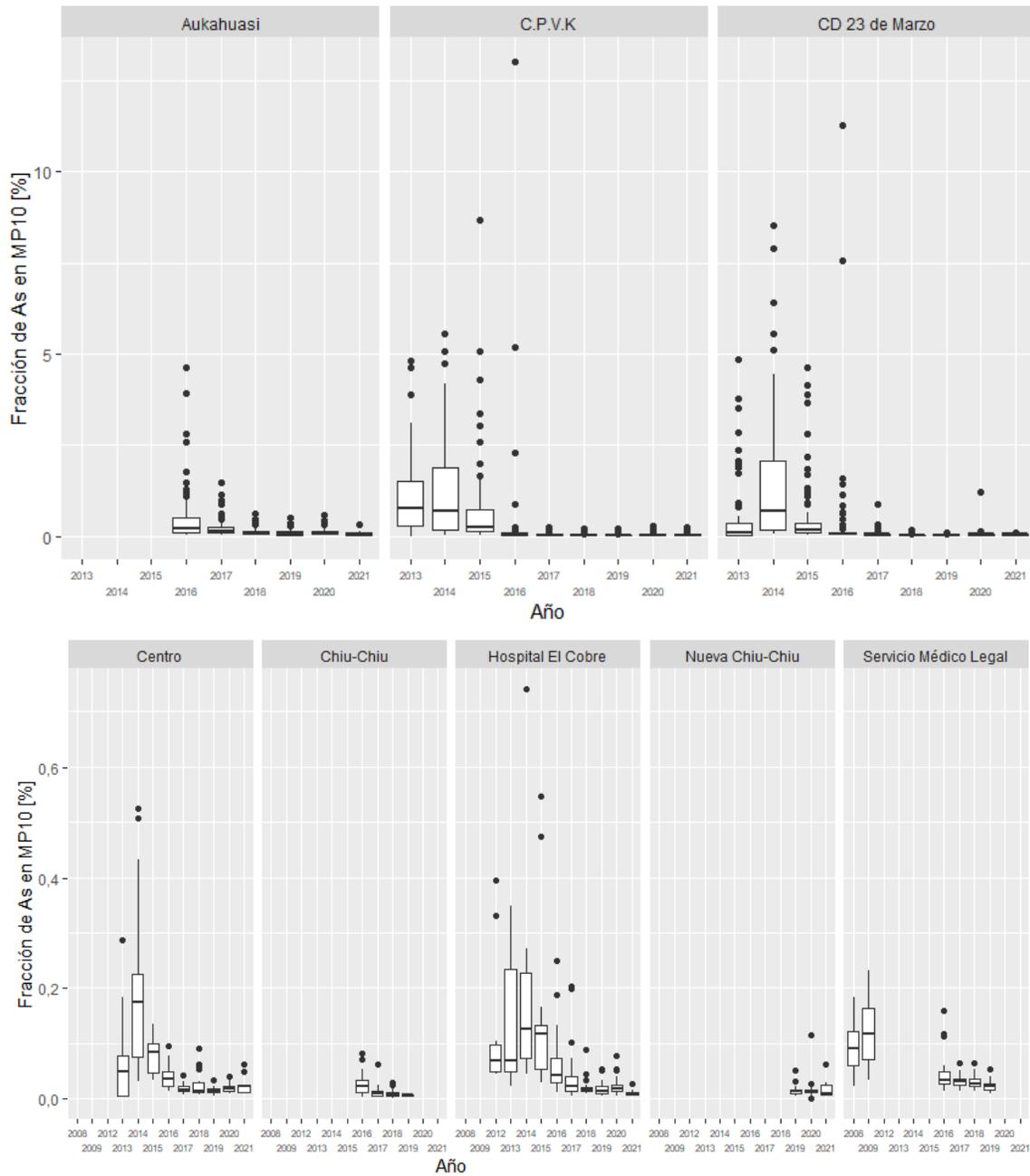
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-17 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Nueva Chiu-Chiu**

Año	2019	2020	2021
<b>N</b>	85	117	39
<b>Max.</b>	96	23	12
<b>3rd Qu.</b>	7	6	5
<b>Mediana</b>	5	4	4
<b>Media</b>	7	5	4
<b>1st Qu.</b>	3	3	2
<b>Min.</b>	1	0	1

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-10 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As obtenidas a partir del muestreo de MP10. Se observa que las estaciones Aukahuasi, C.P.V.K y CD 23 de Marzo, tienen una mayor participación del arsénico respecto a las otras estaciones, lo cual sugiere un mayor aporte de las emisiones de la fundición y planta de tostación en comparación con las demás estaciones. Aun así, se destaca que la mediana de la contribución del arsénico al total de MP10 en los últimos años es inferior a 0,1%. También se observó en todas las estaciones un alza en el año 2020 en la fracción de arsénico en MP10 con respecto al 2019—para la estación Servicio Médico Legal no se cuenta con datos para dicho año. Lo anterior es consistente con lo esperado, puesto que, dado el menor nivel de operación de la fundición durante ese año, es esperable que su aporte porcentual sea menor en comparación con los otros años, lo cual se traduce en una menor fracción de As en el total de MP10. Los estadígrafos se presentan en la Tabla 2-18 a la Tabla 2-23.



Nota: La gráfica del primer conjunto de estaciones (Aukahuasi, C.P.V.K y CD 23 de Marzo) tiene escalas de concentración diferente al segundo conjunto (Centro, Nueva Chiu-Chiu, Hospital El Cobre y Servicio Médico Legal).

**Figura 2-10 Fracción de As en MP10 [%] cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-18 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Aukahuasi**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	117	110	118	109	95	10
<b>Max.</b>	S/C	S/C	S/C	4,628	1,454	0,624	0,506	0,577	0,313
<b>3rd Qu.</b>	S/C	S/C	S/C	0,493	0,234	0,148	0,117	0,152	0,078
<b>Mediana</b>	S/C	S/C	S/C	0,226	0,146	0,081	0,055	0,092	0,070
<b>Media</b>	S/C	S/C	S/C	0,444	0,209	0,114	0,086	0,120	0,085
<b>1st Qu.</b>	S/C	S/C	S/C	0,102	0,085	0,046	0,032	0,051	0,034
<b>Min.</b>	S/C	S/C	S/C	0,019	0,017	0,009	0,005	0,011	0,010

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, dado que no se pudo realizar un cruce de información entre las mediciones de As y de MP10 debido a la falta de datos de concentraciones de MP10 para estos años.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-19 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación C.P.V.K**

Año	2013*	2014*	2015	2016	2017	2018	2019	2020*	2021*
<b>N</b>	83	68	89	88	109	117	102	116	35
<b>Max.</b>	4,824	5,545	8,683	13,028	0,237	0,197	0,216	0,280	0,232
<b>3rd Qu.</b>	1,524	1,868	0,725	0,080	0,054	0,041	0,040	0,066	0,051
<b>Mediana</b>	0,759	0,709	0,244	0,052	0,035	0,028	0,026	0,040	0,031
<b>Media</b>	1,064	1,314	0,731	0,302	0,048	0,036	0,033	0,049	0,042
<b>1st Qu.</b>	0,274	0,168	0,128	0,035	0,026	0,020	0,016	0,024	0,017
<b>Min.</b>	0,003	0,003	0,010	0,013	0,006	0,006	0,006	0,004	0,008

\* Para realizar el cálculo en estos años, la información de concentraciones de MP10 fue complementada con datos obtenidos del SINCA, los cuales corresponden a promedios diarios de mediciones horarias. Específicamente, se utilizan datos de concentraciones de MP10 del SINCA para todos los meses de los años 2013 y 2014, para el mes de agosto de 2020 y de febrero a noviembre de 2021.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-20 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación CD 23 de Marzo**

Año	2013*	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020*	2021*
<b>N</b>	68	70	117	93	110	116	116	118	39
<b>Max.</b>	4,854	8,535	4,644	11,292	0,872	0,180	0,111	1,229	0,093
<b>3rd Qu.</b>	0,340	2,070	0,248	0,093	0,060	0,039	0,042	0,067	0,055
<b>Mediana</b>	0,088	0,693	0,136	0,062	0,044	0,026	0,034	0,049	0,042
<b>Media</b>	0,590	1,495	0,397	0,342	0,063	0,035	0,035	0,063	0,046
<b>1st Qu.</b>	0,036	0,161	0,073	0,042	0,034	0,018	0,025	0,035	0,031
<b>Min.</b>	0,015	0,048	0,015	0,025	0,015	0,007	0,008	0,017	0,020

\* Para realizar el cálculo en estos años, la información de concentraciones de MP10 fue complementada con datos obtenidos del SINCA, los cuales corresponden a promedios diarios de mediciones horarias. Específicamente, se utilizan datos de concentraciones de MP10 del SINCA para los meses de enero a julio del año 2013, agosto de 2020 y de febrero a noviembre de 2021.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-21 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Centro**

Año	2013*	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020*	2021*
<b>N</b>	75	81	81	110	116	120	116	116	38
<b>Max.</b>	0,490	0,881	0,494	0,213	0,238	0,130	0,056	0,096	0,069
<b>3rd Qu.</b>	0,171	0,238	0,107	0,056	0,028	0,021	0,019	0,026	0,036
<b>Mediana</b>	0,054	0,112	0,071	0,034	0,020	0,015	0,013	0,019	0,024
<b>Media</b>	0,099	0,180	0,096	0,045	0,026	0,020	0,015	0,022	0,028
<b>1st Qu.</b>	0,017	0,054	0,045	0,020	0,013	0,013	0,010	0,015	0,017
<b>Min.</b>	0,004	0,017	0,006	0,008	0,005	0,005	0,004	0,007	0,009

\* Para realizar el cálculo en estos años, la información de concentraciones de MP10 fue complementada con datos obtenidos del SINCA, los cuales corresponden a promedios diarios de mediciones horarias. Específicamente, se utilizan datos de concentraciones de MP10 del SINCA para los meses de enero a julio del año 2013, agosto de 2020 y de febrero a noviembre de 2021.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-22 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020*	2021*
<b>N</b>	74	75	80	75	112	119	122	116	112	40
<b>Max.</b>	0,456	0,509	1,209	0,560	0,377	0,448	0,264	0,058	0,098	0,050
<b>3rd Qu.</b>	0,183	0,177	0,314	0,128	0,075	0,036	0,022	0,020	0,028	0,017
<b>Mediana</b>	0,093	0,068	0,155	0,088	0,038	0,022	0,016	0,014	0,020	0,012
<b>Media</b>	0,128	0,128	0,260	0,109	0,067	0,035	0,022	0,017	0,023	0,015
<b>1st Qu.</b>	0,051	0,041	0,080	0,049	0,024	0,014	0,012	0,010	0,014	0,009
<b>Min.</b>	0,029	0,008	0,007	0,007	0,007	0,005	0,006	0,005	0,005	0,005

\* Para realizar el cálculo en estos años, la información de concentraciones de MP10 fue complementada con datos obtenidos del SINCA, los cuales corresponden a promedios diarios de mediciones horarias. Específicamente, se utilizan datos de concentraciones de MP10 del SINCA para agosto de 2020 y de febrero a noviembre de 2021.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-23 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Servicio Médico Legal**

Año	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	76	90	0	0	0	0	0	0	108	119	118	114	0	0
<b>Max.</b>	0,444	0,276	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	0,259	0,496	0,072	0,055	S/I	S/I
<b>3rd Qu.</b>	0,151	0,153	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	0,059	0,036	0,031	0,029	S/I	S/I
<b>Mediana</b>	0,087	0,097	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	0,040	0,029	0,025	0,022	S/I	S/I
<b>Media</b>	0,118	0,115	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	0,053	0,036	0,027	0,024	S/I	S/I
<b>1st Qu.</b>	0,053	0,059	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	0,031	0,023	0,021	0,017	S/I	S/I
<b>Min.</b>	0,020	0,028	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	S/C	0,013	0,012	0,007	0,006	S/I	S/I

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, dado que no se pudo realizar un cruce de información entre las mediciones de As y de MP10.

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-24 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Chiu-Chiu**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
<b>N</b>	0	0	0	116	122	121	14
<b>Max.</b>	S/C	S/C	S/C	0,153	0,062	0,495	0,029
<b>3rd Qu.</b>	S/C	S/C	S/C	0,037	0,014	0,011	0,008
<b>Mediana</b>	S/C	S/C	S/C	0,022	0,008	0,007	0,006
<b>Media</b>	S/C	S/C	S/C	0,030	0,011	0,012	0,009
<b>1st Qu.</b>	S/C	S/C	S/C	0,012	0,005	0,004	0,004
<b>Min.</b>	S/C	S/C	S/C	0,002	0,001	0,001	0,003

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, dado que no se pudo realizar un cruce de información entre las mediciones de As y de MP10 debido a la falta de datos de concentraciones de MP10 para estos años.

Fuente: Elaboración propia

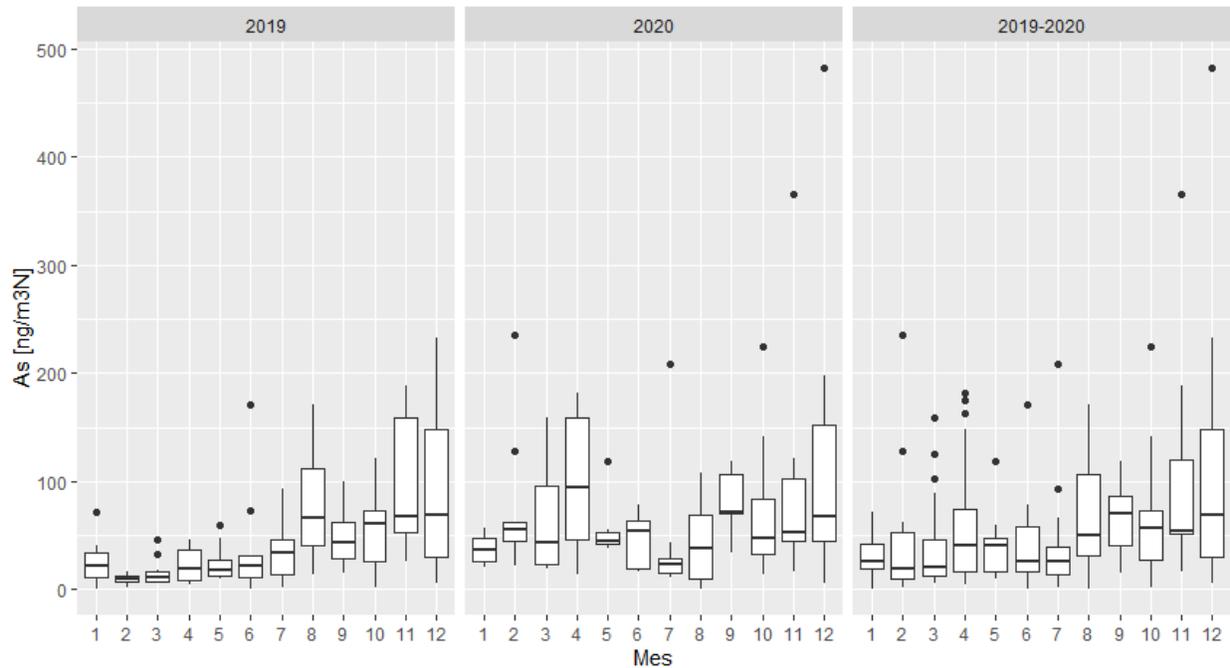
**Tabla 2-25 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Nueva Chiu-Chiu**

Año	2019	2020*	2021*
<b>N</b>	79	116	38
<b>Max.</b>	0,288	0,116	0,062
<b>3rd Qu.</b>	0,019	0,019	0,023
<b>Mediana</b>	0,014	0,014	0,012
<b>Media</b>	0,020	0,017	0,017
<b>1st Qu.</b>	0,009	0,009	0,008
<b>Min.</b>	0,002	0,000	0,003

\* Para realizar el cálculo en estos años, la información de concentraciones de MP10 fue complementada con datos obtenidos del SINCA, los cuales corresponden a promedios diarios de mediciones horarias. Específicamente, se utilizan datos de concentraciones de MP10 del SINCA para agosto de 2020 y de febrero a noviembre de 2021.

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 2-11 se presentan las concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] mensualmente para los años 2019, 2020 y ambos en conjunto de la estación Aukahuasi, estación más cercana a la fundición. Se observa un leve aumento en la concentración de As en los meses de invierno para el año 2019, sin embargo, este aumento se mantiene en los meses de primavera. Por otra parte, en el año 2020 se observa una disminución de las concentraciones en el invierno, y luego vuelven a aumentar a partir de septiembre hasta fin de año. Por lo tanto, sólo se puede concluir que tiende a haber un aumento de las concentraciones de As desde agosto/septiembre hasta fin de año.

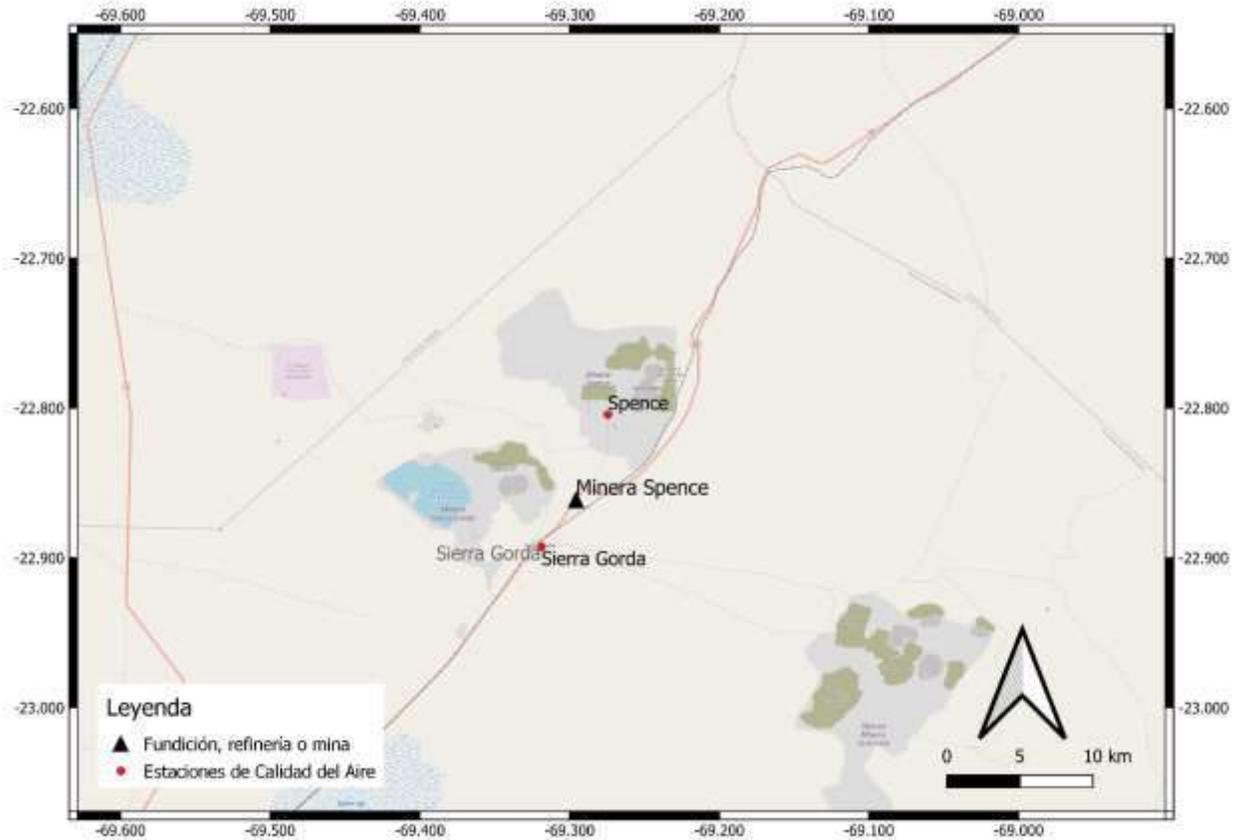


**Figura 2-11 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N], cercanías fundición Chuquicamata, estación Aukahuasi**

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.2.3 Estaciones cercanas a minera Spence

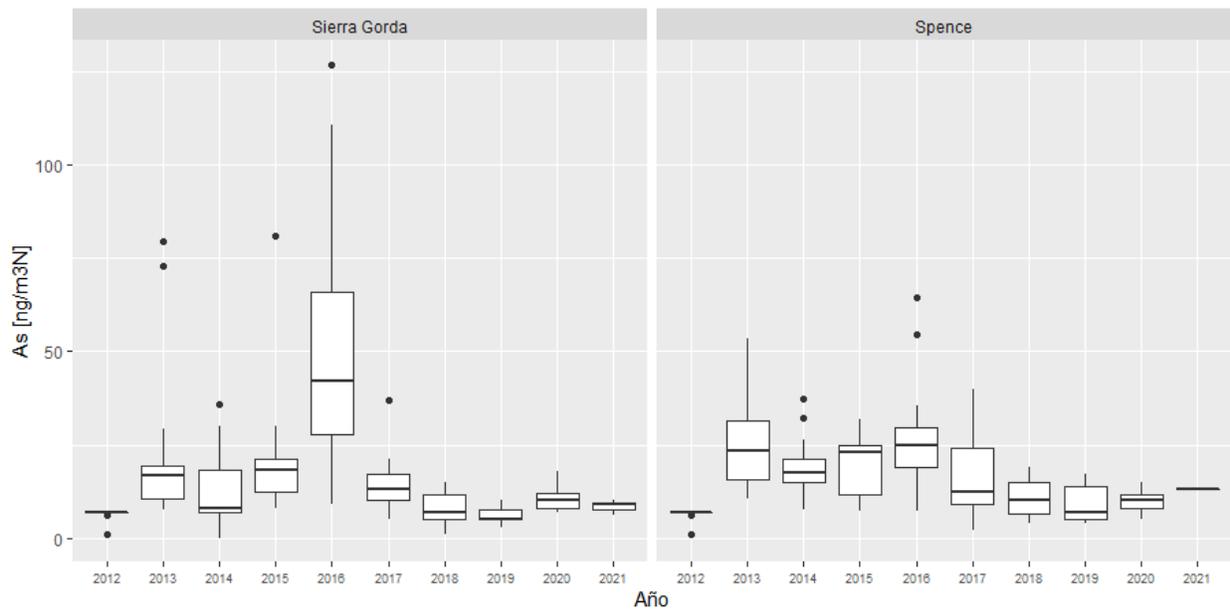
En la Figura 2-12 se muestra la ubicación de la minera Spence, donde se observa su ubicación en relación con la localidad de Sierra Gorda, donde se encuentra la estación del mismo nombre, y la estación Spence, 4,2 km al suroeste y 6,7 km al noreste de la minera, respectivamente.



**Figura 2-12 Mapa minero Spence, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas**

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

En la Figura 2-13 se presenta la evolución de la concentración de As en MP10 medida en todas las estaciones ubicadas en las cercanías de la minera Spence. Sus estadígrafos se resumen en las siguientes dos tablas, aun así, dado el limitado número de datos disponible es conveniente tener precauciones a la hora de interpretar el análisis de los datos. De la información disponible, se observan mayores concentraciones en la estación Spence, a excepción del año 2013, en que le superan los valores de la estación Sierra Gorda. En ambas estaciones se observa un peak de concentraciones en 2016, año en el que comienza una tendencia a la disminución, que en el caso de Sierra Gorda cesa en 2019, y en 2020 en la estación Spence. Es esperable que ante la falta de fuentes emisoras relevantes en la zona, las variaciones observadas de las concentraciones que se observan probablemente a la velocidad y dirección del viento.



**Figura 2-13 Concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías minera Spence, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

Para la estación Sierra Gorda (ver Tabla 2-26) se observan concentraciones con medianas en el rango de 5 [ng/m<sup>3</sup>N] a 13 [ng/m<sup>3</sup>N] desde 2017 a 2021, con máximas del orden de 10 [ng/m<sup>3</sup>N] y 18 [ng/m<sup>3</sup>N] desde el año 2019. En los años anteriores, exceptuando el año 2012, los estadígrafos de las concentraciones en general son mayores, destacando los años 2015 y 2016, en donde las medianas de las concentraciones son 18 [ng/m<sup>3</sup>N] y 42 [ng/m<sup>3</sup>N] y las concentraciones máximas son 81 [ng/m<sup>3</sup>N] y 127 [ng/m<sup>3</sup>N] respectivamente. Al respecto cabe destacar que se cuenta con una muestra limitada de mediciones en esta estación y los meses de medición varían de año a año, lo cual dificulta más el análisis.

**Tabla 2-26 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías minera Spence, estación Sierra Gorda**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	8	18	22	15	10	17	11	7	13	3
<b>Max.</b>	7	80	36	81	127	37	15	10	18	10
<b>3rd Qu.</b>	7	20	18	21	66	17	12	8	12	10
<b>Mediana</b>	7	17	8	18	42	13	7	5	10	9
<b>Media</b>	6	22	12	21	52	15	8	6	10	8
<b>1st Qu.</b>	7	10	7	12	28	10	5	5	8	8
<b>Min.</b>	1	8	0	8	9	5	1	3	7	6

Nota: Se excluyen los valores de concentración de As de los días 15 de octubre y 2 de noviembre de 2014, 3 de junio, 15 de junio y 3 de julio de 2015, correspondientes a 0, 98, 171, 478 y 270 [ng/m<sup>3</sup>N] respectivamente, ya que se consideran *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

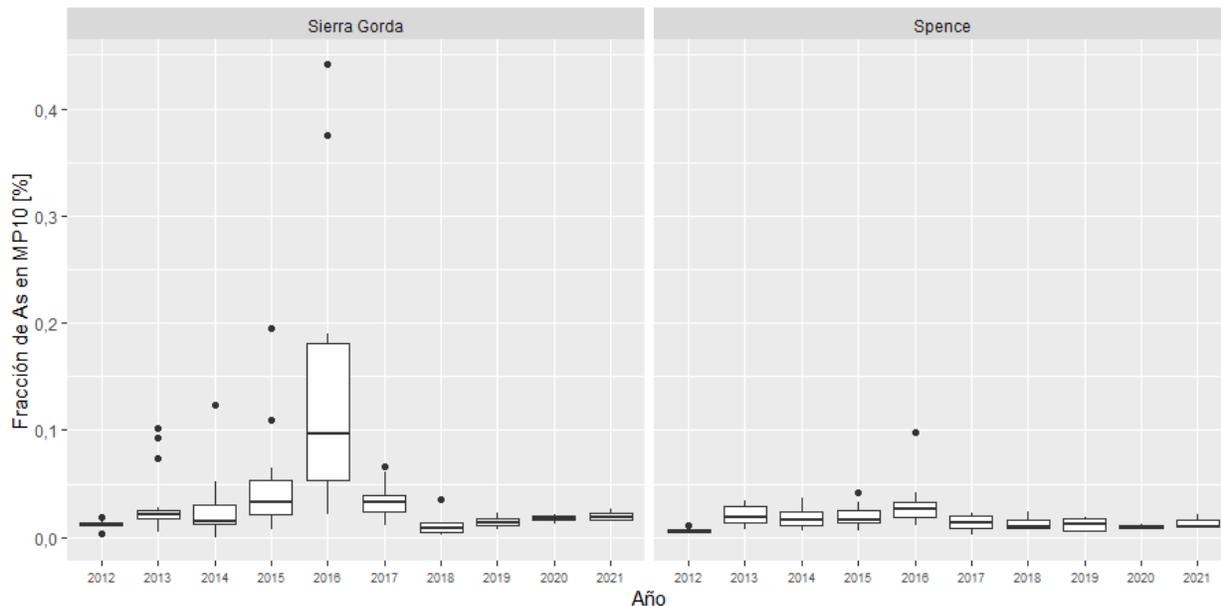
En la estación Spence (Tabla 2-27), las concentraciones medianas se mantienen en el rango de 18 [ng/m<sup>3</sup>N] a 25 [ng/m<sup>3</sup>N] en el periodo de 2013 a 2016, que disminuyen de 13[ng/m<sup>3</sup>N] a 7 [ng/m<sup>3</sup>N] entre 2017 y 2020. Nuevamente se destaca el bajo número de mediciones disponibles.

**Tabla 2-27 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías minera Spence, estación Spence**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	8	15	15	11	13	14	10	13	11	3
<b>Max.</b>	7	54	37	32	64	40	19	17	15	13
<b>3rd Qu.</b>	7	31	21	25	30	24	15	14	12	13
<b>Mediana</b>	7	23	18	23	25	13	10	7	10	13
<b>Media</b>	6	26	19	19	28	16	11	9	10	13
<b>1st Qu.</b>	7	16	15	12	19	9	7	5	8	13
<b>Min.</b>	1	11	7	7	7	2	4	4	5	13

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en la Figura 2-14 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas mediante el muestreo. Se observa un leve incremento de las fracciones de arsénico en MP10 en el año 2016, especialmente en la estación Sierra Gorda, lo que se podría deber a su cercanía con la minera. Los estadígrafos se presentan en la Tabla 2-28 y Tabla 2-29, donde se puede observar que en el año 2020 la mediana de la fracción era de 0,018% y 0,01% en Sierra Gorda y Spence respectivamente.



**Figura 2-14 Fracción de As en MP10 [%] cercanías Minera Spence, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-28 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías Minera Spence, estación Sierra Gorda**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	8	18	22	15	10	17	6	4	6	3
<b>Max.</b>	0,018	0,102	0,123	0,195	0,442	0,066	0,036	0,023	0,021	0,026
<b>3rd Qu.</b>	0,013	0,025	0,030	0,054	0,182	0,039	0,013	0,018	0,020	0,022
<b>Mediana</b>	0,011	0,021	0,015	0,033	0,097	0,032	0,009	0,014	0,018	0,018
<b>Media</b>	0,012	0,030	0,024	0,048	0,152	0,033	0,012	0,015	0,018	0,020
<b>1st Qu.</b>	0,011	0,017	0,012	0,021	0,053	0,023	0,005	0,011	0,016	0,016
<b>Min.</b>	0,004	0,005	0,000	0,008	0,021	0,011	0,003	0,007	0,013	0,015

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-29 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías Minera Spence, estación Spence**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	8	15	15	9	13	14	3	5	6	3
<b>Max.</b>	0,011	0,034	0,037	0,041	0,098	0,023	0,024	0,019	0,012	0,021
<b>3rd Qu.</b>	0,007	0,028	0,024	0,025	0,032	0,020	0,017	0,018	0,011	0,016
<b>Mediana</b>	0,006	0,019	0,017	0,017	0,027	0,014	0,009	0,012	0,010	0,010
<b>Media</b>	0,006	0,020	0,019	0,020	0,030	0,014	0,014	0,012	0,010	0,014
<b>1st Qu.</b>	0,005	0,014	0,012	0,014	0,019	0,009	0,009	0,006	0,009	0,010
<b>Min.</b>	0,004	0,007	0,006	0,005	0,012	0,003	0,008	0,005	0,008	0,010

Fuente: Elaboración propia

#### 2.3.2.4 Estaciones cercanas a termoeléctricas Andina y Mejillones

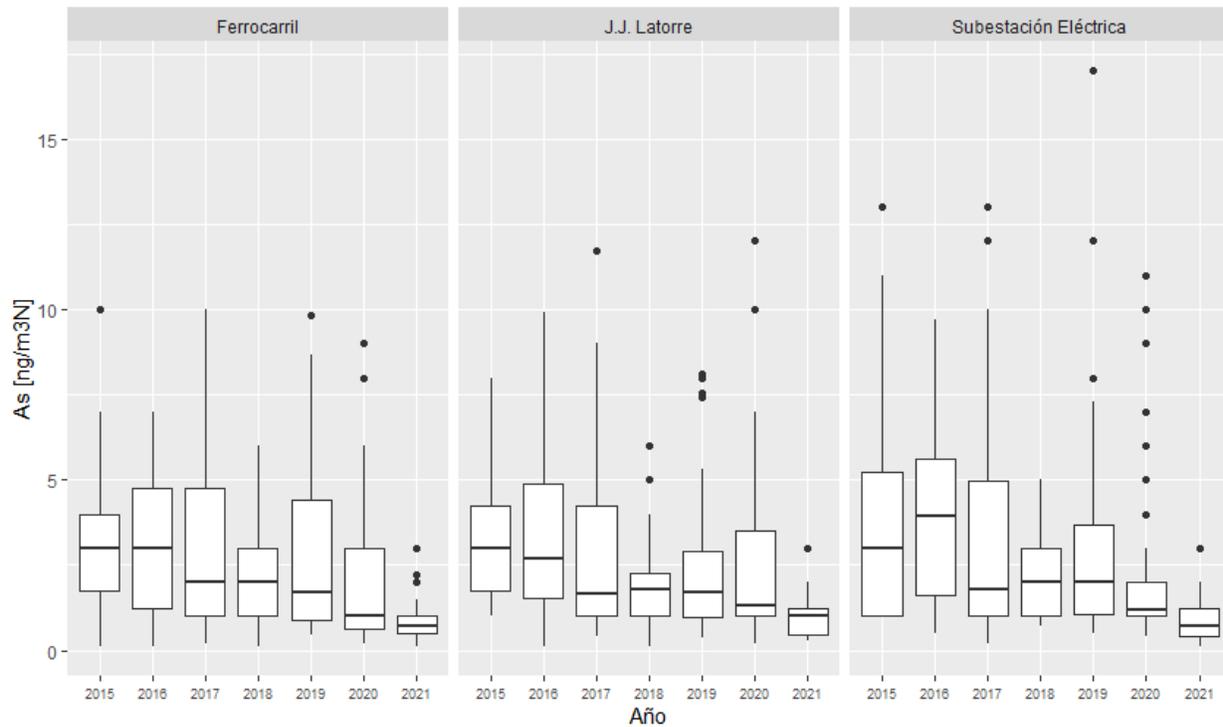
En la Figura 2-15 se muestra la ubicación de las termoeléctricas Andina y Mejillones, donde se observa su ubicación en relación con la ciudad de Mejillones, donde se encuentran las estaciones Ferrocarril, J.J. Latorre y Subestación Eléctrica, todas al suroeste de ambas termoeléctricas. Específicamente se ubican a 5,5, 3,6 y 1,0 km de la termoeléctrica Mejillones respectivamente. En este caso se presentan juntas las estaciones de dos titulares debido a su proximidad dentro de la ciudad de Mejillones.



**Figura 2-15 Mapa termoeléctricas Andina y Mejillones, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas**

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

En la Figura 2-16 se presenta la evolución de la concentración de As medida en todas las estaciones ubicadas en las cercanías de las termoeléctricas Andina y Mejillones, sus estadígrafos resumidos en las siguientes tres tablas. En las tres estaciones se observa una leve tendencia a la disminución de las concentraciones desde 2015 a 2021. Debido a que en esta zona no ha cerrado ninguna central termoeléctrica en el periodo observado, en general no se presentan mayores variaciones. Las pocas variaciones que se observan probablemente tienen que ver con la combinación entre el número limitado de mediciones y la dirección del viento durante las mediciones.



**Figura 2-16 Concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

Para la estación Ferrocarril (ver Tabla 2-30) se observa que las medianas de las concentraciones de As están en el rango de 1 a 3 [ng/m<sup>3</sup>N] entre el 2015 y el 2021, con máximas entre 3 y 10 [ng/m<sup>3</sup>N] para el mismo periodo.

**Tabla 2-30 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Ferrocarril**

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	20	58	58	60	60	54	25
<b>Max.</b>	10	7	10	6	10	9	3
<b>3rd Qu.</b>	4	5	5	3	4	3	1
<b>Mediana</b>	3	3	2	2	2	1	1
<b>Media</b>	3	3	3	2	3	2	1
<b>1st Qu.</b>	2	1	1	1	1	1	1
<b>Min.</b>	0	0	0	0	0	0	0

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de los días 6 de abril de 2016 y 18 de octubre de 2016, correspondientes a 0 [ng/m<sup>3</sup>N] respectivamente, ya que se consideran *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En la estación J.J. Latorre (Tabla 2-31), al igual que en la estación Ferrocarril, se observa que las medianas de las concentraciones de As están en el rango de 1 a 3 [ng/m<sup>3</sup>N] entre los años 2015 y 2021, en este caso con máximas entre 6 y 33 [ng/m<sup>3</sup>N] para el mismo periodo.

**Tabla 2-31 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación J.J. Latorre**

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	16	46	44	47	48	43	20
<b>Max.</b>	8	10	12	6	8	12	3
<b>3rd Qu.</b>	4	5	4	2	3	4	1
<b>Mediana</b>	3	3	2	2	2	1	1
<b>Media</b>	3	3	3	2	2	3	1
<b>1st Qu.</b>	2	2	1	1	1	1	0
<b>Min.</b>	1	0	0	0	0	0	0

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de los días 24 de septiembre de 2015, 9, 24 y 27 de abril de 2016 y 13 de mayo de 2017, correspondientes a 33, 0, 0, 0 y 1 [ng/m<sup>3</sup>N] respectivamente, ya que se consideran *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En la estación Subestación Eléctrica (Tabla 2-32), las medianas de las concentraciones se mantienen en el rango de 1 a 4 [ng/m<sup>3</sup>N] en el periodo con mediciones, con valores máximos medidos de 3 a 17 [ng/m<sup>3</sup>N] desde 2017.

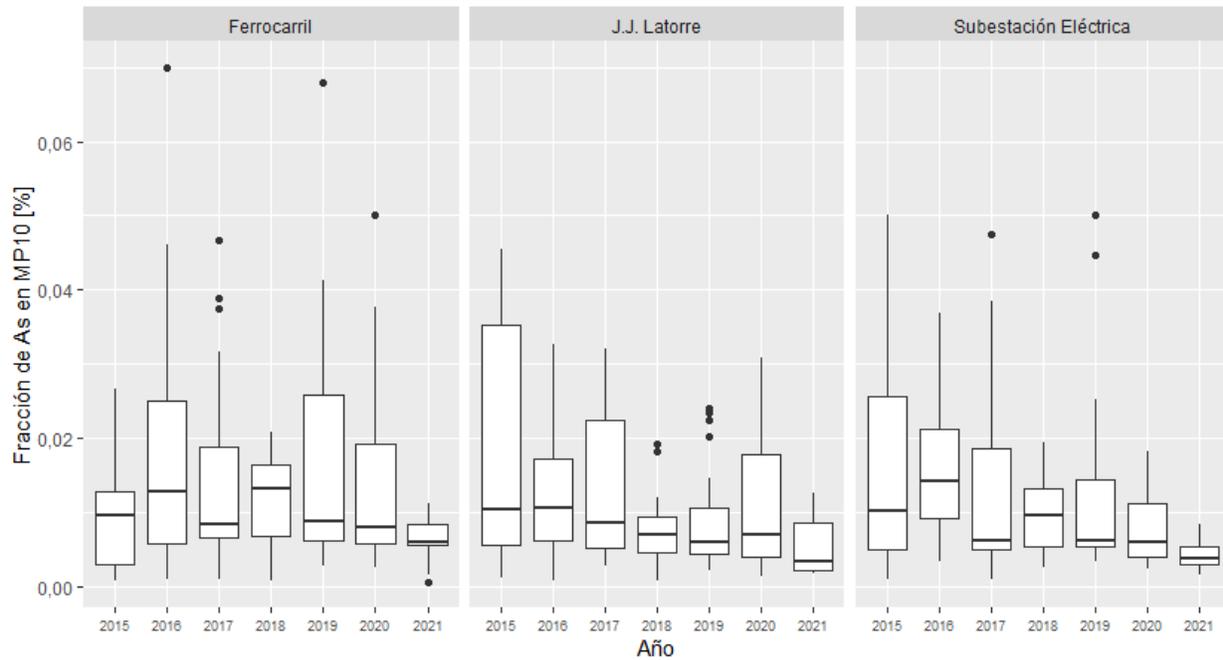
**Tabla 2-32 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Subestación Eléctrica**

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	16	40	47	47	48	42	20
<b>Max.</b>	13	10	13	5	17	11	3
<b>3rd Qu.</b>	5	6	5	3	4	2	1
<b>Mediana</b>	3	4	2	2	2	1	1
<b>Media</b>	4	4	3	2	3	3	1
<b>1st Qu.</b>	1	2	1	1	1	1	0
<b>Min.</b>	1	1	0	1	1	0	0

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de los días 24 de septiembre de 2015, y de los días 6, 9, 15 y 24 de febrero de 2016, correspondientes a 73 [ng/m<sup>3</sup>N], 2.578 [ng/m<sup>3</sup>N], 1.871 [ng/m<sup>3</sup>N], 3.532 [ng/m<sup>3</sup>N] y 2.786 [ng/m<sup>3</sup>N] respectivamente, ya que se consideran *outliers*. Además, se excluyen otros cinco valores, con concentraciones de 0 [ng/m<sup>3</sup>N] por ser considerados *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en la Figura 2-17 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas mediante el muestreo. Se observa que las fracciones de arsénico en MP10 en todas las estaciones se han mantenido relativamente estables a través del tiempo, tendiendo a disminuir levemente los últimos dos años. Los estadígrafos se presentan en la Tabla 2-33, Tabla 2-34 y Tabla 2-35, observándose que para el año 2020 la mediana de la fracción era de 0,009%, 0,008% y 0,006% para las estaciones Ferrocarril, J.J. Latorre y Subestación Eléctrica respectivamente.



**Figura 2-17 Fracción de As en MP10 [%] cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-33 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Ferrocarril**

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	20	57	58	60	60	54	25
<b>Max.</b>	0,035	0,070	0,047	0,021	0,068	0,050	0,020
<b>3rd Qu.</b>	0,016	0,027	0,020	0,016	0,024	0,018	0,008
<b>Mediana</b>	0,010	0,015	0,008	0,010	0,010	0,009	0,006
<b>Media</b>	0,012	0,018	0,015	0,011	0,016	0,014	0,006
<b>1st Qu.</b>	0,005	0,007	0,006	0,006	0,006	0,005	0,004
<b>Min.</b>	0,001	0,000	0,001	0,001	0,003	0,002	0,001

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-34 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación J.J. Latorre**

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	16	46	44	47	48	43	20
<b>Max.</b>	0,045	0,040	0,059	0,029	0,025	0,063	0,013
<b>3rd Qu.</b>	0,025	0,020	0,019	0,009	0,011	0,015	0,007
<b>Mediana</b>	0,011	0,013	0,007	0,007	0,006	0,008	0,004
<b>Media</b>	0,016	0,014	0,013	0,008	0,009	0,012	0,005
<b>1st Qu.</b>	0,006	0,006	0,005	0,005	0,005	0,005	0,003
<b>Min.</b>	0,001	0,001	0,003	0,001	0,002	0,001	0,002

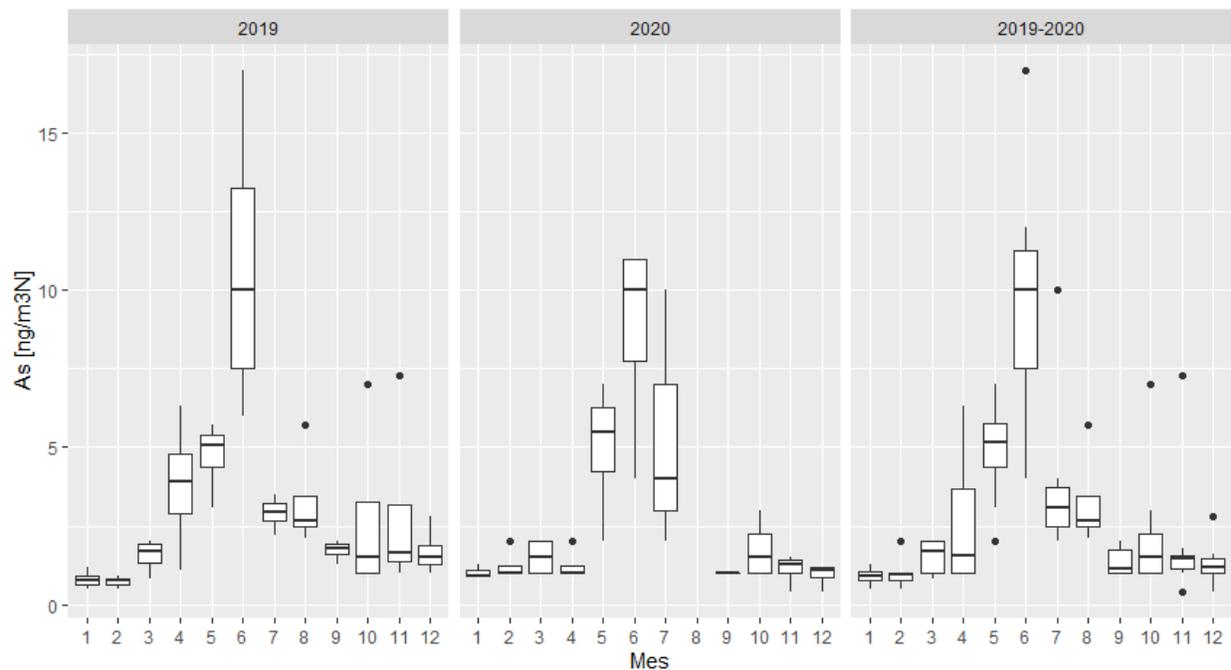
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-35 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Subestación Eléctrica**

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	16	40	47	47	48	42	20
<b>Max.</b>	0,050	0,054	0,048	0,020	0,050	0,023	0,013
<b>3rd Qu.</b>	0,022	0,020	0,019	0,013	0,018	0,010	0,006
<b>Mediana</b>	0,013	0,012	0,008	0,009	0,010	0,006	0,003
<b>Media</b>	0,018	0,016	0,014	0,010	0,014	0,007	0,005
<b>1st Qu.</b>	0,006	0,009	0,005	0,005	0,006	0,003	0,002
<b>Min.</b>	0,001	0,002	0,001	0,003	0,003	0,001	0,001

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 2-18 se presentan las concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] mensualmente para los años 2019, 2020 y ambos en conjunto de la estación Subestación Eléctrica. Se observa que la concentración de As aumenta durante el otoño e invierno en dichos años, siendo mayor entre los meses de marzo y agosto, tanto en el valor de la mediana como en los valores máximos.

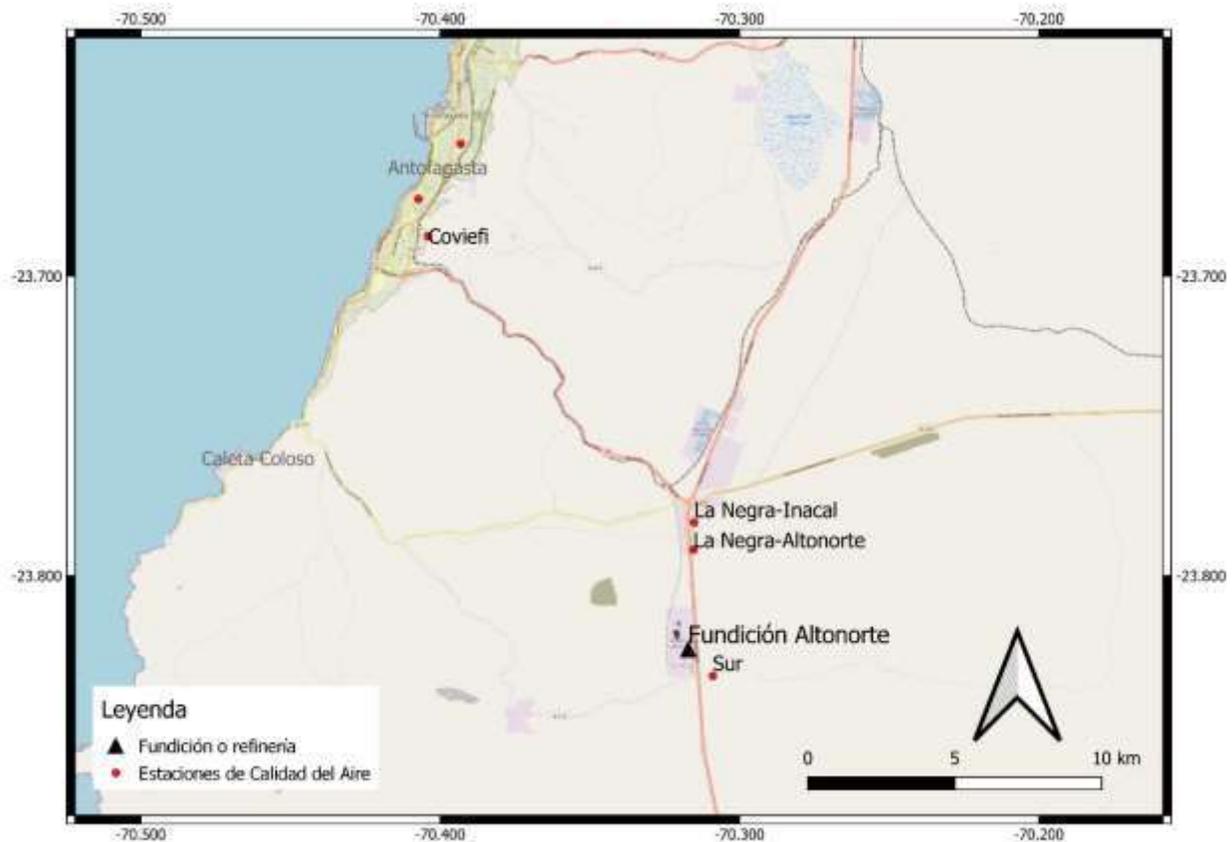


**Figura 2-18 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N], cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Subestación Eléctrica**

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.2.5 Estaciones cercanas a fundición Altonorte

En la Figura 2-19 se muestra la ubicación de la fundición Altonorte, donde se observa que su localidad más cercana es La Negra, y la ciudad más cercana es Antofagasta. Respecto de las estaciones de monitoreo se observa que la estación más cercana es la Sur que se encuentra a 1,4 kilómetros al sureste de la fundición. Le siguen en cercanía la estación La Negra-Altonorte y la estación La Negra-Inacal a 3,5 kilómetros al norte y 4,5 kilómetros, respectivamente, y por último la estación Coviefi (ubicada en Antofagasta) a 17,5 kilómetros en dirección noroeste.



**Figura 2-19 Mapa fundición Altonorte, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas**

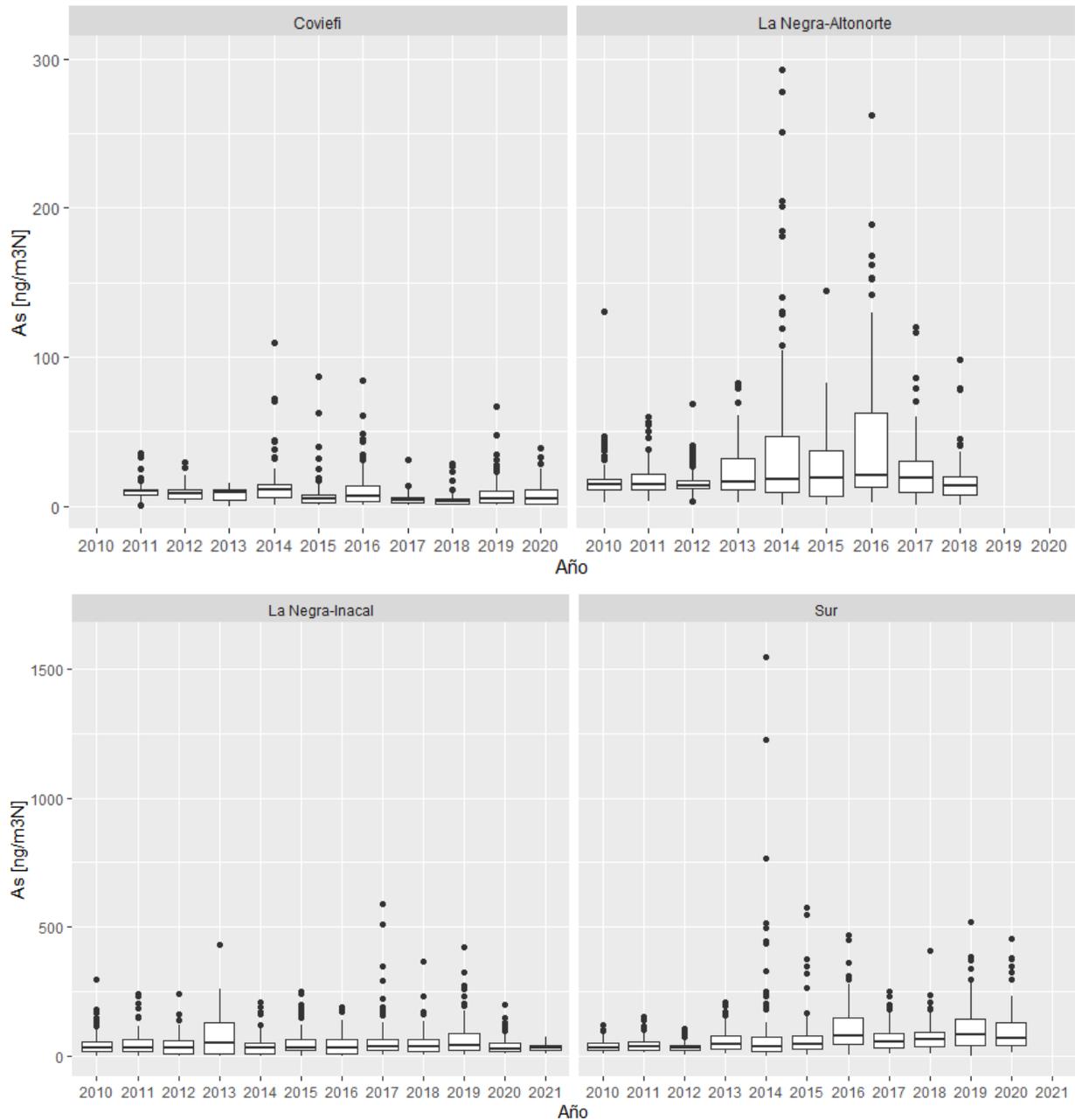
Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

En la Figura 2-20 se presenta la evolución de las concentraciones de As medidas en las estaciones Coviefi, La Negra-Altonorte, La Negra-Inacal y Sur, ubicadas en las cercanías de Altonorte. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 2-36, la Tabla 2-37, Tabla 2-38 y la Tabla 2-39, respectivamente.

Cuando se publicó la norma de emisión (D.S. 28/2013 del MMA), Altonorte ya contaba con una planta de ácido de doble contacto, por lo que de acuerdo la regulación debía cumplir con los límites establecidos en la norma de emisión a partir de diciembre 2016. En general en todas las estaciones menos La Negra-Inacal se observa una disminución de los estadígrafos entre el año 2016 y 2017, disminución que no es constante en el tiempo ya que en la estación Coviefi, el año 2019 las concentraciones aumentan hasta niveles levemente inferiores a los del año 2016, mientras que en la estación Sur sucede lo mismo, pero a partir del año 2018. Debido a que La Negra – Altonorte no tiene mediciones luego del año 2018, no es posible saber si hubo un aumento en las concentraciones de la zona luego de dicho año.

De las cuatro estaciones, se observa que los valores de la estación Sur son los mayores y los de las estaciones en La Negra son sistemáticamente mayores que los valores de la estación de Coviefi. Lo anterior está dentro de lo esperado considerando la distancia de las estaciones respecto de la fundición Altonorte (ver Figura 2-19) y que la estación Sur recibe vientos principalmente desde la dirección de la fundición (ver Anexo de la Sección 10.3.2). Cabe destacar que se observan diferencias relevantes entre ambas estaciones de La Negra, las cuales se explicarían por la altura de la captura. Adicionalmente cabe destacar que la estación de La Negra-Altonorte no cuenta con mediciones para los últimos años producto de problemas de operación de la estación.

Se observa también que los valores se han mantenido relativamente estables en el tiempo, lo que se relaciona con la relativa estabilidad de las emisiones estimadas durante el período (ver Figura 3-7 de la Sección 3.3.1) debido a la operación regular de la fundición sólo con periodos de mantención normales, con la excepción de la estación La Negra – Altonorte, donde se presenta una mayor dispersión entre los años 2013 y 2017. Cabe destacar que la fundición Altonorte ya cumplía con la mayor parte de las exigencias establecidas en la Norma del año 2013, por lo cual fueron necesarias solo modificaciones menores en comparación las otras fundiciones.



Nota 1: Estaciones La Negra-Inacal y Sur se muestran en escala diferente.

Nota 2: En estación Sur no se muestra valor 9.335 ng/m³N, reportado el 28 de junio 2014, ni 2.762 ng/m³N del 21 de junio de 2014.

**Figura 2-20 Concentraciones de As en MP10 [ng/m³N] en cercanías fundición Altonorte, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la estación Coviefi (ver Tabla 2-36) se observa que las medianas de las concentraciones de As se han mantenido en el rango entre 3 y 11 [ng/m³N], observándose que en los últimos dos años de la serie los estadígrafos se han mantenido con desviaciones menores y una mediana de 5 [ng/m³N].

**Tabla 2-36 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Altonorte, estación Coviefi**

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	122	110	110	99	90	119	98	101	104	93	0
<b>Max.</b>	S/I	35	30	15	110	87	84	31	29	67	39	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/I	11	11	11	15	8	14	6	5	10	11	S/I
<b>Mediana</b>	S/I	10	9	9	11	5	7	4	3	5	5	S/I
<b>Media</b>	S/I	10	9	8	15	8	11	5	4	8	8	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/I	7	5	4	6	2	3	2	1	2	2	S/I
<b>Min.</b>	S/I	1	2	0	1	1	0	1	1	1	1	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Nota: Se excluyen los valores 167 y 2.621 [ng/m<sup>3</sup>N], correspondientes a los días 1 y 4 de abril de 2015, el valor 276 [ng/m<sup>3</sup>N] del día 6 de mayo de 2017 y el valor 235 [ng/m<sup>3</sup>N] del día 29 de julio de 2017, ya que se consideran *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En la estación La Negra-Altonorte (ver Tabla 2-37) se observa que las medianas de las concentraciones de As se han mantenido relativamente estables durante todo el periodo entre 13 y 21 [ng/m<sup>3</sup>N]. Respecto a los valores máximos, se observa una dispersión relevante desde los 60 [ng/m<sup>3</sup>N] del año 2011, a valores casi 5 veces superiores, alcanzando los 293 [ng/m<sup>3</sup>N] el año 2014. Si bien, no se observa una tendencia al aumento o reducción en los valores de la mediana ni en los rangos de valores de los cuartiles, se observa que en general se mantienen dentro de un rango similar de valores. Esta estación no ha tenido nuevas mediciones desde el año 2018 debido a problemas de energía.

**Tabla 2-37 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Altonorte**

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	122	121	122	122	110	116	119	113	45	0	0	0
<b>Max.</b>	131	60	69	83	293	145	262	120	98	S/I	S/I	S/I
<b>3rd Qu.</b>	18	22	17	32	47	38	63	30	20	S/I	S/I	S/I
<b>Mediana</b>	15	15	13	16	18	19	21	19	14	S/I	S/I	S/I
<b>Media</b>	17	18	15	24	43	26	42	24	20	S/I	S/I	S/I
<b>1st Qu.</b>	11	11	12	11	9	7	13	9	8	S/I	S/I	S/I
<b>Min.</b>	2	3	3	3	1	1	2	1	1	S/I	S/I	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año debido a problemas de energía.

Nota: Se excluyen los valores de los días 4 de octubre de 2014, 9 de agosto de 2015 y 17 de octubre de 2015, correspondientes a 1 [ng/m<sup>3</sup>N], ya que se consideran *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En la estación La Negra-Inacal (ver Tabla 2-38) se observa que las medianas de las concentraciones de As se han mantenido relativamente estable durante todo el periodo entre 28 y 50 [ng/m<sup>3</sup>N]. Respecto a los valores máximos, se observa también una relativa estabilidad en el tiempo, con excepciones en los años 2013, 2017 y 2019. Si bien, no se observa una tendencia

al aumento o reducción en los valores de la mediana ni en los rangos de valores de los cuartiles, se observa que en general se mantienen dentro de un rango similar de valores.

**Tabla 2-38 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Inacal**

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	119	103	105	104	122	120	107	107	108	109	110	42
<b>Max.</b>	296	240	240	430	210	250	190	590	367	421	199	73
<b>3rd Qu.</b>	57	63	60	130	50	63	65	64	66	85	50	42
<b>Mediana</b>	31	30	30	50	30	30	30	35	38	40	28	32
<b>Media</b>	45	48	41	76	40	52	46	61	52	68	42	34
<b>1st Qu.</b>	17	20	10	10	10	20	10	20	18	20	18	21
<b>Min.</b>	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	8	10

Fuente: Elaboración propia

En la estación Sur (ver Tabla 2-39) se observa que la mediana de las concentraciones, desde el año 2015, se ubica en el rango entre 43 y 84 [ng/m<sup>3</sup>N]. En general, tampoco se observa una tendencia clara al alza o reducción de los estadígrafos descriptores de las concentraciones de Arsénico, manteniéndose relativamente estables. En el año 2014 se observa una concentración de arsénico inusualmente alta. Esto se debería a las altas concentraciones de arsénico que se presentaron durante el mes de junio de dicho año, en donde todas las estaciones registraron mayores concentraciones en reiteradas ocasiones a lo largo del mes. Esto se podría explicar por una mayor entrada de concentrados de cobre a la fundición con un porcentaje más alto de arsénico durante esa fecha, además de corresponder a un mes de invierno, lo que es desfavorable debido al efecto de inversión térmica. Se destaca que aún fuera de la máxima y su efecto en la media, los demás estadígrafos presentan valores bajos que los años adyacentes.

**Tabla 2-39 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Altonorte, estación Sur**

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	119	115	102	120	115	117	118	114	116	114	95	0
<b>Max.</b>	120	152	105	208	9.335	574	469	252	408	522	455	S/I
<b>3rd Qu.</b>	49	53	42	78	7	78	146	86	92	141	129	S/I
<b>Mediana</b>	31	37	31	47	36	43	79	55	65	84	70	S/I
<b>Media</b>	36	44	34	61	202	70	108	64	74	103	103	S/I
<b>1st Qu.</b>	20	23	21	26	19	26	46	32	35	39	40	S/I
<b>Min.</b>	7	11	3	8	1	2	2	6	6	1	11	S/I

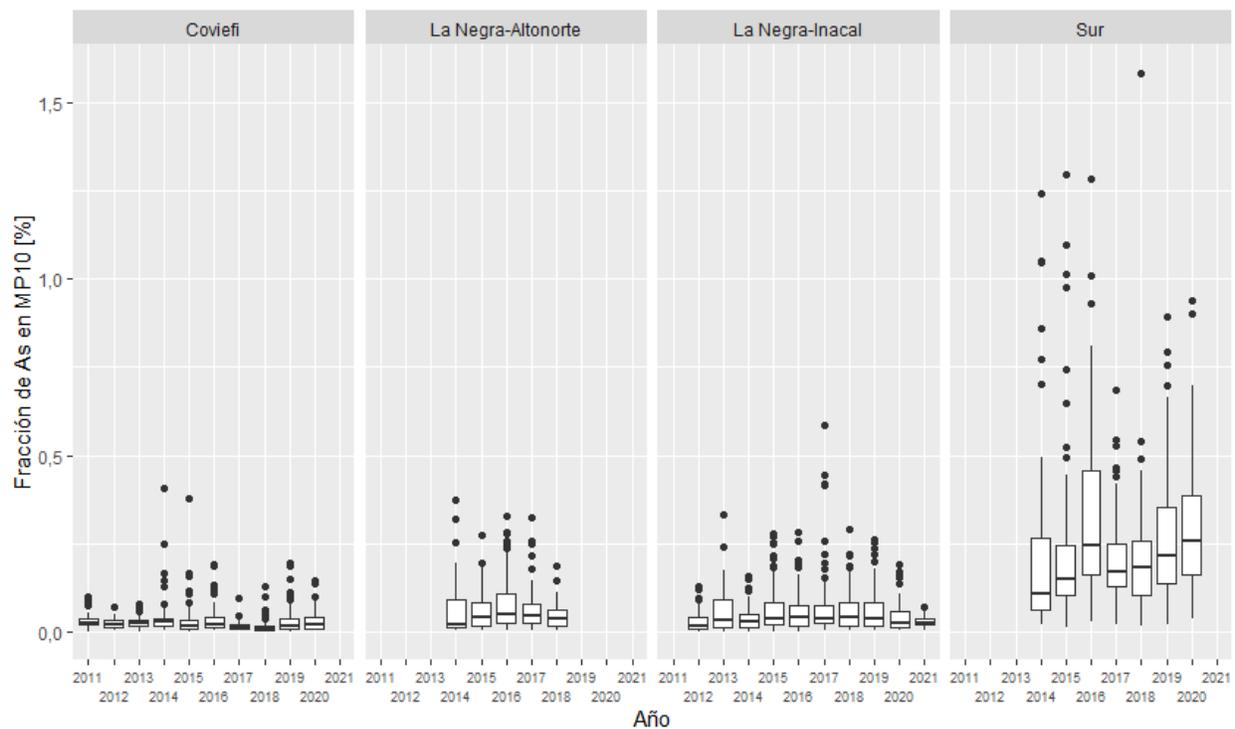
S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Nota: Se excluyen diez valores, con concentraciones entre 1 y 5 [ng/m<sup>3</sup>N], por ser considerados *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-21 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas mediante el muestreo. En general los valores se mantienen estables a través del tiempo, exceptuando los valores de la estación Sur, en donde se observan pequeñas variaciones interanuales, tendiendo a aumentar. Los estadígrafos se presentan en la Tabla 2-40, Tabla 2-41, Tabla 2-42 y Tabla 2-43, observándose que para el año 2020 la mediana de la fracción era de

0,021%, 0,026% y 0,258% para las estaciones Coviefi, La Negra-Inacal y Sur, respectivamente, mientras que la estación La Negra-Altonorte no cuenta con datos para dicho año. La elevada fracción observada en la estación Sur es coherente con la cercanía y dirección del viento, además de encontrarse lejos, al menos en comparación, de otras fuentes industriales como las ubicadas en La Negra.



Nota: En estación Sur no se muestran los valores 5,946% y 2,786%, correspondientes a los días 7 y 12 de junio de 2014 respectivamente.

**Figura 2-21 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Altonorte, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-40 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Altonorte, estación Coviefi**

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	122	110	110	87	90	119	98	100	104	83	0
<b>Max.</b>	S/I	0,098	0,071	0,081	0,407	0,378	0,193	0,095	0,128	0,197	0,144	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/I	0,037	0,032	0,033	0,039	0,034	0,042	0,021	0,017	0,038	0,042	S/I
<b>Mediana</b>	S/I	0,026	0,022	0,024	0,030	0,017	0,021	0,014	0,009	0,019	0,021	S/I
<b>Media</b>	S/I	0,029	0,024	0,026	0,041	0,030	0,034	0,016	0,015	0,028	0,030	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/I	0,020	0,014	0,018	0,017	0,007	0,011	0,007	0,005	0,008	0,010	S/I
<b>Min.</b>	S/I	0,002	0,003	0,000	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,000	0,002	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-41 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Altonorte**

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021 <sup>1</sup>
N	0	0	0	0	44	116	118	112	45	0	0	0
Max.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,372	0,275	0,329	0,323	0,186	S/I	S/I	S/I
3rd Qu.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,090	0,084	0,109	0,078	0,064	S/I	S/I	S/I
Mediana	S/C	S/C	S/C	S/C	0,021	0,040	0,050	0,044	0,038	S/I	S/I	S/I
Media	S/C	S/C	S/C	S/C	0,069	0,056	0,077	0,056	0,047	S/I	S/I	S/I
1st Qu.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,012	0,016	0,026	0,023	0,018	S/I	S/I	S/I
Min.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,003	0,002	0,004	0,005	0,005	S/I	S/I	S/I

1. Sin energía debido al uso de la energía que abastece a la estación por parte de terceros.

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, dado que no se pudo realizar un cruce de información entre las mediciones de As y de MP10.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-42 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Inacal**

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	0	103	104	122	110	101	107	108	96	110	42
Max.	S/C	S/C	0,128	0,331	0,156	0,279	0,284	0,585	0,291	0,263	0,190	0,069
3rd Qu.	S/C	S/C	0,041	0,092	0,051	0,083	0,076	0,073	0,081	0,083	0,057	0,035
Mediana	S/C	S/C	0,016	0,032	0,028	0,039	0,041	0,037	0,041	0,037	0,026	0,024
Media	S/C	S/C	0,028	0,055	0,036	0,061	0,057	0,069	0,058	0,061	0,040	0,028
1st Qu.	S/C	S/C	0,009	0,011	0,012	0,020	0,018	0,023	0,016	0,018	0,014	0,020
Min.	S/C	S/C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,004	0,002	0,006	0,005

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, dado que no se pudo realizar un cruce de información entre las mediciones de As y de MP10.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-43 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Altonorte, estación Sur**

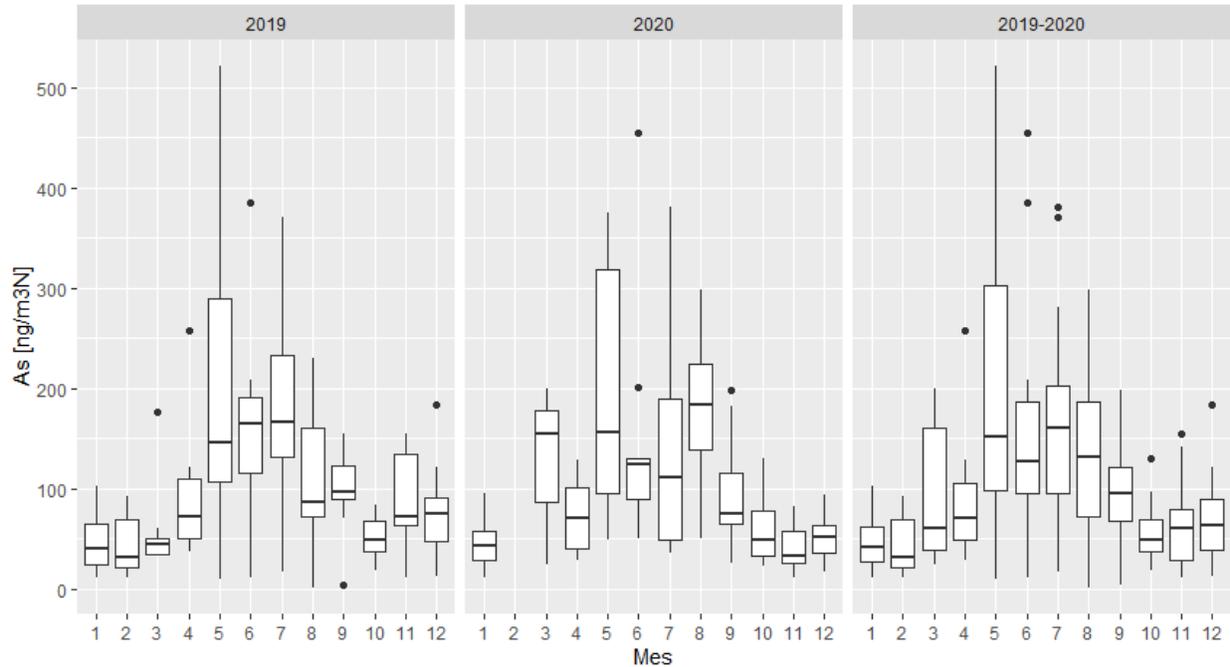
Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	0	0	0	0	56	117	118	113	116	114	95	0
Max.	S/C	S/C	S/C	S/C	5,946	1,294	1,281	0,683	1,583	0,893	0,940	S/I
3rd Qu.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,322	0,246	0,455	0,248	0,255	0,355	0,386	S/I
Mediana	S/C	S/C	S/C	S/C	0,110	0,148	0,246	0,172	0,184	0,217	0,258	S/I
Media	S/C	S/C	S/C	S/C	0,374	0,216	0,321	0,197	0,200	0,271	0,308	S/I
1st Qu.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,062	0,105	0,163	0,127	0,102	0,138	0,163	S/I
Min.	S/C	S/C	S/C	S/C	0,021	0,012	0,029	0,020	0,017	0,019	0,036	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, dado que no se pudo realizar un cruce de información entre las mediciones de As y de MP10.

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 2-22 se presentan las concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] mensualmente para los años 2019, 2020 y ambos en conjunto de la estación Sur, estación más cercana a la fundición. Se observa que la concentración de As aumenta durante el invierno en dichos años, siendo mayor entre los meses de mayo y septiembre, tanto en el valor de la mediana como en los valores máximos.



**Figura 2-22 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m3N], cercanías fundición Altonorte, estación Sur**

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.2.6 Estaciones cercanas a fundición Potrerillos

En la Figura 2-23 se muestra la ubicación de la fundición Potrerillos, donde se observa que su localidad más cercana es El Salvador, donde se encuentra la estación de monitoreo Cine Inca. Respecto de las estaciones de monitoreo, se observa que la estación más cercana es Doña Inés, ubicada en la misma fundición. Le sigue en cercanía la estación CAP, a 2,7 kilómetros al noroeste de la fundición. Por último, se encuentran las estaciones Intelec y Cine Inca, a 21,4 y 25,5 kilómetros respectivamente, también en dirección noroeste. Cabe destacar que ninguna de las estaciones cercanas a esta fundición tiene representatividad poblacional.



**Figura 2-23 Mapa fundición Potrerillos, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas**

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

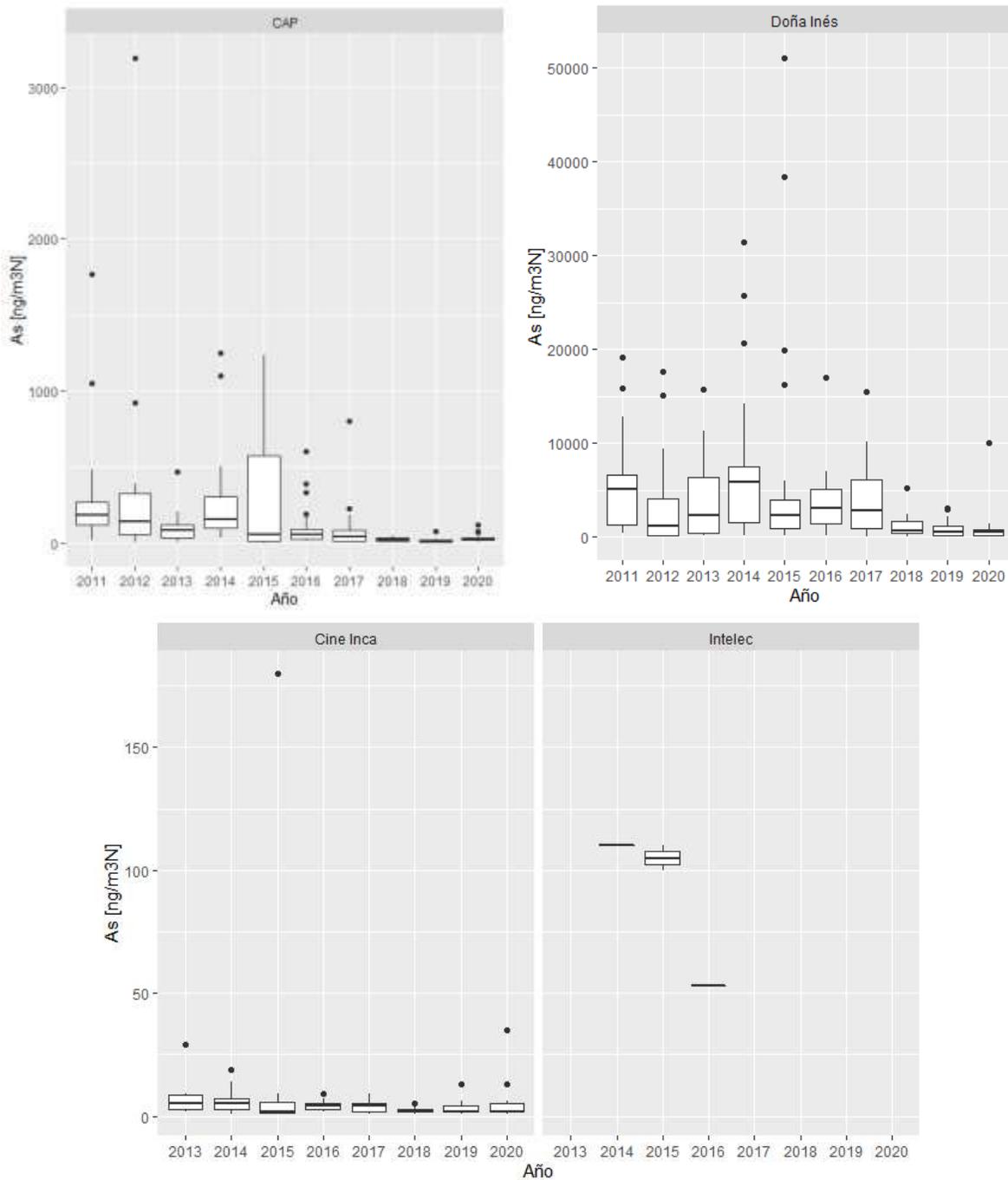
En la Figura 2-24 se presenta la evolución de la concentración de As medida en todas las estaciones ubicadas en las cercanías de Potrerillos, mientras que sus estadígrafos están resumidos en las siguientes cuatro tablas.

Cuando se publicó la norma de emisión (D.S. 28/2013 del MMA), Potrerillos no contaba con plantas de ácido de doble contacto, por lo que de acuerdo con la regulación debía cumplir las exigencias de los límites de emisión establecidos por la norma a partir de diciembre 2018. Por lo tanto, la fundición tuvo obras asociadas a la instalación de tecnologías para cumplir con los límites a partir de diciembre del 2018, lo cual significó una baja en los niveles de producción, con una producción de finos de cobre durante el 2019 cercana a la mitad de los producido durante el 2018. Lo anterior se refleja en los estadígrafos donde se observan menores concentraciones en el año 2019 en las estaciones CAP y Doña Inés.

La estación Doña Inés presenta concentraciones muy superiores al resto de las estaciones debido a que se ubica en la fundición misma. Luego le sigue la estación CAP con concentraciones mayores a Cine Inca e Intelec debido a su mayor cercanía con la fundición y a que el viento en esta zona

viene predominantemente desde el sureste (ver Anexo de la Sección 10.3.3). Es fundamental resaltar la baja cantidad de observaciones por año con aproximadamente dos mediciones mensuales en las estaciones CAP, Doña Inés y Cine Inca, mientras que las mediciones en la estación Intelec son esporádicas, con cuatro mediciones en total entre los años 2014 y 2016.

Respecto a la serie de concentraciones se observa que el año 2018 hay una relevante disminución en las concentraciones de arsénico medidas. Al respecto cabe estacar que las emisiones de arsénico reportadas para dicho año, si bien son menores a las reportadas al año anterior, aún no alcanzaban los niveles significativamente menores reportados durante los años 2019 y 2020 (ver Figura 3-23 de la Sección 3.3.3). Al respecto se destaca que durante los años 2019 y 2020 ha habido meses con reporte de balances negativos, lo cual sugiere posibles problemas en el reporte de los datos, se destaca, sin embargo, que los reportes han cumplido con la normativa vigente.



Nota 1: En estación CAP no se muestran los valores 12.330 ng/m3N reportado con fecha 14 de julio de 2012, 8.760 ng/m3N reportado con fecha 17 de julio de 2012 y 7.644 ng/m3N, reportado con fecha del 2 de agosto de 2013.

Nota 2: Notar que las gráficas de las estaciones presentan escalas diferentes, sólo Cine Inca e Intelec usan la misma escala.

**Figura 2-24 Concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías fundición Potrerillos, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

Para la estación CAP (ver Tabla 2-44) se observa avances consistentes en la reducción de las concentraciones, especialmente a partir del año 2014, las cuales se acentúan en el periodo 2018-2020. De esta forma, se observan concentraciones con medianas en el rango de 41 a 180 [ng/m<sup>3</sup>N] desde 2011 a 2017, mientras que entre los años 2018 y 2020 las medianas de las concentraciones varían entre 9 y 25 [ng/m<sup>3</sup>N]. Cabe destacar que la cantidad de mediciones para esta estación son muy bajas, ya que se realizan únicamente dos mediciones al mes. Adicionalmente el consultor no contó con datos disponibles para el año 2021.

**Tabla 2-44 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Potrerillos, estación CAP**

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	24	24	23	24	22	24	24	24	22	23	0
<b>Max.</b>	1.770	12.330	7.644	1.251	1.234	605	801	51	73	118	S/I
<b>3rd Qu.</b>	270	360	134	307	633	92	85	31	16	34	S/I
<b>Mediana</b>	180	150	85	151	61	56	41	20	9	25	S/I
<b>Media</b>	293	1.295	422	266	316	108	92	22	14	30	S/I
<b>1st Qu.</b>	115	62	35	97	14	29	12	9	5	16	S/I
<b>Min.</b>	20	2	3	31	2	15	3	3	2	5	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de los días 7 de enero de 2013, 19 de agosto y 18 de octubre de 2015, correspondientes a 2, 1 y 1 [ng/m<sup>3</sup>N] respectivamente, ya que se consideran *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En la estación Cine Inca (Tabla 2-45), las medianas de las concentraciones de As se mantienen en el rango de 2 a 5 [ng/m<sup>3</sup>N] para los años con datos, con valores máximos medidos en el orden de 9 a 35 [ng/m<sup>3</sup>N], exceptuando el año 2015 en que se observa una medición de 180 [ng/m<sup>3</sup>N]. Esta es la estación con concentraciones de arsénico más consistentes, aun así, a grandes rasgos se observa una tendencia a una reducción en las concentraciones de arsénico. Nuevamente es relevante destacar que los datos reportados se basan en una muestra pequeña en comparación con estaciones de otras zonas con fundiciones, con una frecuencia aproximada de dos mediciones mensuales.

**Tabla 2-45 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Potrerillos, estación Cine Inca**

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	18	20	19	24	15	17	20	22	0
<b>Max.</b>	S/I	S/I	29	19	180	9	9	5	13	35	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/I	S/I	9	7	6	5	5	3	4	5	S/I
<b>Mediana</b>	S/I	S/I	5	5	2	4	4	2	2	2	S/I
<b>Media</b>	S/I	S/I	7	6	13	4	4	3	3	5	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/I	S/I	3	3	2	3	2	2	2	2	S/I
<b>Min.</b>	S/I	S/I	2	1	1	2	1	1	1	1	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

Para la estación Doña Inés (ver Tabla 2-46) se observan concentraciones de valores altos para As, en comparación con las otras estaciones de medición. Aun así, se observa cambios a partir del año 2018, con medianas en el rango de 1.135 a 5.774 [ng/m<sup>3</sup>N] desde 2011 a 2017, mientras que entre los años 2018 y 2020 las medianas varían entre 551 y 675 [ng/m<sup>3</sup>N]. Cabe destacar que la cantidad de mediciones para esta estación son muy bajas y que a la fecha no se cuenta con mediciones disponibles para el año 2021.

**Tabla 2-46 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Potrerillos, estación Doña Inés**

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	24	22	22	22	22	22	24	22	22	18	0
<b>Max.</b>	19.100	17.610	15.710	31.429	51.116	16.962	15.455	5.162	3.080	10.070	S/I
<b>3rd Qu.</b>	6.550	4.063	6.350	7.428	3.936	5.118	6.132	1.601	1.119	808	S/I
<b>Mediana</b>	5.100	1.135	2.262	5.774	2.244	3.066	2.832	675	529	551	S/I
<b>Media</b>	5.642	3.583	3.823	7.606	7.329	3.775	3.867	1.057	827	1.056	S/I
<b>1st Qu.</b>	1.300	180	436	1.484	889	1.336	852	338	134	144	S/I
<b>Min.</b>	400	20	98	112	143	95	20	44	26	21	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2-47 se muestran los estadígrafos para la estación Intelec. Los datos descritos corresponden sólo a cuatro mediciones puntuales en el período 2014-2016, lo cual no permite realizar ningún tipo de análisis estadístico.

**Tabla 2-47 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Potrerillos, estación Intelec**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0
<b>Max.</b>	S/I	S/I	110	110	53	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/I	S/I	110	108	53	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
<b>Mediana</b>	S/I	S/I	110	105	53	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
<b>Media</b>	S/I	S/I	110	105	53	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/I	S/I	110	103	53	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
<b>Min.</b>	S/I	S/I	110	100	53	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I

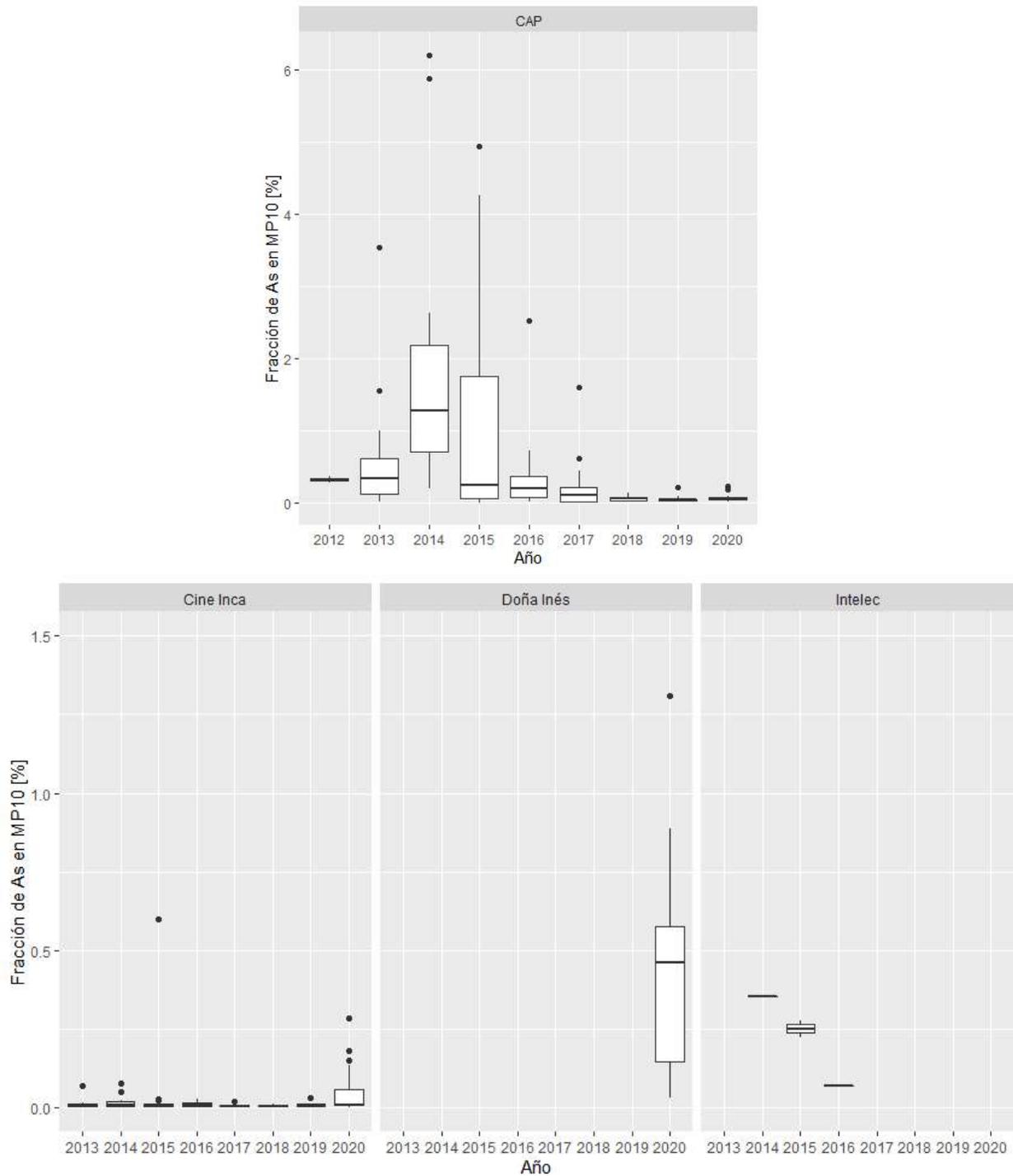
S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-25 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas mediante los muestreos. Los estadígrafos se presentan en las cuatro tablas posteriores<sup>10</sup>. Se observa que las fracciones estimadas para CAP tienen concentraciones medianas de As más altas que las otras estaciones para todo el periodo de estudio, las que van desde 5 veces el valor de la estación Cine Inca (en el año 2019) hasta 89 veces, diferencia observada en 2014, el año en el

<sup>10</sup> Para la estación Doña Inés fue posible hacer este análisis sólo para el año 2020, debido a que no se dispone de información de mediciones de MP10 en los años anteriores.

que se observa la mayor concentración mediana de As para la estación CAP. Esto es esperable considerando que la estación CAP es la que se encuentra más cerca de la fundición, sumado a que la dirección predominante del viento es del Sureste, donde se encuentra la fundición (ver Anexo de la Sección 10.3.3). De esta forma, la contribución de la fundición respecto del total del MP10 se espera que sea mayor a la observada en otras estaciones, lo cual se refleja en una mayor fracción de arsénico en el MP10. Situación similar ocurre con Doña Inés donde en el año 2020 la fracción mediana es cercana a 0,5%, lo cual es incluso mayor que la fracción de CAP, lo cual indica que la contribución de la fundición al MP10 en dicha estación es aún mayor. Pese a lo anterior, la descripción debe considerar que se cuenta con una baja cantidad de muestreos por año, esto al compararlo con otras zonas con fundición.



Nota: Para la estación Doña Inés fue posible hacer este análisis sólo para el año 2020 debido a que no se dispone de información de mediciones de MP10 para los demás años.

Nota 2: En estación Doña Inés no se muestra el valor 7,042% correspondiente al día 28 de abril de 2020.

**Figura 2-25 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Potrerillos, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-48 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Potrerillos, estación CAP**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	2	23	24	22	24	24	24	22	23	0
<b>Max.</b>	0,368	3,539	6,203	4,936	2,521	1,602	0,131	0,209	0,236	S/I
<b>3rd Qu.</b>	0,346	0,619	1,887	1,832	0,372	0,218	0,071	0,051	0,076	S/I
<b>Mediana</b>	0,324	0,334	0,891	0,305	0,201	0,101	0,054	0,038	0,052	S/I
<b>Media</b>	0,324	0,524	1,483	1,149	0,334	0,207	0,057	0,046	0,071	S/I
<b>1st Qu.</b>	0,302	0,142	0,470	0,081	0,080	0,022	0,030	0,025	0,039	S/I
<b>Min.</b>	0,281	0,012	0,194	0,010	0,019	0,007	0,010	0,008	0,012	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-49 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Potrerillos, estación Cine Inca**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	18	17	19	24	15	17	20	22	0
<b>Max.</b>	S/I	0,069	0,079	0,600	0,027	0,020	0,012	0,031	0,284	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/I	0,013	0,022	0,013	0,016	0,011	0,008	0,012	0,059	S/I
<b>Mediana</b>	S/I	0,006	0,010	0,008	0,009	0,007	0,006	0,007	0,009	S/I
<b>Media</b>	S/I	0,012	0,018	0,040	0,011	0,008	0,007	0,009	0,049	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/I	0,005	0,007	0,004	0,006	0,005	0,005	0,006	0,008	S/I
<b>Min.</b>	S/I	0,004	0,004	0,002	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-50 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Potrerillos, estación Doña Inés**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0
<b>Max.</b>	S/I	7,042	S/I							
<b>3rd Qu.</b>	S/I	0,664	S/I							
<b>Mediana</b>	S/I	0,489	S/I							
<b>Media</b>	S/I	0,810	S/I							
<b>1st Qu.</b>	S/I	0,150	S/I							
<b>Min.</b>	S/I	0,030	S/I							

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

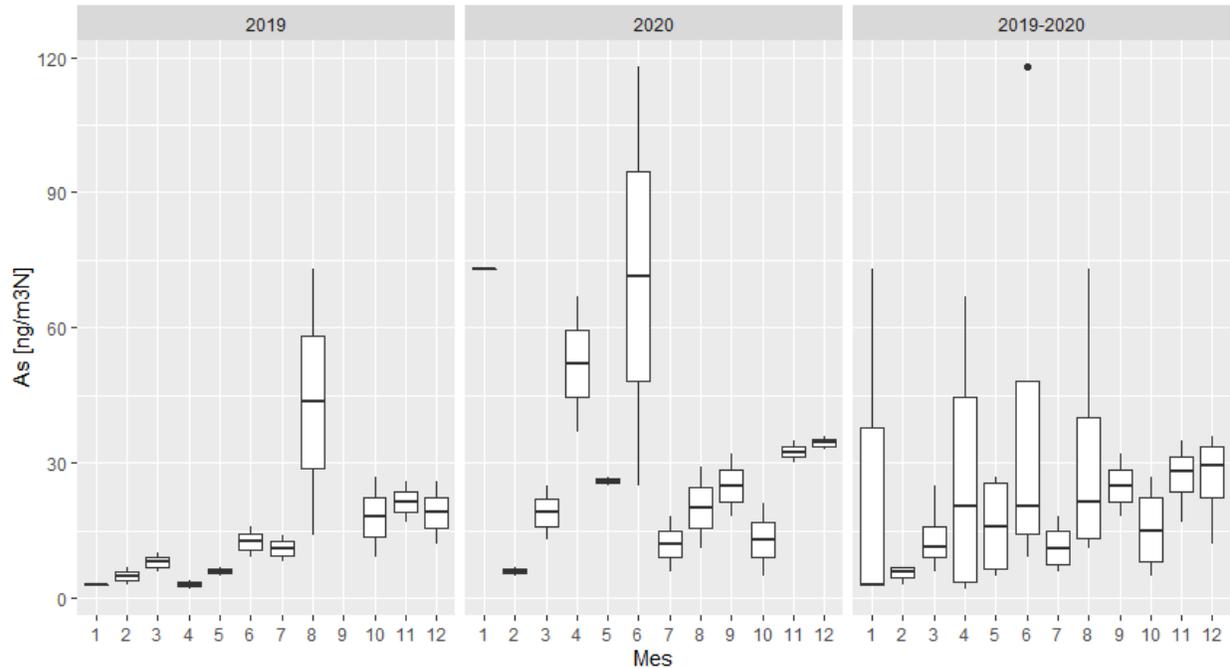
**Tabla 2-51 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Potrerillos, estación Intelec**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0
<b>Max.</b>	S/I	S/I	0,355	0,278	0,071	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/I	S/I	0,355	0,264	0,071	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
<b>Mediana</b>	S/I	S/I	0,355	0,251	0,071	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
<b>Media</b>	S/I	S/I	0,355	0,251	0,071	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/I	S/I	0,355	0,238	0,071	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
<b>Min.</b>	S/I	S/I	0,355	0,224	0,071	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la siguiente Figura 2-26 se presentan las concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] mensualmente para los años 2019, 2020 y ambos en conjunto de la estación CAP, estación más cercana a la fundición (sin considerar la estación Doña Inés, la cual registra mediciones en un orden de magnitud mayor). No se observa una tendencia estacional clara, lo que puede deberse a la baja cantidad de mediciones disponibles.



**Figura 2-26 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N], cercanías fundición Potrerillos, estación CAP**

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.2.7 Estaciones cercanas a fundición Hernán Videla Lira

En la Figura 2-27 se muestra la ubicación de la fundición Hernán Videla Lira, donde se observa que su localidad más cercana es Paipote y su ciudad más cercana es Copiapó. Respecto de las estaciones de monitoreo, se observa que la estación más cercana es Paipote, que se encuentra 1,5 kilómetros al noroeste de la fundición. Le sigue en cercanía la estación San Fernando, la cual se encuentra a 5 kilómetros también en dirección noroeste. Hacia el sur de la fundición se encuentra la estación Tierra Amarilla, a una distancia de 5,7 kilómetros. Por último, se puede observar también la estación Copiapó, la cual se encuentra a 9,7 kilómetros en dirección noroeste.



**Figura 2-27 Mapa fundición Hernán Videla Lira, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas**

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

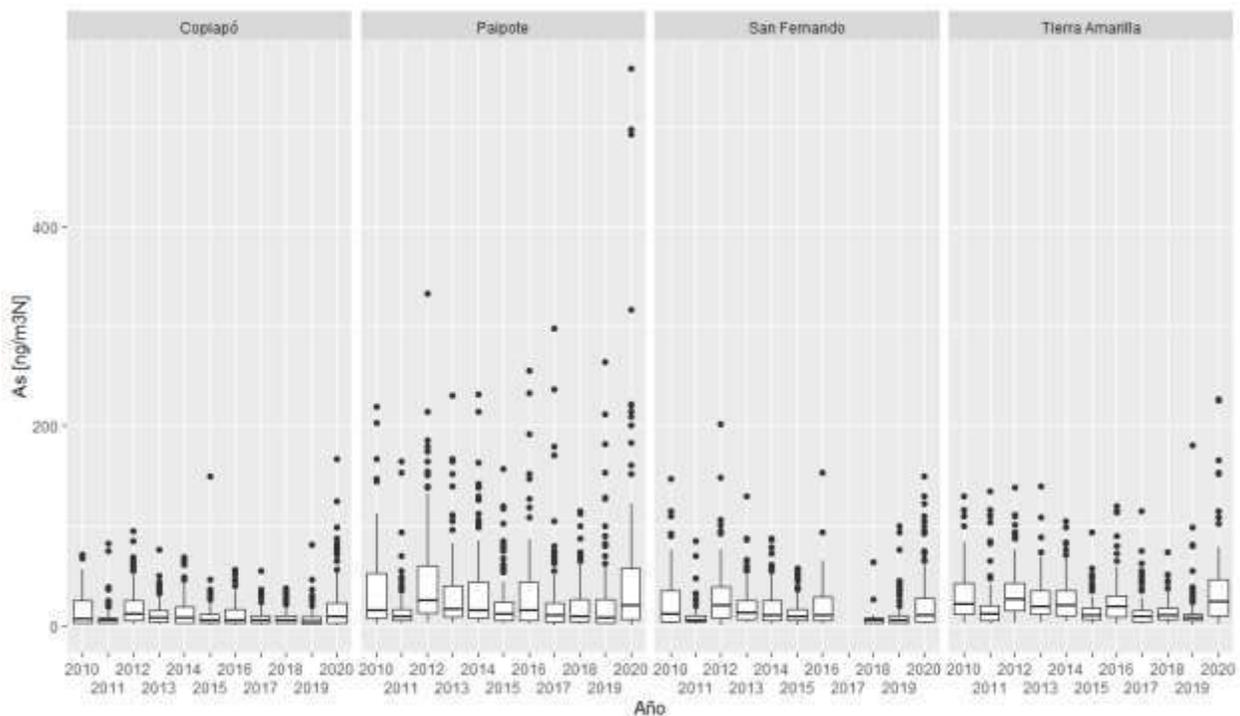
En la Tabla 2-22 se presenta la evolución de las concentraciones de As medida en las estaciones Copiapó, Paipote, San Fernando y Tierra Amarilla, ubicadas en las cercanías de la fundición Hernán Videla Lira. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 2-52, Tabla 2-53, Tabla 2-54 y Tabla 2-55, respectivamente.

Cuando se publicó la norma de emisión (D.S. 28/2013 del MMA), Hernán Videla Lira no contaba con plantas de ácido de doble contacto, por lo que de acuerdo con la regulación debía cumplir los límites de emisión exigidos por norma de emisión a partir de diciembre 2018. Exceptuando la estación de San Fernando, donde no se observan mayores cambios, se observa una mejora en los estadígrafos entre el año 2018 y 2019. La excepción corresponde a la máxima<sup>11</sup>, donde el año 2019 se observan valores superiores, alcanzando a duplicar los valores máximos reportados el año 2018.

<sup>11</sup> Estos valores máximos ocurren los días 10 de abril en Tierra Amarilla, 22 de mayo en Copiapó y Paipote, y 18 de junio en San Fernando.

Por otra parte, llama la atención que las concentraciones de arsénico del año 2020 sean de las más altas, considerando que 2019 y 2020 tuvieron niveles de producción similares. Debido a que no se cuenta con una estimación de emisiones con una metodología válida para el año 2019, no es posible realizar un análisis entre las emisiones reportadas en 2019 y 2020. Sin embargo, una reestimación propia del consultor basada en la intensidad de emisiones observada desde septiembre del 2020 hasta agosto 2021, estima que las emisiones del 2020 fueron 73% superiores a las del 2019. Si bien esta es sólo una estimación propia, está en línea con los cambios observados en las concentraciones de arsénico.

De las cuatro estaciones, se observa que las concentraciones de la estación Paipote son los más altos, como se esperaría dada su cercanía a la fundición (ver Figura 2-27). En la misma línea, las concentraciones de la estación Copiapó son los más bajos, lo cual se explica no solo por su mayor distancia hacia la fuente, sino que también por la predominancia de viento desde el noroeste (ver Anexo de la Sección 10.3.4).



**Figura 2-28 Concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la estación Copiapó (ver Tabla 2-52) se observa que desde 2017 a 2019 la mediana de las concentraciones de As se mantuvo en el rango de 3 a 5 [ng/m<sup>3</sup>N], ya observándose una disminución significativa respecto a años previos. Sin embargo, el 2020 se observó una mediana

de 8 [ng/m<sup>3</sup>N], similar a los valores observados entre 2013 y 2014. Similarmente, en cuanto al estadígrafo de máxima, desde 2016 a 2019 los valores se mantienen entre 38 y 81 [ng/m<sup>3</sup>N], que en 2020 alcanza 167 [ng/m<sup>3</sup>N], equivalente a alrededor de 3 veces el valor promedio de los máximos de los años previos. Lo anterior resulta en el registro de concentraciones promedios más altas del periodo descrito, igualando al año 2012 con una concentración media de 19 [ng/m<sup>3</sup>N].

**Tabla 2-52 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Copiapó**

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	115	97	120	107	119	121	114	149	83	103	120	0
<b>Max.</b>	71	82	94	76	68	150	56	55	38	81	167	S/I
<b>3rd Qu.</b>	24	7	24	14	19	11	16	10	9	9	23	S/I
<b>Mediana</b>	6	4	11	7	7	4	4	5	5	3	8	S/I
<b>Media</b>	15	8	19	11	13	9	11	8	7	7	19	S/I
<b>1st Qu.</b>	2	2	4	3	3	2	2	2	2	1	2	S/I
<b>Min.</b>	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Nota: Se excluyen los valores de los días 4 de julio de 2017 y 23 de agosto de 2020, correspondientes a 0 [ng/m<sup>3</sup>N], ya que se consideran *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En la estación Paipote (ver Tabla 2-53) se observa que desde 2017 a 2019 la mediana de las concentraciones de As se mantiene en el rango de 7 a 10 [ng/m<sup>3</sup>N], mientras que el 2020 se observó una mediana de 20 [ng/m<sup>3</sup>N], más de 2 veces el promedio de los tres años previos. En cuanto al estadígrafo de máxima, desde 2016 a 2019 los valores se mantienen entre 256 y 298 [ng/m<sup>3</sup>N], a excepción de 2018, en que el máximo solo alcanza los 114 [ng/m<sup>3</sup>N]. Mientras que en 2020 se observan varias mediciones superiores, alcanzando un máximo de 559 [ng/m<sup>3</sup>N], equivalente a 2.4 veces el promedio de los años previos, año en que se observan distribuciones más comparables con años previos, como 2012. La consecuencia de estos valores más altos es que el valor medio del año 2020 es el más alto de los 11 años con información: 54 [ng/m<sup>3</sup>N].

**Tabla 2-53 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Paipote**

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	117	107	121	120	121	126	121	165	116	116	119	0
<b>Max.</b>	219	164	333	230	232	157	256	298	114	264	559	S/I
<b>3rd Qu.</b>	52	16	60	39	43	24	43	22	26	25	57	S/I
<b>Mediana</b>	15	8	25	16	15	11	15	10	9	7	20	S/I
<b>Media</b>	37	16	45	32	35	22	30	22	19	23	54	S/I
<b>1st Qu.</b>	7	4	12	8	7	5	4	3	3	2	6	S/I
<b>Min.</b>	1	1	2	2	2	1	0	0	1	1	0	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Nota: Se excluye el valor de concentración de As del día 1 de junio de 2015, correspondiente a 1.133 [ng/m<sup>3</sup>N], ya que se considera *outlier* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la estación San Fernando (ver Tabla 2-54) y la estación Tierra Amarilla (Tabla 2-55), se observan tendencias similares a la estación Copiapó. En el caso de la estación San Fernando, desde el año 2013 las concentraciones medianas de As se mantienen alrededor de 10 [ng/m<sup>3</sup>N], exceptuando los años 2018 y 2019 donde los estadígrafos tienden a disminuir. Por otra parte, en la estación Tierra Amarilla las concentraciones medianas de As desde el año 2013 tienen mayor variabilidad, manteniéndose en el rango de 7 a 23 [ng/m<sup>3</sup>N]. En el caso de ambas estaciones, las concentraciones medianas de As se acercan más a lo observado en 2016, sin embargo, sus valores medios representan los valores similares a los observados en el año 2012.

**Tabla 2-54 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación San Fernando**

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	113	107	121	119	119	132	112	0	16	112	120	0
<b>Max.</b>	147	84	202	130	87	57	153	S/I	64	100	150	S/I
<b>3rd Qu.</b>	35	9	38	24	25	16	28	S/I	7	9	27	S/I
<b>Mediana</b>	11	4	20	12	9	8	9	S/I	4	4	10	S/I
<b>Media</b>	23	8	28	18	18	12	19	S/I	10	10	24	S/I
<b>1st Qu.</b>	4	3	7	6	5	4	4	S/I	2	2	3	S/I
<b>Min.</b>	1	1	0	2	1	0	1	S/I	1	1	1	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Nota: Se excluye el valor de concentración de As del día 4 de julio de 2012, correspondiente a 0 [ng/m<sup>3</sup>N], ya que se considera *outlier* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-55 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Tierra Amarilla**

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	117	107	119	118	122	133	122	168	120	120	122	0
<b>Max.</b>	129	134	138	139	104	93	120	115	73	181	227	S/I
<b>3rd Qu.</b>	42	20	42	35	34	17	30	14	17	11	46	S/I
<b>Mediana</b>	21	11	26	18	20	9	19	8	10	7	23	S/I
<b>Media</b>	30	19	33	25	26	14	24	12	13	13	34	S/I
<b>1st Qu.</b>	11	5	14	11	10	6	8	4	5	4	10	S/I
<b>Min.</b>	2	1	2	2	3	0	1	1	1	0	1	S/I

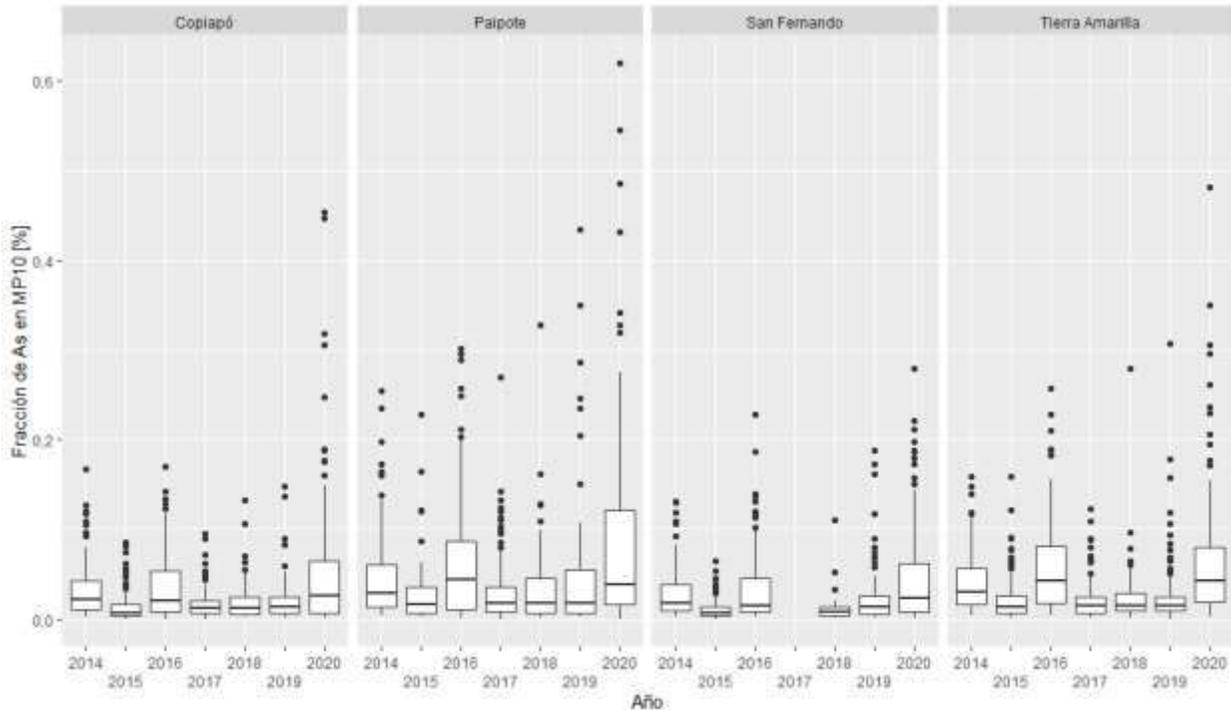
S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-29 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas mediante los muestreos. Los estadígrafos se presentan en las cuatro siguientes tablas, desde la Tabla 2-56 a la Tabla 2-59. Las menores medianas se observan en la estación San Fernando, en donde entre los años 2014 y 2020 estas varían entre 0,006 y 0,023%. Por otra parte, en la estación Tierra Amarilla se observan las mayores medianas, las que se encuentran en el rango de 0,013 y 0,043%. En la estación Paipote las medianas varían entre 0,016 y 0,043% y en la estación Copiapó están en el rango de 0,007 a 0,026%. Lo anterior está en línea con lo esperado, pues da cuenta

de que la fundición tiene mayor contribución en las estaciones más cercanas, es decir, Tierra Amarilla y Paipote.

En todas las estaciones se observa un aumento de todos los estadígrafos en general en el año 2020, especialmente en las fracciones de As máximas, las que alcanzan su mayor valor respecto a los demás años en cada una de las estaciones. Esto significaría que las emisiones de la fundición tuvieron una mayor contribución en el MP10 registrado en las estaciones, lo cual sería señal de que el año 2020 hubo mayores emisiones en comparación con el período previo.



**Figura 2-29 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Hernán Videla Lira, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-56 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Copiapó**

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	0	119	121	114	148	83	103	120	0
<b>Max.</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,167	0,085	0,169	0,095	0,132	0,148	0,453	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,042	0,016	0,053	0,021	0,024	0,024	0,064	S/I
<b>Mediana</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,022	0,007	0,020	0,012	0,012	0,013	0,026	S/I
<b>Media</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,033	0,015	0,035	0,017	0,019	0,020	0,055	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,011	0,004	0,008	0,006	0,006	0,006	0,007	S/I
<b>Min.</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,002	0,000	0,000	0,000	0,002	0,001	0,000	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes de concentraciones de As para ese año.

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, debido a que no se dispone de información de concentraciones de MP10 para dicho año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-57 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Paipote**

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	0	121	126	120	164	116	116	119	0
<b>Max.</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,254	0,228	0,301	0,270	0,328	0,434	0,620	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,061	0,035	0,087	0,036	0,045	0,055	0,121	S/I
<b>Mediana</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,029	0,016	0,043	0,018	0,017	0,017	0,039	S/I
<b>Media</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,047	0,026	0,063	0,029	0,032	0,044	0,086	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,013	0,007	0,011	0,008	0,007	0,007	0,016	S/I
<b>Min.</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,003	0,002	0,001	0,000	0,002	0,002	0,000	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes de concentraciones de As para ese año.

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, debido a que no se dispone de información de concentraciones de MP10 para dicho año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-58 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación San Fernando**

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	0	119	132	111	0	16	112	120	0
<b>Max.</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,131	0,065	0,228	S/I	0,110	0,188	0,279	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,039	0,013	0,045	S/I	0,013	0,026	0,062	S/I
<b>Mediana</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,017	0,006	0,015	S/I	0,007	0,013	0,023	S/I
<b>Media</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,027	0,011	0,034	S/I	0,018	0,023	0,048	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,009	0,003	0,007	S/I	0,004	0,005	0,008	S/I
<b>Min.</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,002	0,000	0,002	S/I	0,001	0,001	0,001	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes de concentraciones de As para ese año.

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, debido a que no se dispone de información de concentraciones de As ni de MP10 para dicho año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-59 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Tierra Amarilla**

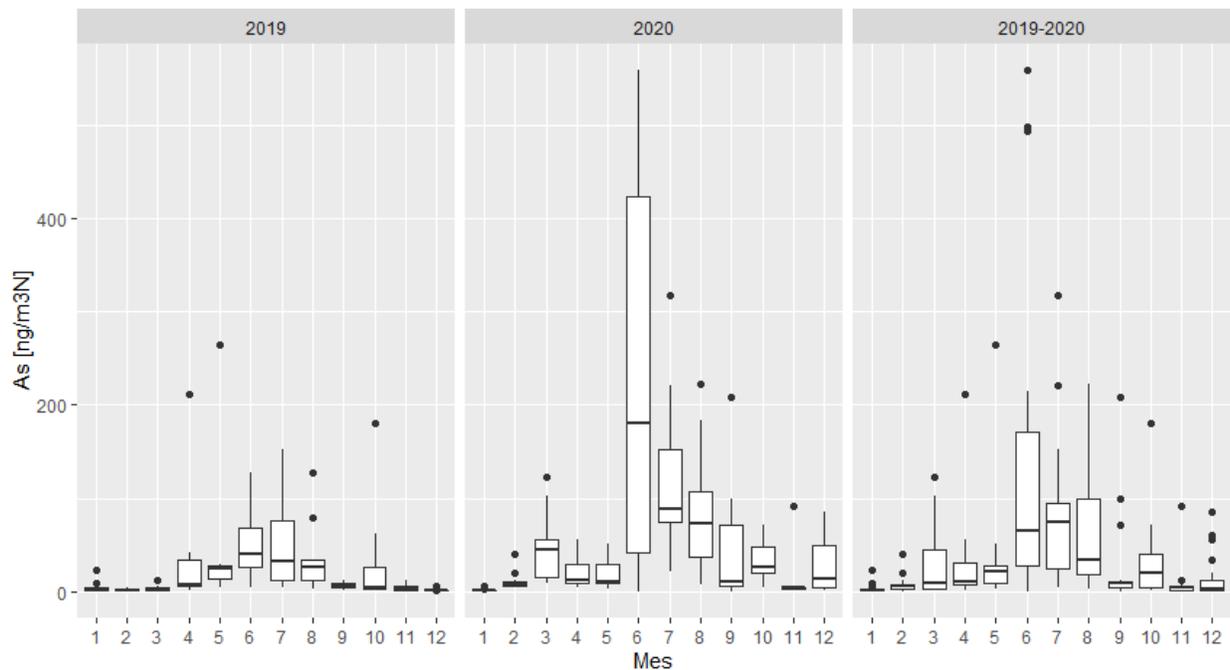
Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	0	122	132	122	167	120	120	122	0
<b>Max.</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,158	0,159	0,257	0,123	0,279	0,307	0,481	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,057	0,026	0,081	0,025	0,029	0,025	0,080	S/I
<b>Mediana</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,030	0,013	0,043	0,015	0,015	0,014	0,043	S/I
<b>Media</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,042	0,022	0,057	0,020	0,023	0,026	0,067	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,016	0,007	0,018	0,007	0,009	0,009	0,019	S/I
<b>Min.</b>	S/C	S/C	S/C	S/C	0,004	0,001	0,004	0,001	0,001	0,000	0,002	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes de concentraciones de As para ese año.

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, debido a que no se dispone de información de concentraciones de MP10 para dicho año.

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 2-30 se presentan las concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] mensualmente para los años 2019, 2020 y ambos en conjunto de la estación Paipote, estación más cercana a la fundición. Se observan mayores concentraciones de As en los meses de invierno, particularmente desde junio a agosto, lo cual se explica por las condiciones meteorológicas durante invierno.


**Figura 2-30 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N], cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Paipote**

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.2.8 Estaciones cercanas a fundición Ventanas

En la Figura 2-31 se muestra la ubicación de la fundición Ventanas, donde se observan distintas localidades cercanas como La Greda, Loncura, Quinteros y Puchuncaví, entre otras. Respecto de las estaciones de monitoreo, se observan múltiples estaciones cercanas en diferentes direcciones. En dirección norte, se encuentra la estación La Greda a 2 kilómetros y la estación Ventanas a 2,6 kilómetros. En dirección este, se encuentra la estación Los Maitenes, a 2,7 kilómetros. Al sureste de la fundición se encuentra la estación Valle Alegre a 6,4 kilómetros. La estación Sur, justamente se encuentra 4 kilómetros al sur de la fundición. La estación Quintero se encuentra 5 kilómetros al oeste, y la estación Quintero Centro 5,3 kilómetros al suroeste. Por último, la estación Puchuncaví se encuentra a 8,7 km al noreste de la fundición.



**Figura 2-31 Mapa fundición Ventanas, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas**

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

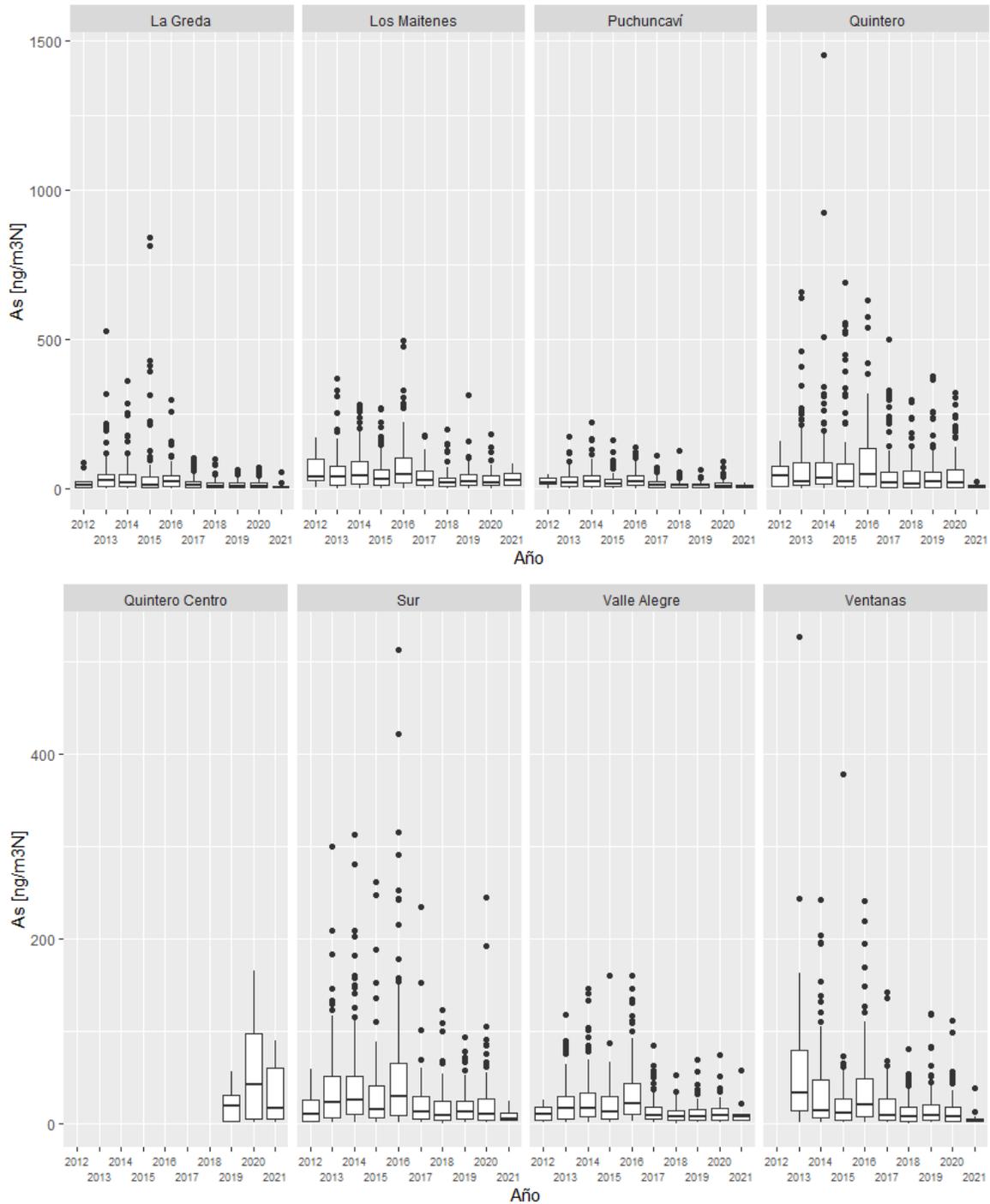
En la Figura 2-32 se presenta la evolución de las concentraciones de As medida en las estaciones La Greda, Los Maitenes, Puchuncaví, Quintero, Quintero Centro, Sur, Valle Alegre y Ventanas,

ubicadas en las cercanías de la fundición Ventanas. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan a continuación, desde la Tabla 2-60 a la Tabla 2-67.

Cuando se publicó la norma de emisión (D.S. 28/2013 del MMA), Ventanas ya contaba con una planta de ácido de doble contacto, por lo que de acuerdo con la regulación debía cumplir los límites de emisión establecidos en la norma a partir de diciembre 2016. Es posible observar cómo en general las concentraciones de arsénico de todas las estaciones en la zona tienden a disminuir a partir del año 2017.

De todas las estaciones, se observa que los valores de la estación Quintero son los mayores, seguidos por la estación Los Maitenes y, en menor medida, la estación Sur y Ventanas. La estación La Greda alcanza los mayores valores registrados, en el año 2015, sin embargo, desde 2017 es de las estaciones con los menores valores, junto con Valle Alegre y Puchuncaví desde 2018. Las altas concentraciones de As en la estación Quintero se explican por condiciones meteorológicas específicas que hacen que las emisiones de la zona de la fundición tengan mayor impacto en las concentraciones de As medidas en esta estación. Lo mismo sucede en el caso de las concentraciones de SO<sub>2</sub> (ver Sección 6.2.5.3 en informe complementario sobre la revisión de la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico). Las menores concentraciones de As en la estación Valle Alegre y Puchuncaví, especialmente desde 2018, están dentro de lo esperado considerando que son las más lejanas a la fundición Ventanas (ver Figura 2-31).

En todas las estaciones se observa una disminución desde 2016 a 2017, que tiende a estabilizarse en valores menores, y en general se observa una disminución mayor en el año 2021. Esto se condice con las emisiones de arsénico de la fundición presentadas en la Figura 3-40 de la Sección 3.3.5, donde se observa que las emisiones comienzan a disminuir a partir del año 2016 manteniéndose luego relativamente estables en el tiempo. El impacto de las mejoras operacionales de la planta se observa especialmente en la reducción de las concentraciones máximas observadas.



Nota 1: La gráfica de estaciones Quintero, Sur, Valle Alegre y Ventanas tiene una escala diferente.

**Figura 2-32 Concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Ventanas, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la estación La Greda (ver Tabla 2-60) se observa que desde el año 2017 la mediana de las concentraciones se ha mantenido en el rango de 5 a 10 [ng/m<sup>3</sup>N], observándose que en los últimos tres años de la serie los estadígrafos se han mantenido con desviaciones menores, lo que contrasta especialmente con los amplios rangos observados en los años previos, especialmente en 2015. En cuanto al periodo anterior se observan medianas de concentración entre 14 y 26 [ng/m<sup>3</sup>N], además de valores máximos significativamente mayores, lo que resultaba en valores medios entre 2 y 3 veces mayores. Si bien el año 2012 tiene valores menores, se destaca que sólo se tienen nueve observaciones, lo cual hace que sus estadígrafos no den cuenta de la situación real durante dicho año.

**Tabla 2-60 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Ventanas, estación La Greda**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	9	107	119	115	119	117	118	120	121	11
<b>Max.</b>	87	527	361	839	298	105	97	64	71	56
<b>3rd Qu.</b>	23	47	48	40	44	25	19	20	19	9
<b>Mediana</b>	10	26	17	14	22	10	8	9	7	5
<b>Media</b>	24	42	40	54	35	18	14	14	14	11
<b>1st Qu.</b>	5	6	6	5	9	3	3	5	4	4
<b>Min.</b>	2	1	1	1	1	1	0	1	1	1

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de los días 22 de marzo de 2015, 9 de octubre de 2015, 29 de noviembre de 2011 y 11 de octubre de 2018, correspondientes a 0 [ng/m<sup>3</sup>N] y del día 20 de enero de 2018, correspondiente a 1 [ng/m<sup>3</sup>N], ya que se consideran *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En la estación Los Maitenes (ver Tabla 2-61) se observa que la mediana de las concentraciones de As, desde el año 2017, se ubica en el rango de 19 a 27 [ng/m<sup>3</sup>N]. En cuanto a valores máximos, los mayores valores se observan en 2016, alcanzando 497 [ng/m<sup>3</sup>N]. Se observa que a partir del año 2017 los estadígrafos tienden a ser menores que en el período anterior, lo cual resulta en concentraciones medias cercanas a la mitad de las concentraciones medias del período 2013-2016.

**Tabla 2-61 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Ventanas, estación Los Maitenes**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	10	107	118	118	121	122	118	119	119	10
<b>Max.</b>	169	367	280	270	497	180	199	314	182	82
<b>3rd Qu.</b>	100	77	89	64	101	60	36	45	42	53
<b>Mediana</b>	40	41	45	30	47	25	20	21	19	27
<b>Media</b>	61	61	64	50	76	39	29	32	30	33
<b>1st Qu.</b>	27	12	17	11	19	10	6	9	10	10
<b>Min.</b>	4	1	1	1	1	1	1	1	1	7

Fuente: Elaboración propia

En la estación Puchuncaví (ver Tabla 2-62) se observa que la mediana de las concentraciones, desde el año 2017, se ubica en el rango de 6 a 10 [ng/m<sup>3</sup>N], muy acotado. En general, no se observa una tendencia clara al alza o reducción de los estadígrafos descriptores de las concentraciones de Arsénico desde 2018 en adelante, manteniéndose en niveles similares. Se destaca nuevamente que se observa una disminución relevante, observándose valores medios cercanos a la mitad de los valores observados en el período entre los años 2013 y 2017.

**Tabla 2-62 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Ventanas, estación Puchuncaví**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	9	107	122	118	120	121	119	118	119	10
<b>Max.</b>	46	176	221	161	137	110	125	61	92	19
<b>3rd Qu.</b>	37	38	44	30	44	24	16	16	18	11
<b>Mediana</b>	21	20	24	14	24	10	10	10	8	6
<b>Media</b>	24	28	34	22	30	16	13	12	14	8
<b>1st Qu.</b>	16	8	8	7	11	5	5	5	5	4
<b>Min.</b>	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1

Fuente: Elaboración propia

En la estación Quintero (ver Tabla 2-63) se observa que la mediana de las concentraciones de As, desde el año 2017, se ubica en el rango de 15 a 24 [ng/m<sup>3</sup>N], exceptuando el año 2021 el cual presenta una mediana de las concentraciones de 5 [ng/m<sup>3</sup>N], sin embargo, se debe tener en consideración la baja cantidad de muestras de dicho año. En el año 2016 se observó un aumento de las concentraciones medidas, lo que se refleja en un aumento de todos los estadígrafos descriptivos, exceptuando el valor máximo. La máxima concentración de As se observa el año 2014. Se observa claramente la disminución de concentraciones desde 2017, pero desde ese año no se identifica una tendencia clara al alza o reducción de los estadígrafos descriptores de las concentraciones de Arsénico. Se destaca que los valores máximos observados son superiores a los observados en otras estaciones, lo cual responde a condiciones meteorológicas especiales que resultan en que las emisiones de la zona de la fundición tengan mayor impacto en Quintero. Este mismo fenómeno se observa en el caso de las concentraciones de SO<sub>2</sub>.

**Tabla 2-63 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	9	103	112	108	115	116	101	115	110	8
<b>Max.</b>	157	658	1.453	690	631	501	299	376	321	23
<b>3rd Qu.</b>	74	88	85	83	135	57	59	56	64	10
<b>Mediana</b>	43	23	37	23	48	18	15	24	20	5
<b>Media</b>	52	78	92	84	96	55	44	49	50	8
<b>1st Qu.</b>	7	11	15	7	9	4	5	5	4	3
<b>Min.</b>	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia

La estación Quintero Centro (ver Tabla 2-64) cuenta con menos información, disponiendo sólo de 33 datos distribuidos entre los años 2019 y 2021. De esta forma se advierte que es complejo obtener conclusiones de esta estación. A modo descriptivo, se observa que los estadígrafos de las mediciones aumentan de 2019 a 2020, aumentando la mediana de 19 [ng/m<sup>3</sup>N] a 43 [ng/m<sup>3</sup>N], así como las emisiones máximas aumentan de 56 a 166 [ng/m<sup>3</sup>N]. El año 2021 los estadígrafos nuevamente disminuyen.

**Tabla 2-64 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero Centro**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	0	0	0	0	12	12	9
<b>Max.</b>	S/I	56	166	90						
<b>3rd Qu.</b>	S/I	30	97	60						
<b>Mediana</b>	S/I	19	43	16						
<b>Media</b>	S/I	20	57	34						
<b>1st Qu.</b>	S/I	2	5	5						
<b>Min.</b>	S/I	1	1	1						

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Sur (ver Tabla 2-65) se observa que la mediana de las concentraciones de As, desde el año 2017, se ubica en el rango de 8 a 13 [ng/m<sup>3</sup>N]. En cuanto a valores máximos, al igual que en Los Maitenes, se observa un peak en 2016 con 513 [ng/m<sup>3</sup>N]. Al igual que en Quintero, se observa una clara disminución desde 2017, y desde ese año no se observa una tendencia clara al alza o reducción de los estadígrafos descriptores de las concentraciones de Arsénico.

**Tabla 2-65 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Ventanas, estación Sur**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	10	106	116	114	118	115	117	116	118	10
<b>Max.</b>	59	300	312	262	513	234	123	93	245	24
<b>3rd Qu.</b>	25	52	52	41	65	29	25	25	27	12
<b>Mediana</b>	10	22	25	15	30	13	8	12	10	5
<b>Media</b>	16	40	46	31	57	22	17	18	22	9
<b>1st Qu.</b>	2	6	10	6	9	5	4	5	4	3
<b>Min.</b>	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2

Fuente: Elaboración propia

En las estaciones Valle Alegre (ver Tabla 2-66) y Ventanas (ver Tabla 2-67) se observa una clara disminución desde 2017. En los años previos, comparativamente, la estación Ventanas tenía una mayor dispersión en las mediciones. En ambas estaciones se observa una concentración mediana en el rango de 7 a 9 [ng/m<sup>3</sup>N] desde 2017, muy acotado, exceptuando el año 2021 en Ventanas, cuyo valor disminuye a 3 [ng/m<sup>3</sup>N].

**Tabla 2-66 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Ventanas, estación Valle Alegre**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	10	105	119	113	118	117	113	118	119	11
<b>Max.</b>	26	118	146	160	161	85	52	69	74	58
<b>3rd Qu.</b>	18	30	33	30	43	17	14	15	16	10
<b>Mediana</b>	10	16	16	12	22	9	7	8	9	7
<b>Media</b>	11	23	27	21	32	14	10	11	12	12
<b>1st Qu.</b>	4	5	8	5	10	5	3	4	4	4
<b>Min.</b>	1	1	1	1	2	1	0	1	1	2

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-67 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Ventanas, estación Ventanas**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	70	116	113	121	121	113	119	120	11
<b>Max.</b>	S/I	526	242	378	240	142	80	120	111	38
<b>3rd Qu.</b>	S/I	79	47	27	49	27	18	20	18	6
<b>Mediana</b>	S/I	33	15	12	20	9	8	8	8	3
<b>Media</b>	S/I	58	35	21	38	19	13	16	14	7
<b>1st Qu.</b>	S/I	14	6	4	7	4	3	4	3	2
<b>Min.</b>	S/I	1	1	1	1	1	0	1	1	1

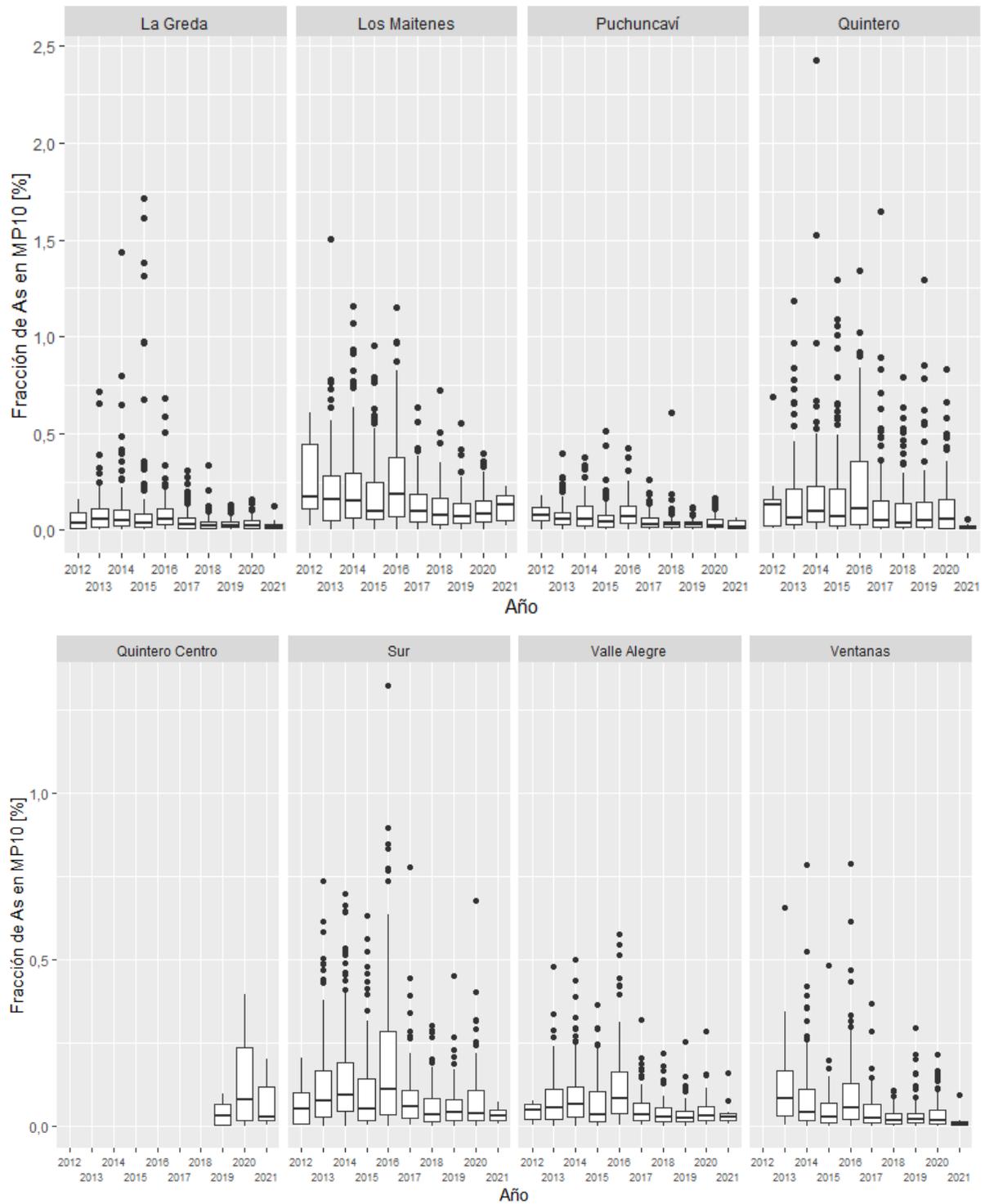
S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-33<sup>12</sup> se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas mediante los muestreos. Para todas las estaciones se observan mayores estadígrafos para el año 2016, exceptuando algunos valores máximos en años previos. Este peak se observa especialmente en las estaciones Quintero, Los Maitenes y Sur, donde también se observan medianas mayores para la fracción de As en MP10. Los estadígrafos se presentan desde la Tabla 2-68 a la Tabla 2-75.

Para el año 2020 la mediana de la fracción para la estación Ventanas fue 0,01%, para La Greda fue 0,02%, para Puchuncaví y Valle Alegre fue 0,03%, para la estación Sur fue 0,04%, en Quintero fue de 0,06%, mientras que para Los Maitenes fue de 0,09%. Lo anterior es una señal de cuál es el nivel de contribución de la fundición respecto del total de emisiones del MP10 en las diferentes estaciones. De esta forma, por ejemplo, en Ventanas es esperable que otras fuentes emisoras tales como el complejo termoeléctrico Ventanas de AES GENER, ENAP refinerías Aconcagua, tengan contribuciones relevantes, lo cual resulta en una menor contribución proporcional de la fundición y, por ende, menor fracción de Arsénico en el MP10. En el caso contrario, en Los Maitenes, el efecto de la fundición es mayor, ante la falta de otras fuentes emisoras locales que pudieran reducir el impacto proporcional de la fundición.

<sup>12</sup> No fue posible hacer este análisis para la estación Quintero Centro, por falta de antecedentes de MP10.



**Figura 2-33 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Ventanas, todas las estaciones**  
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-68 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación La Greda**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	9	107	119	115	119	117	118	120	121	11
<b>Max.</b>	0,160	0,719	1,439	1,714	0,680	0,305	0,333	0,129	0,155	0,127
<b>3rd Qu.</b>	0,092	0,108	0,107	0,087	0,110	0,061	0,043	0,042	0,047	0,027
<b>Mediana</b>	0,034	0,060	0,051	0,039	0,059	0,030	0,022	0,023	0,022	0,017
<b>Media</b>	0,054	0,087	0,102	0,134	0,090	0,047	0,036	0,033	0,035	0,029
<b>1st Qu.</b>	0,012	0,019	0,021	0,014	0,029	0,012	0,011	0,014	0,010	0,011
<b>Min.</b>	0,005	0,001	0,002	0,001	0,003	0,002	0,002	0,003	0,002	0,005

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-69 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Los Maitenes**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	10	107	118	118	121	122	118	119	119	10
<b>Max.</b>	0,609	1,507	1,161	0,951	1,152	0,637	0,723	0,554	0,398	0,227
<b>3rd Qu.</b>	0,445	0,283	0,297	0,248	0,378	0,185	0,164	0,138	0,148	0,181
<b>Mediana</b>	0,172	0,155	0,155	0,098	0,185	0,094	0,076	0,072	0,086	0,133
<b>Media</b>	0,260	0,210	0,233	0,177	0,260	0,133	0,111	0,100	0,103	0,121
<b>1st Qu.</b>	0,108	0,051	0,065	0,056	0,073	0,044	0,030	0,034	0,041	0,050
<b>Min.</b>	0,025	0,005	0,003	0,002	0,002	0,002	0,004	0,004	0,004	0,026

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-70 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Puchuncaví**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	9	107	122	118	120	121	119	118	119	10
<b>Max.</b>	0,177	0,397	0,376	0,510	0,424	0,259	0,605	0,118	0,165	0,061
<b>3rd Qu.</b>	0,120	0,090	0,121	0,077	0,126	0,063	0,042	0,040	0,053	0,047
<b>Mediana</b>	0,078	0,053	0,059	0,041	0,068	0,031	0,028	0,027	0,026	0,014
<b>Media</b>	0,088	0,073	0,086	0,064	0,085	0,043	0,038	0,030	0,038	0,027
<b>1st Qu.</b>	0,048	0,028	0,024	0,018	0,035	0,015	0,013	0,015	0,014	0,011
<b>Min.</b>	0,004	0,002	0,003	0,001	0,004	0,001	0,001	0,002	0,002	0,004

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-71 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	9	103	112	108	115	116	101	115	110	8
<b>Max.</b>	0,691	1,182	2,426	1,292	1,339	1,644	0,792	1,294	0,834	0,053
<b>3rd Qu.</b>	0,157	0,215	0,227	0,212	0,354	0,152	0,138	0,146	0,158	0,024
<b>Mediana</b>	0,131	0,062	0,099	0,068	0,114	0,051	0,039	0,052	0,057	0,013
<b>Media</b>	0,168	0,166	0,194	0,175	0,225	0,138	0,113	0,119	0,122	0,019
<b>1st Qu.</b>	0,023	0,027	0,042	0,020	0,026	0,013	0,016	0,013	0,011	0,007
<b>Min.</b>	0,007	0,001	0,001	0,003	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,005

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-72 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero Centro**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019*	2020*	2021*
<b>N</b>	0	0	0	0	0	0	0	4	12	9
<b>Max.</b>	S/I	0,097	0,395	0,202						
<b>3rd Qu.</b>	S/I	0,067	0,238	0,118						
<b>Mediana</b>	S/I	0,031	0,080	0,030						
<b>Media</b>	S/I	0,040	0,139	0,076						
<b>1st Qu.</b>	S/I	0,004	0,020	0,017						
<b>Min.</b>	S/I	0,002	0,002	0,003						

\* Para realizar el cálculo en estos años, la información de concentraciones de MP10 fue complementada con datos obtenidos del SINCA, los cuales corresponden a promedios diarios de mediciones horarias. Específicamente, se utilizan datos de concentraciones de MP10 del SINCA S/I: No se cuenta con antecedentes de concentraciones de As para ese año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-73 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Sur**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	10	106	116	114	118	115	117	116	118	10
<b>Max.</b>	0,204	0,737	0,696	0,632	1,323	0,777	0,303	0,450	0,677	0,075
<b>3rd Qu.</b>	0,101	0,169	0,191	0,143	0,286	0,108	0,085	0,082	0,107	0,051
<b>Mediana</b>	0,055	0,076	0,096	0,051	0,110	0,058	0,037	0,041	0,040	0,033
<b>Media</b>	0,073	0,133	0,154	0,109	0,204	0,086	0,060	0,059	0,076	0,036
<b>1st Qu.</b>	0,009	0,029	0,045	0,018	0,035	0,024	0,013	0,017	0,018	0,019
<b>Min.</b>	0,003	0,002	0,002	0,003	0,002	0,003	0,003	0,002	0,002	0,007

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-74 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Valle Alegre**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	10	105	119	113	118	117	113	118	119	11
<b>Max.</b>	0,079	0,479	0,499	0,364	0,576	0,320	0,220	0,252	0,285	0,161
<b>3rd Qu.</b>	0,065	0,112	0,118	0,106	0,164	0,069	0,057	0,045	0,059	0,041
<b>Mediana</b>	0,049	0,055	0,065	0,037	0,083	0,036	0,029	0,026	0,033	0,027
<b>Media</b>	0,045	0,080	0,091	0,072	0,119	0,051	0,041	0,036	0,044	0,042
<b>1st Qu.</b>	0,022	0,020	0,030	0,014	0,039	0,019	0,015	0,013	0,019	0,019
<b>Min.</b>	0,004	0,002	0,002	0,002	0,006	0,003	0,003	0,001	0,005	0,007

Fuente: Elaboración propia

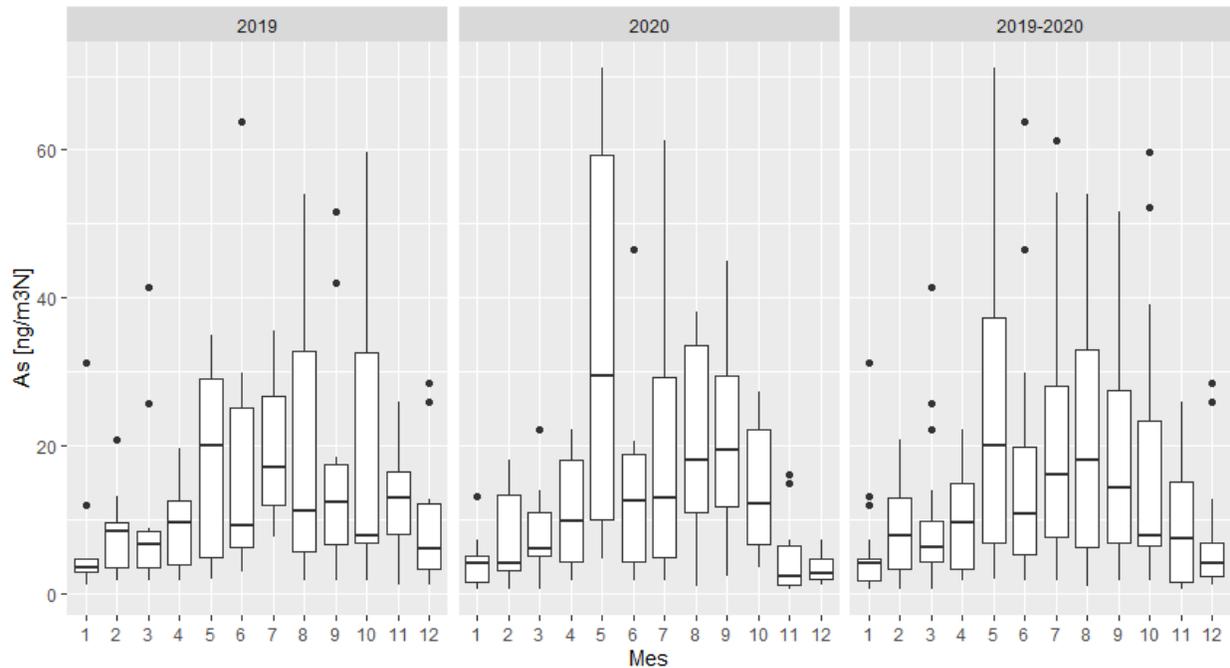
**Tabla 2-75 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Ventanas, estación Ventanas**

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	70	116	113	121	121	113	119	120	11
<b>Max.</b>	S/C	0,657	0,784	0,481	0,788	0,369	0,110	0,297	0,217	0,095
<b>3rd Qu.</b>	S/C	0,166	0,112	0,069	0,128	0,066	0,040	0,041	0,049	0,016
<b>Mediana</b>	S/C	0,084	0,042	0,029	0,056	0,024	0,017	0,020	0,019	0,009
<b>Media</b>	S/C	0,116	0,088	0,048	0,097	0,046	0,028	0,036	0,038	0,018
<b>1st Qu.</b>	S/C	0,033	0,016	0,012	0,021	0,012	0,007	0,010	0,008	0,006
<b>Min.</b>	S/C	0,005	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003

S/C: No se estima la fracción de As en MP10, debido a que no se dispone de información de concentraciones de As ni de MP10 para dicho año.

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 2-34 se presentan las concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] mensualmente para los años 2019, 2020 y ambos en conjunto de la estación La Greda, estación más cercana a la fundición. Se observa que la concentración de As aumenta durante el invierno en dichos años, siendo mayor en los meses de mayo hasta octubre, tanto en el valor de la mediana como en los valores máximos.


**Figura 2-34 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N], cercanías fundición Ventanas, estación La Greda**

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.2.9 Estaciones cercanas a refinería ENAP Aconcagua

En la Figura 2-35 se muestra la ubicación de la refinería ENAP, donde se observa que la ciudad más cercana es Concón. Respecto de las estaciones de monitoreo, Junta de Vecinos, Concón y

Las Gaviotas son las más cercanas, ubicadas a una distancia relativamente similar. Junta de Vecinos y Concón se ubican en dirección suroeste a 3,2 y 2,2 km respectivamente, y Las Gaviotas se encuentra a 1,6 km al noreste de la refinería. La estación Colmo se ubica 4,9 km al este.



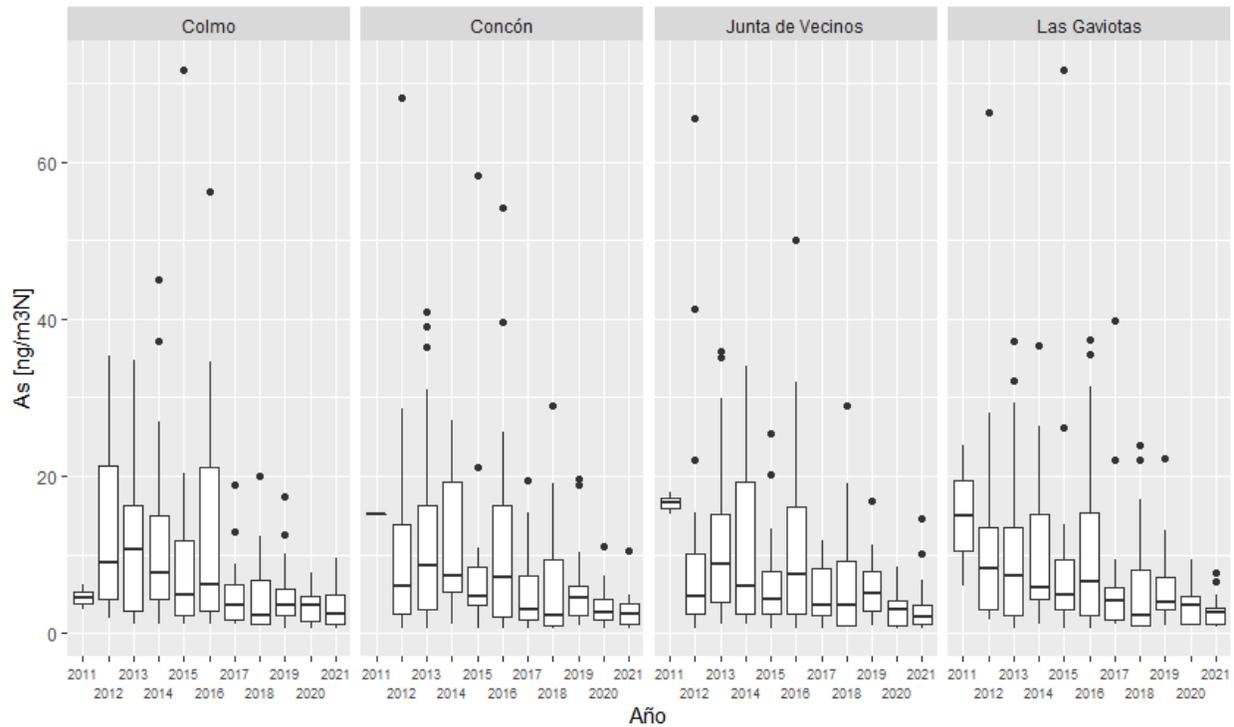
**Figura 2-35 Mapa refinería ENAP Aconcagua, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas**

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

En la Figura 2-36 se presenta la evolución de las concentraciones de As medida en las estaciones Colmo, Concón, Junta de Vecinos y Las Gaviotas, ubicadas en las cercanías de la Refinería ENAP. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 2-76, Tabla 2-77, Tabla 2-78, Tabla 2-79, respectivamente.

De las cuatro estaciones, se observa que los valores son similares entre ellas, sin embargo, se distinguen valores levemente mayores en la estación Las Gaviotas, especialmente en los años 2011, 2012 y 2017. Lo anterior se puede deber a la similitud en cercanía entre estaciones (ver Figura 2-35). Debido a que la refinería no es una fuente relevante de arsénico, los valores de concentraciones de arsénico son relativamente bajos en comparación con otras zonas del país. De hecho, la caída en las concentraciones entre el año 2016 y 2017 sugiere que las

concentraciones observadas se ven influenciadas por las emisiones de la Fundición de Ventanas que se ubica 17,9 km hacia el norte.



**Figura 2-36 Concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías refinería ENAP, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En los siguientes estadígrafos se observa que en general, en todas las estaciones hay una tendencia a la disminución de la concentración mediana entre los años 2013 y 2021, observándose un leve aumento en el año 2016 y 2019. Las concentraciones medianas de As se mantienen entre 2 y 4 [ng/m<sup>3</sup>N] en los años 2020 y 2021. Se destaca que a partir del año 2017 las medias se han encontrado entre 3 y 5 [ng/m<sup>3</sup>N], representando poco más de la mitad de las concentraciones observadas en el período anterior al año 2017. Sin perjuicio de lo anterior, se destaca que sólo se cuentan con dos mediciones mensuales por estación, lo cual es una frecuencia baja en comparación con la frecuencia cercana a 10 mediciones mensuales que se observan en otras zonas.

**Tabla 2-76 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Colmo**

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	2	22	23	21	20	24	19	24	22	23	20
<b>Max.</b>	6	35	35	45	72	56	19	20	17	8	9
<b>3rd Qu.</b>	5	21	16	15	12	21	6	7	6	5	5
<b>Mediana</b>	5	9	11	8	5	6	3	2	4	4	2
<b>Media</b>	5	12	11	13	10	13	5	5	5	3	3
<b>1st Qu.</b>	4	4	3	4	2	3	2	1	2	1	1
<b>Min.</b>	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Nota: Se excluye el valor de concentración de As 56 [ng/m3N], correspondiente al día 11 de junio de 2020, ya que se considera *outlier* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-77 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Concón**

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	2	21	22	20	17	23	23	24	24	24	20
<b>Max.</b>	15	68	41	27	58	54	20	29	20	11	10
<b>3rd Qu.</b>	15	14	16	19	8	16	7	9	6	4	4
<b>Mediana</b>	15	6	9	7	5	7	3	2	5	3	2
<b>Media</b>	15	12	13	12	9	12	6	6	6	3	3
<b>1st Qu.</b>	15	2	3	5	4	2	2	1	2	2	1
<b>Min.</b>	15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-78 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m3N] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Junta de Vecinos**

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	2	22	23	17	19	22	21	23	24	24	20
<b>Max.</b>	18	66	36	34	25	50	12	29	17	8	14
<b>3rd Qu.</b>	17	10	15	19	8	16	8	9	8	4	4
<b>Mediana</b>	17	5	9	6	4	7	3	3	5	3	2
<b>Media</b>	17	10	12	11	7	12	5	7	6	3	3
<b>1st Qu.</b>	16	2	4	2	2	2	2	1	3	1	1
<b>Min.</b>	15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

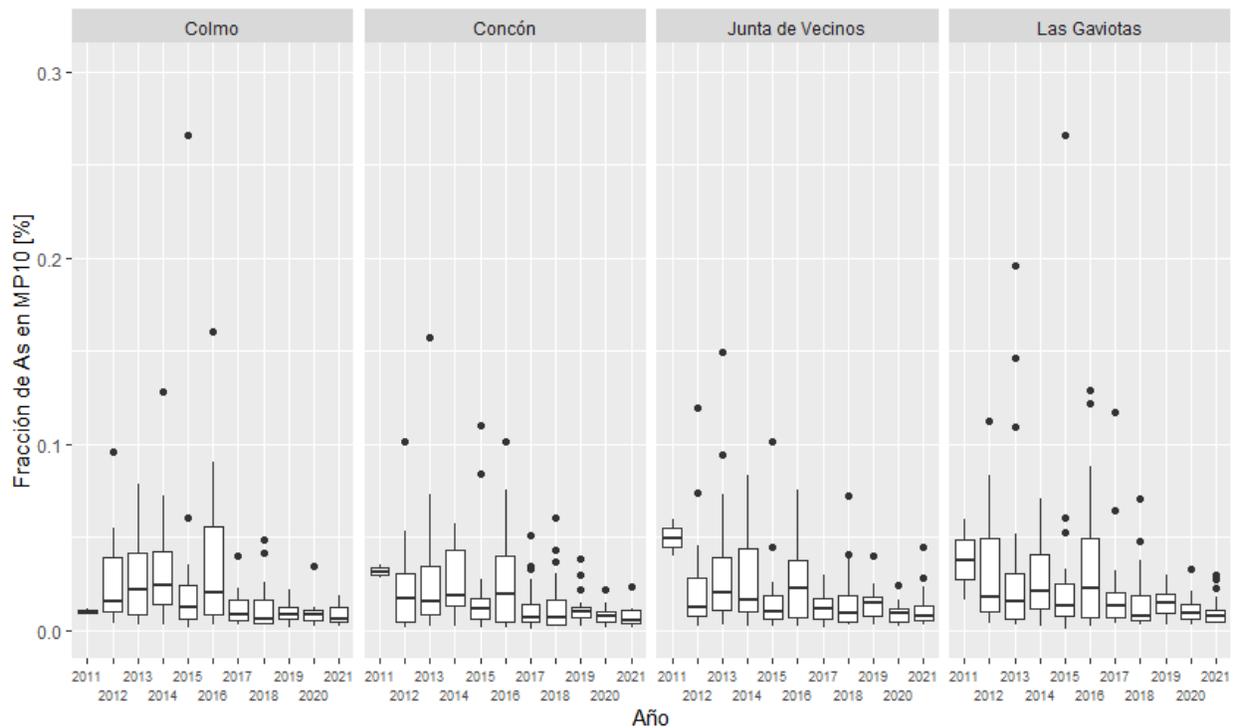
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-79 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Las Gaviotas**

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	2	21	24	22	19	24	21	24	24	24	20
<b>Max.</b>	24	66	37	37	72	37	40	24	22	9	8
<b>3rd Qu.</b>	19	13	13	15	9	15	6	8	7	5	3
<b>Mediana</b>	15	8	7	6	5	7	4	2	4	4	3
<b>Media</b>	15	12	10	10	10	11	6	6	6	4	3
<b>1st Qu.</b>	10	3	2	4	3	2	2	1	3	1	1
<b>Min.</b>	6	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-37 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas mediante los muestreos. El comportamiento de estos valores es similar al de los valores de concentraciones de As presentados en la Figura 2-36, sin distinciones claras. Los estadígrafos se presentan en las cuatro siguientes tablas, desde la Tabla 2-80 a la Tabla 2-83.



Nota: En estación Concón no se muestran los valores 30,098% y 10,081% correspondientes a los días 10 y 19 de mayo del 2021 respectivamente.

**Figura 2-37 Fracción de As en MP10 [%], cercanías refinería ENAP, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-80 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Colmo**

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	2	22	23	21	20	24	19	24	22	23	20
<b>Max.</b>	0,012	0,096	0,079	0,128	0,266	0,160	0,040	0,049	0,022	0,035	0,019
<b>3rd Qu.</b>	0,011	0,039	0,042	0,043	0,024	0,056	0,016	0,017	0,013	0,011	0,012
<b>Mediana</b>	0,010	0,016	0,022	0,024	0,012	0,020	0,009	0,006	0,009	0,009	0,006
<b>Media</b>	0,010	0,027	0,029	0,032	0,028	0,035	0,012	0,012	0,010	0,009	0,008
<b>1st Qu.</b>	0,009	0,010	0,009	0,014	0,006	0,009	0,006	0,004	0,006	0,006	0,005
<b>Min.</b>	0,008	0,004	0,003	0,003	0,002	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-81 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Concón**

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	2	21	22	20	17	23	23	24	22	24	20
<b>Max.</b>	0,035	0,102	0,157	0,057	0,110	0,101	0,051	0,060	0,039	0,022	30,098
<b>3rd Qu.</b>	0,034	0,031	0,034	0,043	0,018	0,040	0,014	0,016	0,013	0,010	0,011
<b>Mediana</b>	0,032	0,017	0,016	0,018	0,012	0,020	0,007	0,007	0,010	0,008	0,007
<b>Media</b>	0,032	0,023	0,030	0,027	0,022	0,026	0,013	0,013	0,012	0,008	2,016
<b>1st Qu.</b>	0,030	0,005	0,008	0,014	0,006	0,005	0,005	0,003	0,007	0,005	0,004
<b>Min.</b>	0,028	0,002	0,003	0,003	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-82 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Junta de Vecinos**

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	2	22	23	17	19	22	21	23	22	24	20
<b>Max.</b>	0,060	0,119	0,149	0,083	0,101	0,076	0,030	0,073	0,040	0,024	0,045
<b>3rd Qu.</b>	0,055	0,029	0,039	0,044	0,019	0,038	0,017	0,018	0,018	0,012	0,013
<b>Mediana</b>	0,050	0,012	0,021	0,016	0,010	0,022	0,012	0,010	0,015	0,009	0,008
<b>Media</b>	0,050	0,024	0,033	0,028	0,018	0,029	0,013	0,016	0,014	0,009	0,012
<b>1st Qu.</b>	0,045	0,008	0,011	0,010	0,006	0,007	0,006	0,004	0,007	0,005	0,005
<b>Min.</b>	0,040	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,002	0,003	0,003	0,002	0,003

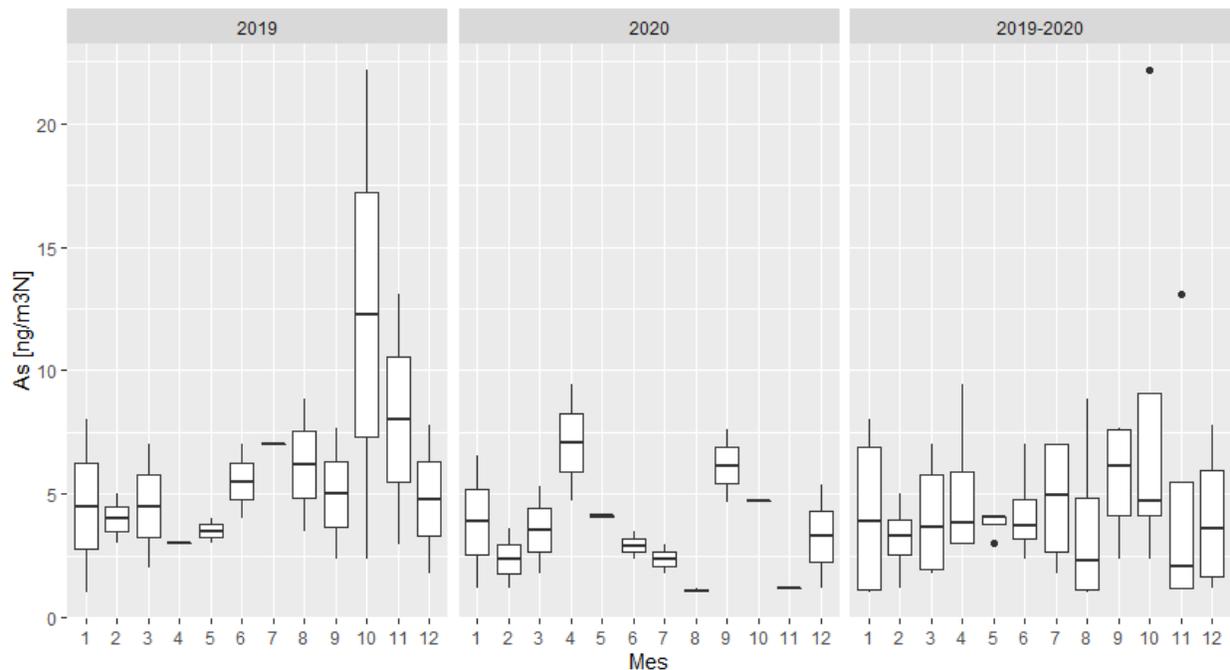
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-83 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Las Gaviotas**

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	2	21	24	22	19	24	21	24	22	24	20
<b>Max.</b>	0,060	0,112	0,196	0,071	0,266	0,129	0,117	0,071	0,030	0,033	0,030
<b>3rd Qu.</b>	0,049	0,049	0,031	0,041	0,025	0,050	0,020	0,019	0,019	0,014	0,011
<b>Mediana</b>	0,038	0,018	0,015	0,021	0,014	0,023	0,013	0,008	0,015	0,010	0,008
<b>Media</b>	0,038	0,031	0,034	0,029	0,031	0,035	0,020	0,016	0,015	0,011	0,010
<b>1st Qu.</b>	0,027	0,010	0,006	0,012	0,008	0,007	0,007	0,005	0,010	0,007	0,005
<b>Min.</b>	0,016	0,004	0,003	0,002	0,001	0,002	0,004	0,003	0,003	0,003	0,004

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 2-38 se presentan las concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] mensualmente para los años 2019, 2020 y ambos en conjunto de la estación Las Gaviotas, estación que presenta concentraciones de arsénico relativamente mayores. No se observa una estacionalidad clara en la concentración de As, ya que en el año 2019 se distinguen valores relativamente mayores en los meses de junio a noviembre, mientras que en el año 2020 no hay una tendencia clara, observándose mayores valores en los meses de abril y septiembre. Esto se puede deber a la baja cantidad de mediciones hechas en la estación.

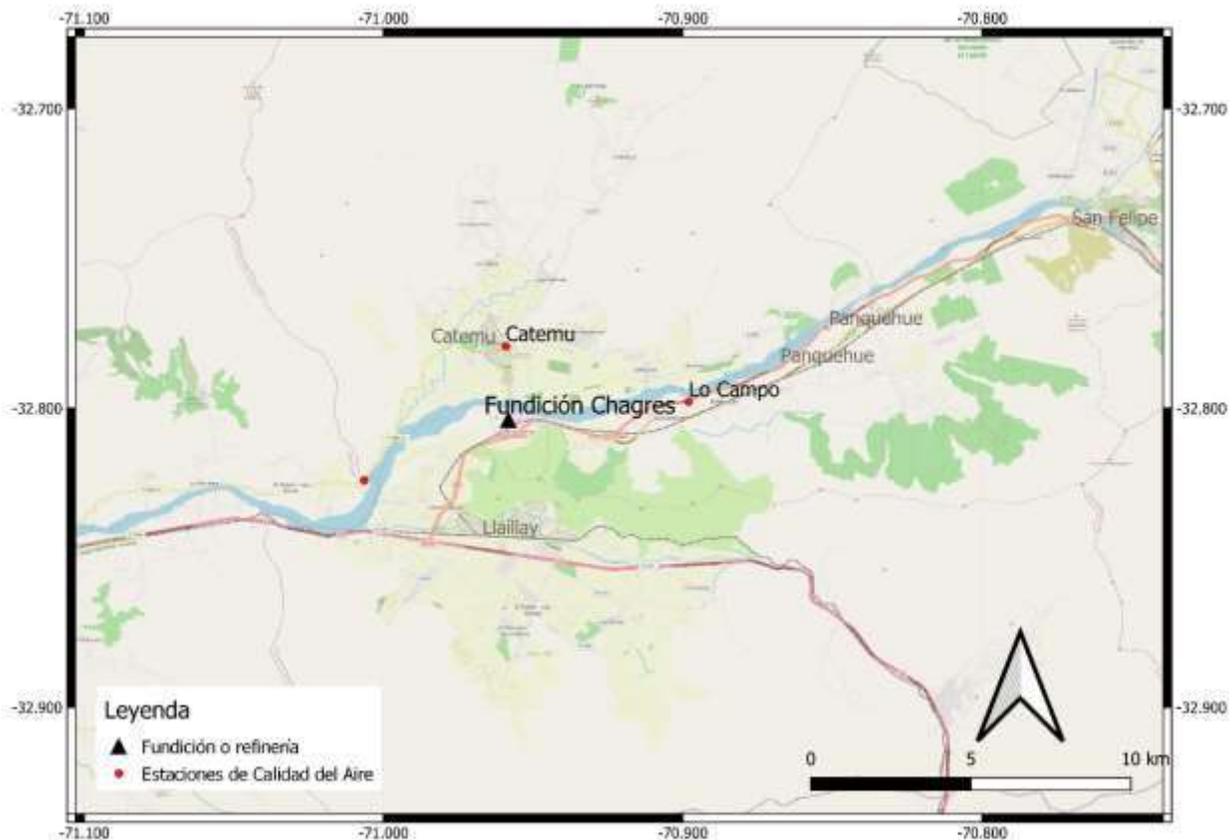


**Figura 2-38 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N], cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Las Gaviotas**

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.2.10 Estaciones cercanas a fundición Chagres

En la Figura 2-39 se muestra la ubicación de la fundición Chagres, donde se observa que su localidad más cercana es Catemu. Respecto de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire, se observa que la estación más cercana es Catemu, que se encuentra 2,9 kilómetros al norte de la fundición. Le sigue en cercanía la estación Lo Campo a 5,4 kilómetros en dirección este.



**Figura 2-39 Mapa fundición Chagres, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas**

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

En la Figura 2-40 se presenta la evolución de las concentraciones de As medida en las estaciones Catemu y Lo Campo, ubicadas en las cercanías de Chagres. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 2-84 y Tabla 2-85, respectivamente.

Cuando se publicó la norma de emisión (D.S. 28/2013 del MMA), Chagres ya contaba con una planta de ácido de doble contacto, por lo que de acuerdo con la regulación debía cumplir con los límites de emisión establecidos en la norma a partir de diciembre de 2016. A pesar de haber cumplido con los límites de emisión exigidos, se observa que en el año 2017 hubo un aumento en todos los estadígrafos de ambas estaciones de las concentraciones de arsénico, lo cual

coincide con que las emisiones reportadas de arsénico no disminuyeron en dicho año según lo que se describe en la Sección 3.3.6. Este aumento es temporal, puesto que al año 2018 ya se observa la recuperación a niveles similares a los observados en 2017, mientras que el 2019 y 2020 se observa una mejora importante en los estadígrafos de las concentraciones de arsénico. Esto se corresponde con una baja en la capacidad de producción de la fundición desde el año 2019 que se mantuvo hasta el año 2021.

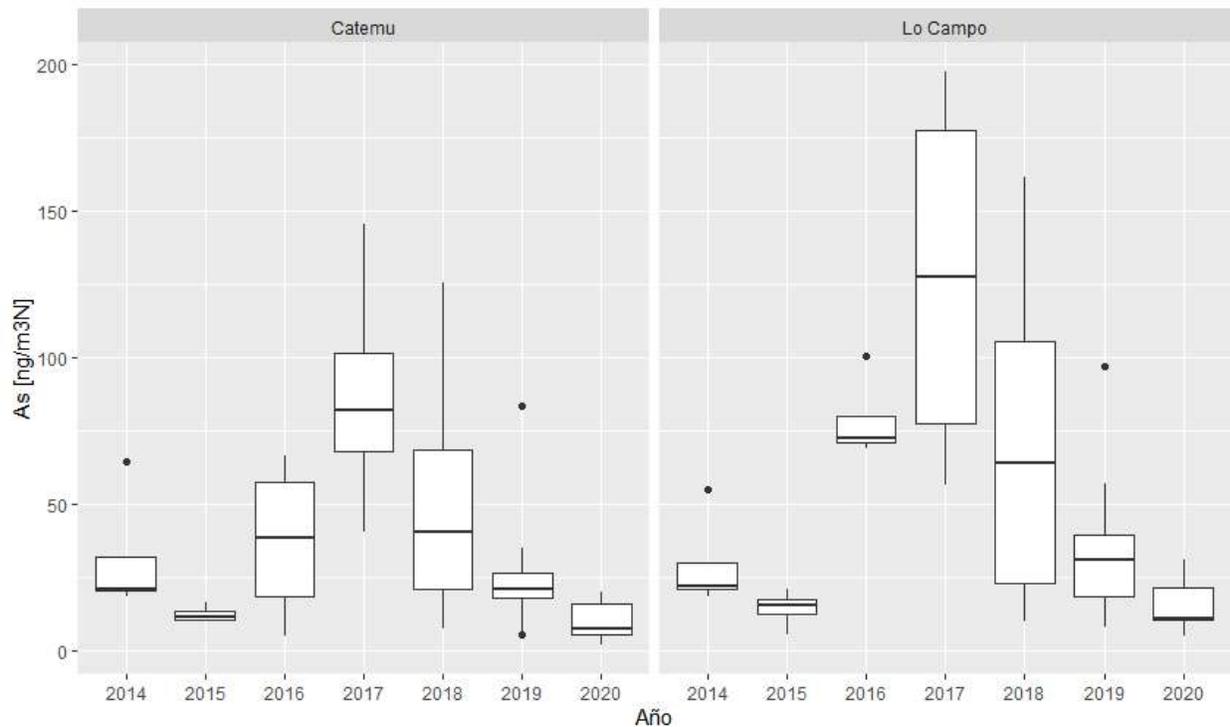
Pese a lo anterior, se debe destacar que se cuenta con escasos datos de medición, ya que la caracterización química de las muestras del MP10 se realiza una vez al mes desde mediados del año 2018<sup>13</sup>, mientras que en los años previos se realizaba cada tres meses<sup>14</sup>.

Se observa que los valores de la estación Lo Campo en general son mayores, a pesar de estar a una mayor distancia de la fundición y a que el viento en la estación Catemu viene predominantemente desde el sur (ver Anexo de la Sección 10.3.6). Esto se podría explicar por una dirección del viento en la estación Lo Campo dominante desde el Oeste (ver Anexo de la Sección 10.3.6), además de la baja cantidad de mediciones disponibles en ambas estaciones (desde 4 a 13 por año), las cuales corresponden a medias mensuales.

---

<sup>13</sup> Se realiza una caracterización química de un compósito mensual de las muestras de MP10 tomadas cada tres días

<sup>14</sup> Se realiza una caracterización química de un compósito trimestral de las muestras de MP10 tomadas cada tres días



**Figura 2-40 Concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chagres, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la estación Catemu (ver Tabla 2-84) se observa que entre los años 2014 y 2019 la mediana de las concentraciones de As se ha mantenido en el rango de 12 a 41 [ng/m<sup>3</sup>N], exceptuando el año 2017 donde se observa un aumento de todos los estadígrafos, con una mediana de 82 [ng/m<sup>3</sup>N]. El año 2020 se identifica una disminución de la mediana de un 83% respecto a la media de las medianas de los años anteriores. Es importante destacar que esto no se condice con la aplicación de la normativa, la cual comienza a regir para esta fundición a partir del año 2017. Cabe recordar que se cuenta con una baja cantidad de datos, que a su vez corresponden a medias trimestrales hasta 2017 y posteriormente mensuales, por lo que los estadígrafos analizados no muestran la variabilidad real que puede haberse observado diariamente.

**Tabla 2-84 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chagres, estación Catemu**

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	4	4	4	4	8	12	12	0
<b>Max.</b>	65	17	67	146	125	84	20	S/I
<b>3rd Qu.</b>	32	14	58	102	69	27	16	S/I
<b>Mediana</b>	21	12	39	82	41	21	8	S/I
<b>Media</b>	32	13	37	88	51	26	10	S/I
<b>1st Qu.</b>	21	11	18	68	21	18	6	S/I
<b>Min.</b>	19	11	5	41	8	6	2	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Lo Campo (ver Tabla 2-85) se observa que la concentración mediana de As tiende a aumentar entre los años 2016 y 2018, donde alcanza valores entre 64 y 128 [ng/m<sup>3</sup>N] — aumento que también se observa en Catemu en los mismos años—, mientras que los demás años se mantiene entre 11 y 31 [ng/m<sup>3</sup>N]. En cuanto a las concentraciones máximas, estas aumentan entre los años 2016 a 2019 – lo mismo sucede en Catemu en los mismos años –, alcanzando valores entre 97 y 198 [ng/m<sup>3</sup>N], mientras que en los demás años se mantienen entre 21 y 55 [ng/m<sup>3</sup>N].

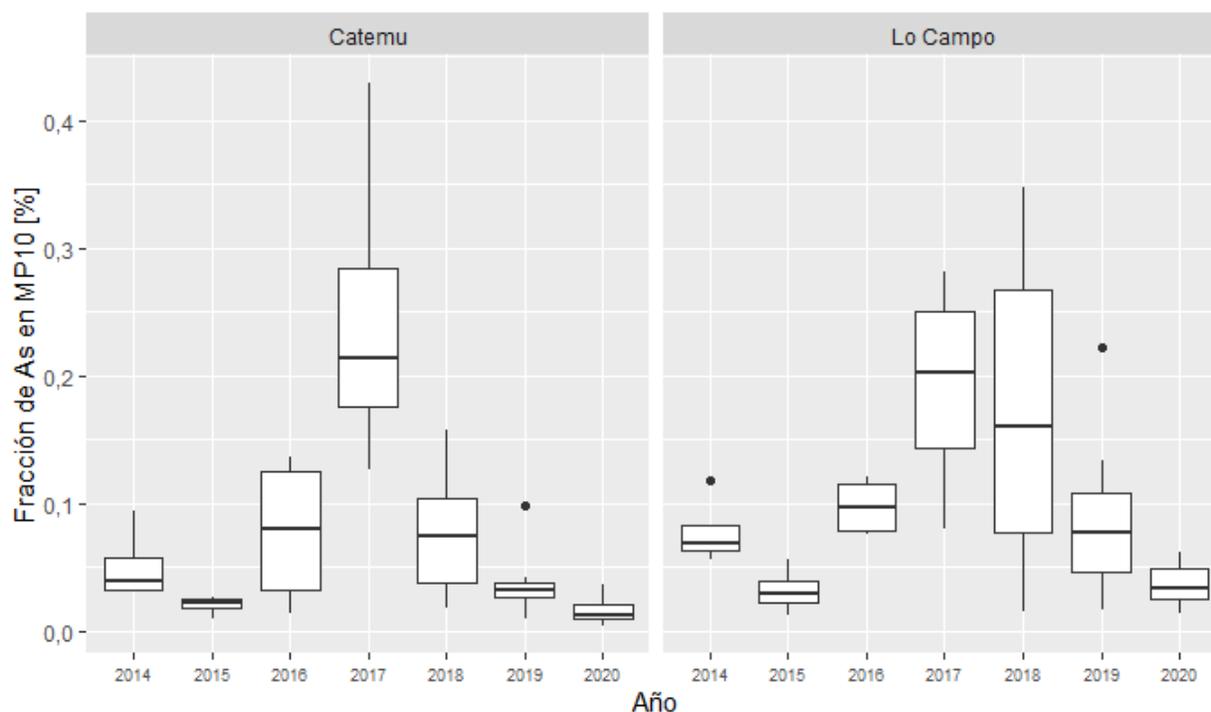
**Tabla 2-85 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chagres, estación Lo Campo**

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	4	4	4	4	8	12	11	0
<b>Max.</b>	55	21	101	198	162	97	31	S/I
<b>3rd Qu.</b>	30	18	80	178	105	40	22	S/I
<b>Mediana</b>	22	16	73	128	64	31	11	S/I
<b>Media</b>	29	15	79	127	70	35	16	S/I
<b>1st Qu.</b>	21	13	71	77	23	19	11	S/I
<b>Min.</b>	19	6	69	57	10	8	5	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-41 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas a partir del muestreo. Es importante mencionar que, en este caso, debido a que las mediciones de As se realizan trimestralmente hasta 2017 y de manera mensual posterior a esa fecha, a partir de la caracterización química del total de MP10 recolectado en filtros que se implementan en ciertos días, se calculó la fracción de As a partir del valor mensual dividido por el promedio de las mediciones diarias de filtros de MP10. Se observa una distribución muy similar a la presentada en la Figura 2-40. Sólo para el año 2018 y 2019, destaca la concentración de As medida por la estación Lo Campo respecto a la de Catemu, con una mediana aproximadamente 2.5 veces mayor para ambos años.



**Figura 2-41 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Chagres, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-86 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chagres, estación Catemu**

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	4	4	4	4	8	12	12	0
Max.	0,094	0,026	0,135	0,430	0,157	0,098	0,035	S/I
3rd Qu.	0,057	0,025	0,125	0,284	0,104	0,038	0,021	S/I
Mediana	0,039	0,022	0,080	0,214	0,074	0,031	0,012	S/I
Media	0,051	0,020	0,077	0,246	0,077	0,034	0,016	S/I
1st Qu.	0,032	0,017	0,032	0,175	0,038	0,026	0,010	S/I
Min.	0,031	0,009	0,014	0,126	0,018	0,009	0,004	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-87 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Chagres, estación Lo Campo**

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
N	4	4	4	4	8	12	11	0
Max.	0,118	0,056	0,121	0,281	0,348	0,222	0,062	S/I
3rd Qu.	0,083	0,039	0,115	0,250	0,267	0,107	0,049	S/I
Mediana	0,069	0,029	0,096	0,202	0,160	0,077	0,033	S/I
Media	0,078	0,032	0,097	0,191	0,173	0,084	0,037	S/I
1st Qu.	0,063	0,021	0,078	0,143	0,077	0,045	0,025	S/I
Min.	0,055	0,012	0,076	0,079	0,015	0,016	0,013	S/I

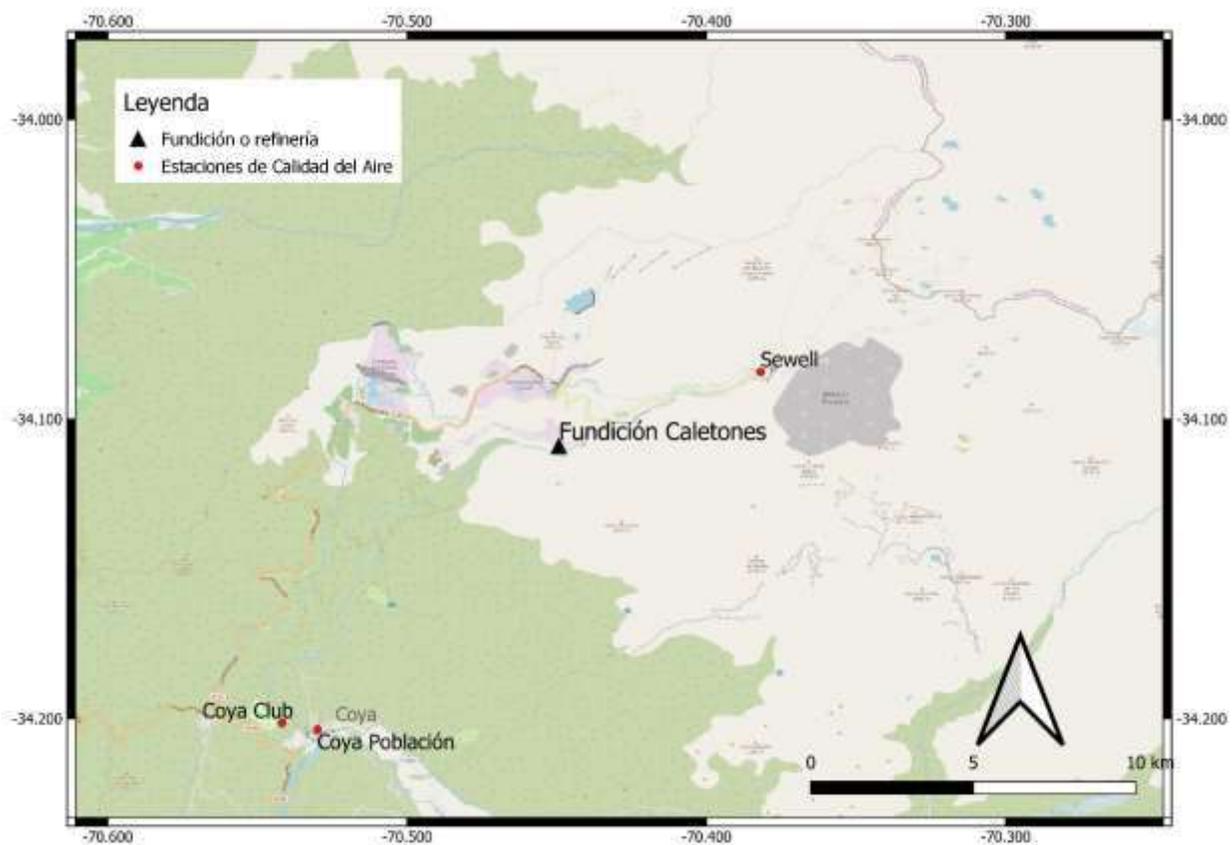
S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En el caso de esta fundición, dado que las mediciones son mensuales o trimestrales, hay muy pocos datos y por lo tanto no se presenta un análisis de su estacionalidad.

### 2.3.2.11 Estaciones cercanas a fundición Caletones

En la Figura 2-42 se muestra la ubicación de la fundición Caletones, donde se observa que su localidad más cercana es Coya. Respecto de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire, se observa que la estación más cercana es Sewell, que se encuentra 6,8 kilómetros al noreste de la fundición. Le sigue en cercanía Coya Población y Coya Club a 13,1 y 13,6 kilómetros en dirección suroeste, respectivamente.



**Figura 2-42 Mapa fundición Caletones, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas**

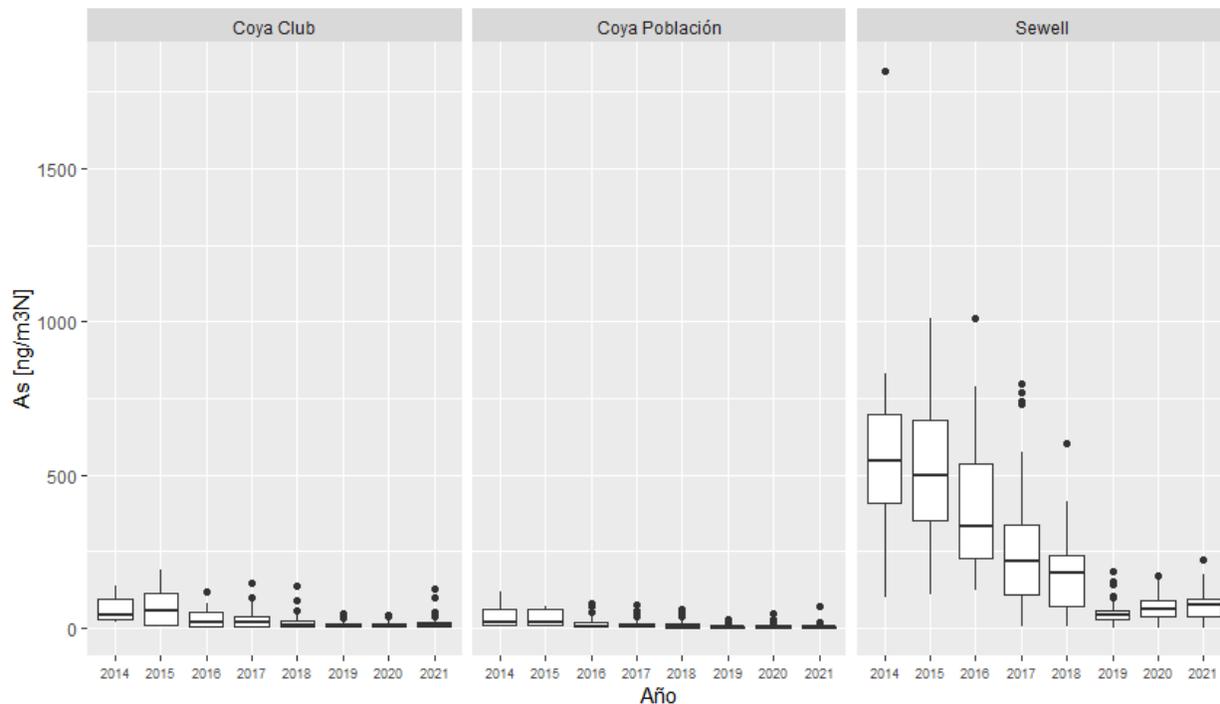
Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

En la Figura 2-43 se presenta la evolución de las concentraciones de As medida en las estaciones Coya Club, Coya Población y Sewell, ubicadas en las cercanías de Caletones. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 2-88, Tabla 2-89 y Tabla 2-90, respectivamente.

Cuando se publicó la norma de emisión (D.S. 28/2013 del MMA), Caletones no contaba con plantas de ácido de doble contacto, por lo que de acuerdo con la regulación debía cumplir las exigencias de emisiones de la norma a partir de diciembre de 2018. Su bien desde el 2015 se observa una mejora en las concentraciones de arsénico, es posible observar como las concentraciones disminuyen de forma aún más intensa a partir del año 2019 – año en que se debía comenzar a cumplir la norma – en todas las estaciones.

De las tres estaciones, se observa que las concentraciones de As de la estación Sewell superan a las concentraciones de las otras estaciones. Las altas concentraciones de la estación Sewell se condicen con la cercanía a la fundición (ver Figura 2-42) y con que alrededor de un 30% del tiempo el viento proviene del suroeste (ver Anexo de la Sección 10.3.7). Por otra parte, los valores registrados de la estación Coya Club son levemente mayores a los de Coya Población, sobre todo para el año 2015. La diferencia entre las estaciones Coya Club y Coya Población se podría explicar por las diferencias en vientos, a pesar de la cercanía geográfica. Coya Club presenta más horas con viento desde el Norte (donde se encuentra la fundición) lo que explicaría valores levemente mayores (ver Anexo de la Sección 10.3.7). Cabe destacar que las concentraciones reportadas para el año 2015 corresponden a medias mensuales, a diferencia del resto de las mediciones que corresponden a concentraciones diarias.

Por último, se observa un comportamiento de las concentraciones similar al de las emisiones de arsénico de la fundición (ver Figura 3-56 de la Sección 3.3.5), distinguiéndose una disminución constante a partir del año 2015 en general en los estadígrafos, los que vuelven a aumentar a partir del año 2020. Esto último se puede deber a que la fundición tendió a aumentar su producción hacia el régimen normal luego de la aplicación de las medidas para dar cumplimiento a la norma.



**Figura 2-43 Concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Caletones, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la estación Coya Club (ver Tabla 2-88) se observa que la concentración mediana del año 2015 supera en promedio 3 veces la concentración mediana de los años 2016 al 2018. Sin embargo, las muestras para el año 2015 corresponden a solo doce valores, por lo que esta comparación no es concluyente. Entre los años 2016 a 2018 la mediana de las concentraciones de As se mantiene en un rango entre 12 y 21 [ng/m<sup>3</sup>N], y en los años 2019 y 2020 se observa una disminución, manteniéndose en el rango de 5 a 6 [ng/m<sup>3</sup>N]. Sin embargo, se observa un aumento el año 2021 a 10 [ng/m<sup>3</sup>N].

**Tabla 2-88 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Club**

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	12	12	27	48	46	47	47	46
<b>Max.</b>	140	190	120	146	139	46	42	127
<b>3rd Qu.</b>	95	113	50	39	24	13	15	19
<b>Mediana</b>	45	55	21	18	12	6	5	10
<b>Media</b>	63	72	32	29	20	10	10	18
<b>1st Qu.</b>	30	10	7	5	3	3	3	5
<b>Min.</b>	20	10	2	1	1	1	1	1

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Coya Población (ver Tabla 2-89) se observa que la concentración mediana se ha mantenido relativamente estable durante todo el periodo entre 3 y 20 [ng/m<sup>3</sup>N]. Respecto a los valores máximos, se observa que se mantienen estables durante todo el periodo entre 28 y 120 [ng/m<sup>3</sup>N].

**Tabla 2-89 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Población**

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	12	12	57	111	107	105	108	110
<b>Max.</b>	120	70	80	77	62	28	46	72
<b>3rd Qu.</b>	60	63	20	17	15	7	9	7
<b>Mediana</b>	20	20	7	6	5	3	3	4
<b>Media</b>	38	34	14	12	10	5	6	5
<b>1st Qu.</b>	10	10	3	3	2	1	2	2
<b>Min.</b>	10	10	1	1	1	1	1	1

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Nota: Se excluyen los valores de concentraciones de As de los días 13 de julio y 8 de agosto de 2017 correspondientes a 1 [ng/m<sup>3</sup>N], ya que se consideran *outliers* (ver Anexo de la Sección 10.1).

Fuente: Elaboración propia

En la estación Sewell (ver Tabla 2-90) se observa que la mediana de las concentraciones entre los años 2016 y 2018 disminuye de 333 a 179 [ng/m<sup>3</sup>N], y luego presenta una mayor disminución, alcanzando una mediana promedio entre los años 2019 y 2020 de 53 [ng/m<sup>3</sup>N]. Esto se observa claramente en el gráfico de la Figura 2-43. Esta disminución a partir del año 2019 podría tener relación con que la fecha de inicio de cumplimiento de la norma es a partir de dicho año. Sin embargo, se observa un leve aumento de los estadígrafos en el año 2021.

**Tabla 2-90 Estadígrafos concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Caletones, estación Sewell**

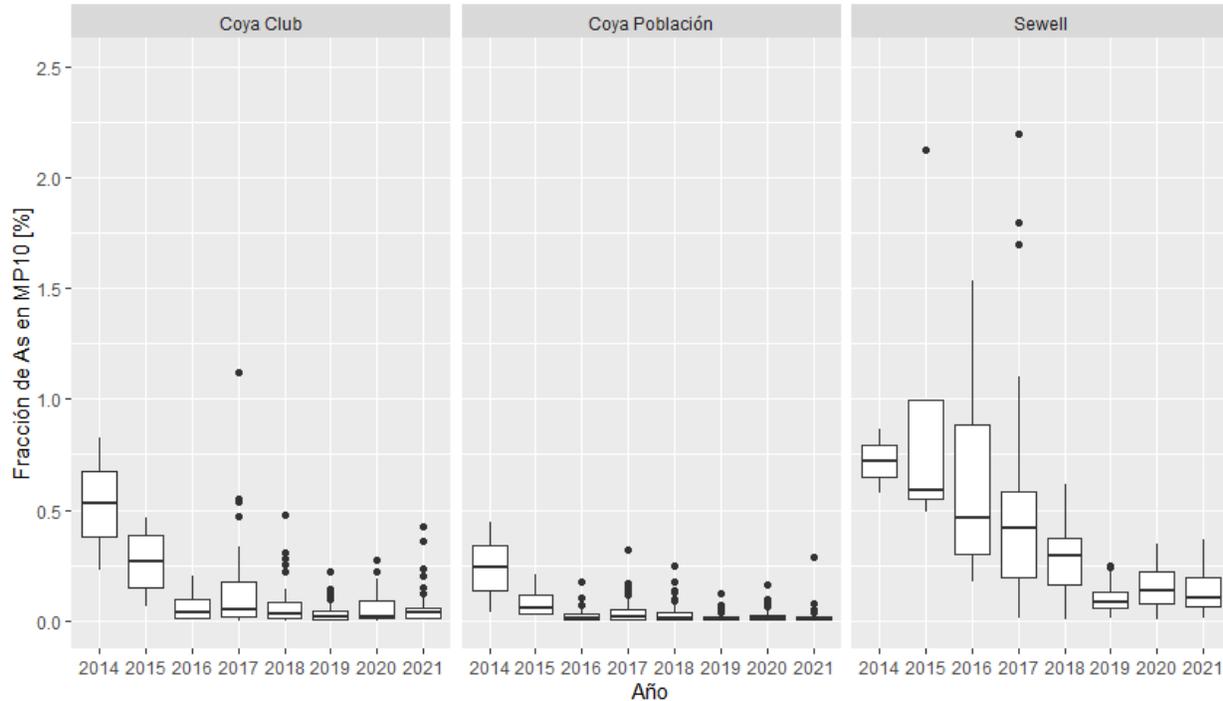
Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	12	12	24	50	48	45	48	46
<b>Max.</b>	1.820	1.010	1.013	797	601	185	171	221
<b>3rd Qu.</b>	698	680	535	338	237	56	89	96
<b>Mediana</b>	545	500	333	218	179	41	64	76
<b>Media</b>	614	524	388	261	172	51	67	74
<b>1st Qu.</b>	410	353	226	109	71	29	38	36
<b>Min.</b>	100	110	123	3	5	2	1	2

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-44 se presentan las gráficas boxplot para la fracción de As en el MP10 obtenidas mediante el muestreo. Se observa que en las estaciones Coya Club y Coya Población la fracción de As en MP10 es relativamente constante, sin presentarse grandes variaciones interanuales posteriores al 2016. Por su parte, en la estación Sewell se observa una tendencia a la disminución entre los años 2016 y 2019. Los estadígrafos se presentan en la Tabla 2-91, Tabla 2-92 y Tabla 2-

93, observándose que para el año 2021 la mediana de la fracción para la estación Coya Club fue de 0,04%, mientras que para la estación Coya Población fue de 0,01% y para estación Sewell de 0,11%. Nuevamente, la mayor concentración de As como fracción en el MP10 en las mediciones de la estación Sewell se condicen con su mayor cercanía a la fundición.



Nota 1: En estación Sewell no se muestra valor 21,333%, reportado con fecha del 1 de octubre de 2015, ni el valor 3,729%, reportado con fecha del 20 de abril de 2017.

**Figura 2-44 Fracción de As en MP10 [%], cercanías fundición Caletones, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-91 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Club**

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	2	4	22	48	44	46	47	46
<b>Max.</b>	0,824	0,462	0,205	1,123	0,479	0,219	0,275	0,423
<b>3rd Qu.</b>	0,675	0,384	0,099	0,179	0,087	0,043	0,089	0,060
<b>Mediana</b>	0,527	0,267	0,037	0,054	0,033	0,019	0,022	0,042
<b>Media</b>	0,527	0,265	0,065	0,137	0,071	0,038	0,057	0,064
<b>1st Qu.</b>	0,379	0,148	0,016	0,016	0,010	0,009	0,011	0,016
<b>Min.</b>	0,231	0,063	0,007	0,001	0,002	0,003	0,002	0,003

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-92 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Población**

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	2	4	52	111	103	104	108	110
<b>Max.</b>	0,444	0,212	0,176	0,321	0,248	0,122	0,164	0,288
<b>3rd Qu.</b>	0,342	0,114	0,032	0,050	0,038	0,019	0,028	0,019
<b>Mediana</b>	0,240	0,057	0,012	0,017	0,015	0,010	0,009	0,010
<b>Media</b>	0,240	0,089	0,024	0,035	0,032	0,016	0,020	0,016
<b>1st Qu.</b>	0,138	0,032	0,007	0,007	0,006	0,004	0,006	0,005
<b>Min.</b>	0,036	0,031	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

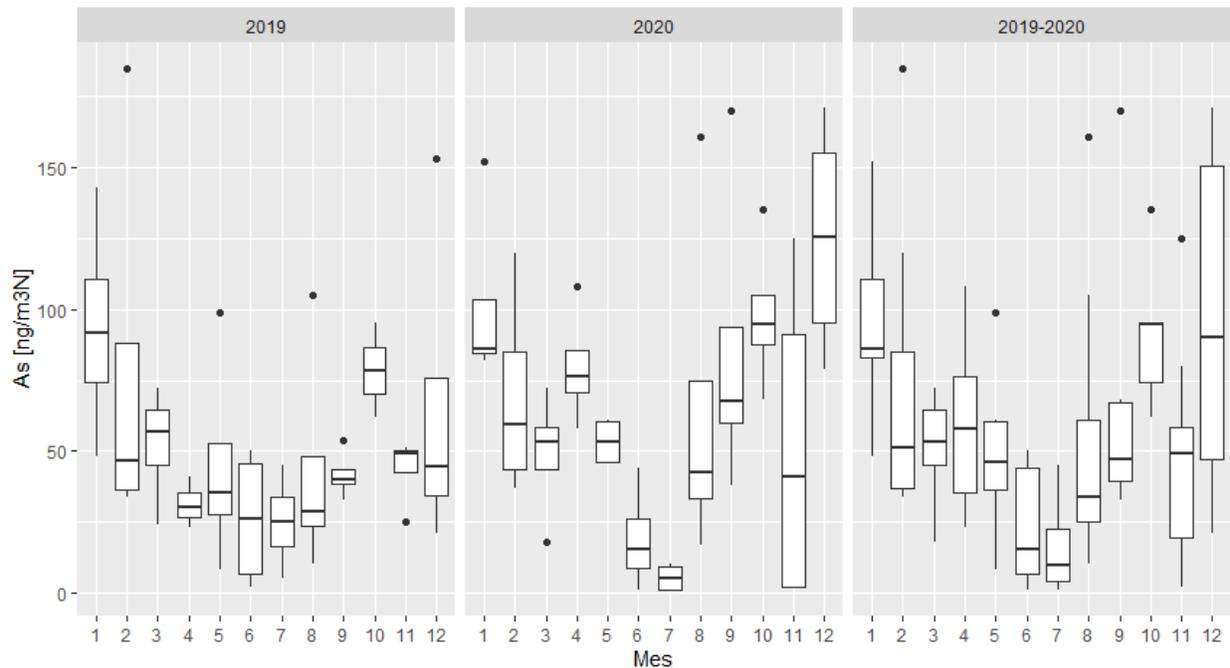
**Tabla 2-93 Fracción de As en MP10 [%] en cercanías fundición Caletones, estación Sewell**

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	2	5	22	48	47	45	48	46
<b>Max.</b>	0,867	21,333	1,535	3,729	0,614	0,247	0,345	0,368
<b>3rd Qu.</b>	0,794	2,125	0,884	0,609	0,372	0,126	0,220	0,195
<b>Mediana</b>	0,721	0,615	0,462	0,424	0,293	0,086	0,138	0,106
<b>Media</b>	0,721	5,026	0,616	0,565	0,277	0,103	0,146	0,129
<b>1st Qu.</b>	0,648	0,568	0,298	0,199	0,162	0,057	0,076	0,066
<b>Min.</b>	0,576	0,488	0,178	0,014	0,008	0,012	0,004	0,015

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 2-45 se presentan las concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N] mensualmente para los años 2019, 2020 y ambos en conjunto de la estación Sewell, estación más cercana a la fundición. Al contrario de lo que sucede en las estaciones cercanas a las demás fundiciones, las concentraciones tienden a disminuir en invierno, específicamente entre los meses de mayo y septiembre. Esto se explica por las mayores precipitaciones en invierno al encontrarse en una zona precordillerana y más lluviosa.



**Figura 2-45 Estacionalidad de la concentración de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N], cercanías fundición Caletones, estación Sewell**

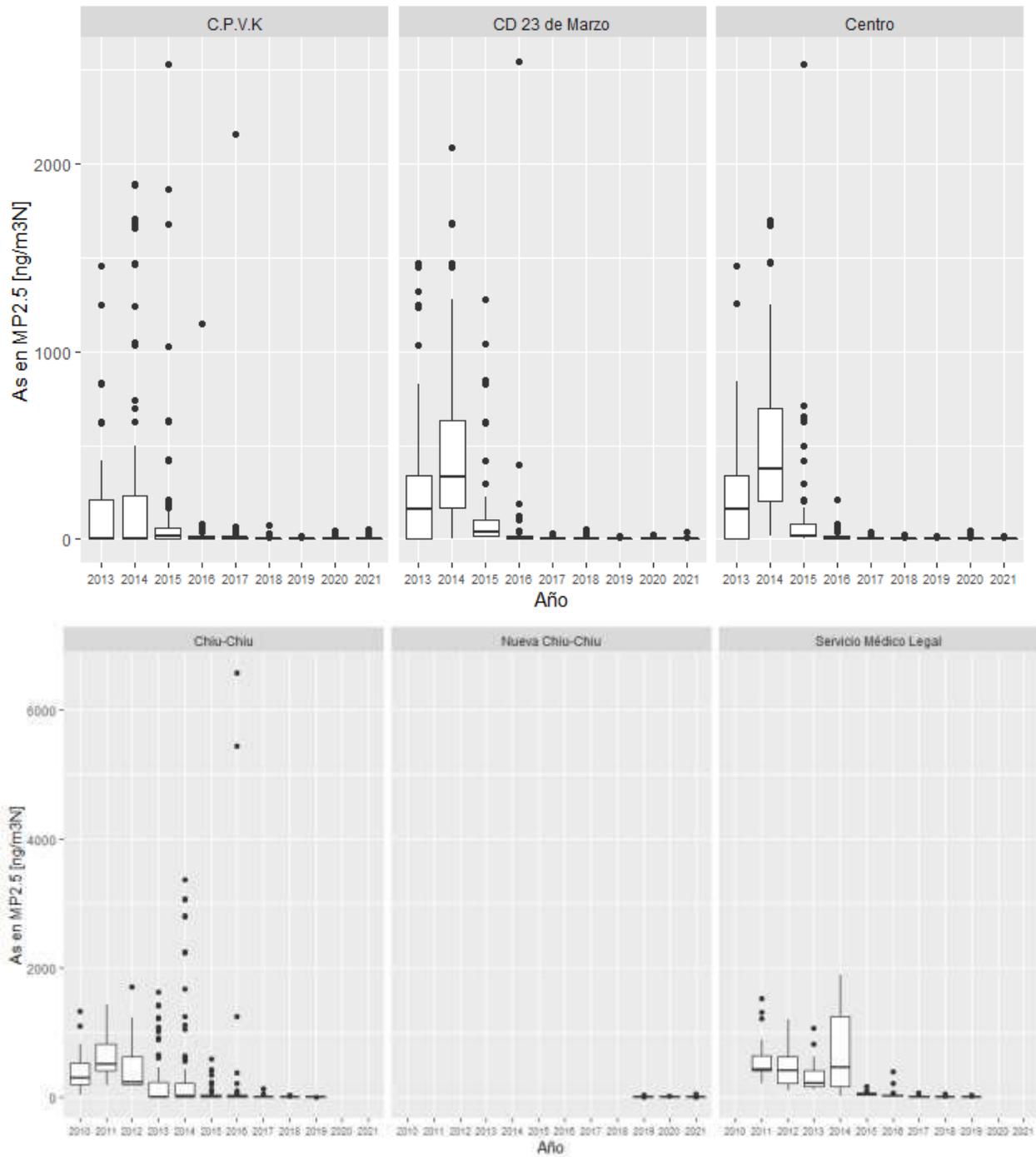
Fuente: Elaboración propia

### 2.3.3 Análisis longitudinal de As en MP2,5 por estaciones

A continuación, se describe la evolución en el tiempo de las concentraciones de arsénico medidas en MP2,5, con detalles por estación, para las estaciones en que se contaba con este antecedente. Cabe recordar que, entre las fundiciones, solo fue posible presentar el análisis de As en MP2,5 para las estaciones cercanas a la fundición Chuquicamata (ver Sección 2.3.3.1) y a la fundición Ventanas (ver Sección 2.3.3.3).

#### 2.3.3.1 Estaciones cercanas a fundición Chuquicamata

Las estaciones cercanas a la fundición de Chuquicamata cuentan con mediciones de MP2,5 y caracterización química de este, lo que permite hacer también un análisis de las concentraciones de arsénico en material particulado fino. En la Figura 2-46 y Figura 2-47 se presenta la evolución temporal de la concentración de As en MP2,5 medida en las estaciones C.P.V.K, CD 23 de Marzo, Centro, Chiu-Chiu, Nueva Chiu-Chiu, Servicio Médico Legal y Hospital El Cobre. La estación Aukahuasi no cuenta con mediciones de MP2,5. Los estadígrafos de las concentraciones se presentan en la Tabla 2-94, Tabla 2-95, Tabla 2-96, Tabla 2-97, Tabla 2-99, y Tabla 2-100 respectivamente.

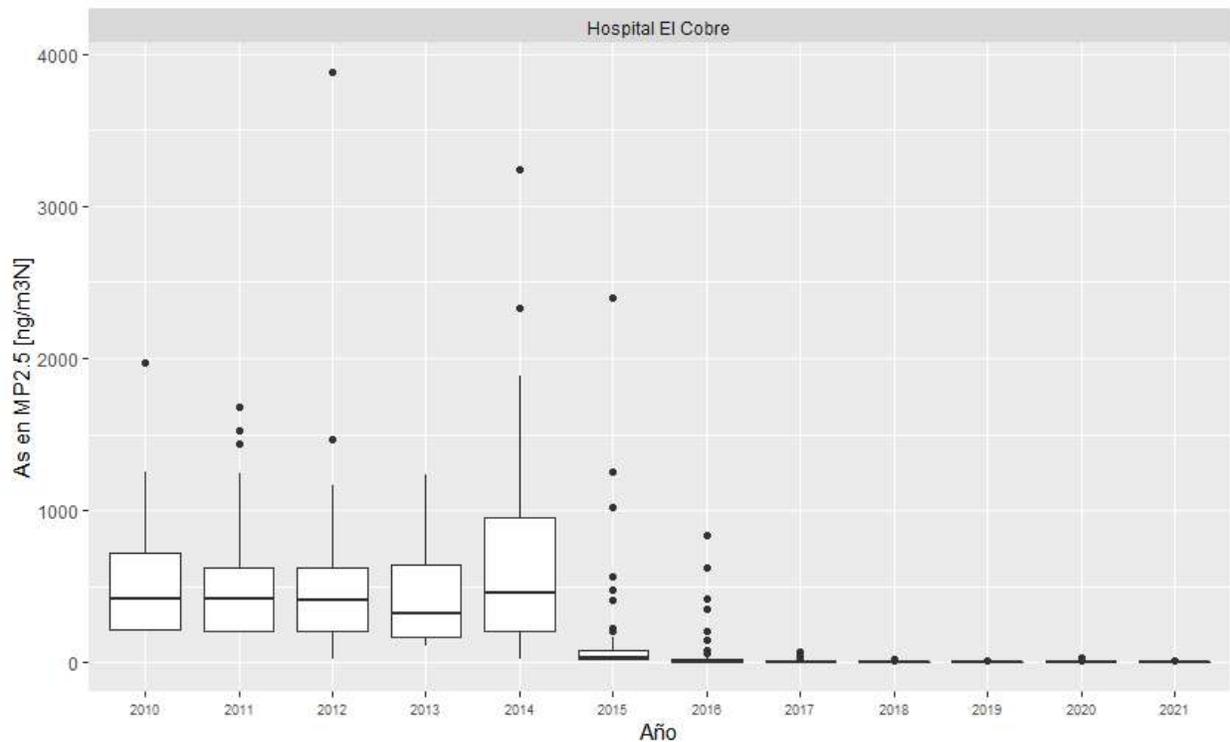


Nota 1: Las gráficas del primer conjunto de estaciones (C.P.V.K, CD 23 de Marzo, y Centro) tienen escalas de concentración diferente al segundo conjunto (Nueva Chiu-Chiu, y Servicio Médico Legal).

Nota 2: En estación C.P.V.K no se muestra valor 5.032 ng/m<sup>3</sup>N, reportado con fecha del 11 de abril 2014.

**Figura 2-46 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m3N] en cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones, excepto Hospital El Cobre**

Fuente: Elaboración propia

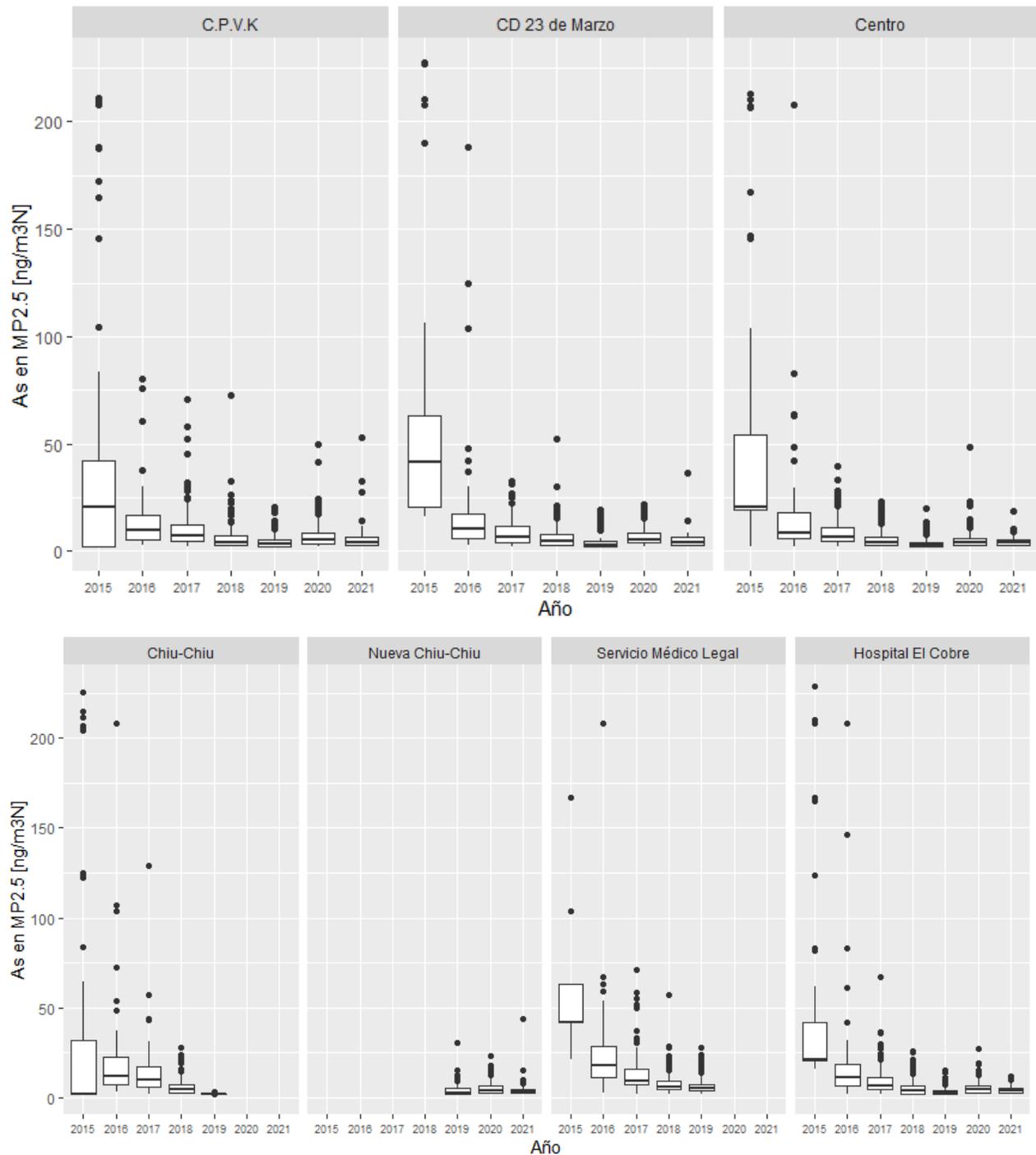


**Figura 2-47 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m3N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre**

Fuente: Elaboración propia

A diferencia del caso de concentración de arsénico en MP10 presentado en la Figura 2-7 y en la Figura 2-8, se observan mayores concentraciones de As en la estación CD 23 de Marzo durante los años 2013 a 2015. Debido a los mayores valores de dichos años en comparación con el resto, la escala del gráfico no permite hacer una comparación a simple vista de los valores de los años 2016 a 2021, por lo que se presenta también la Figura 2-48, donde se observan únicamente dichos años.

De esta forma, es posible observar que, a pesar de que para el año 2016 las concentraciones máximas de la estación CD 23 de Marzo son mayores respecto a las de las demás estaciones, las concentraciones tienden a ser muy similares entre las estaciones C.P.V.K, CD 23 de Marzo y Centro. Al igual que en el caso del MP10, las concentraciones en las estaciones Nueva Chiu-Chiu y Servicio Médico Legal se encuentran en una escala menor.



**Figura 2-48 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m3N] en cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones, años 2015 a 2021, valores inferiores a 250 ng/m3N**

Fuente: Elaboración propia

A partir de los estadígrafos se puede observar que las concentraciones de As van disminuyendo a través del tiempo en todas las estaciones, especialmente a partir del año 2015 en las estaciones C.P.V.K, CD 23 de Marzo, Centro y Hospital El Cobre y del año 2014 en las estaciones Chiu-Chiu y

Servicio Médico Legal. Para el año 2020, la mediana de las concentraciones de las distintas estaciones se mantiene entre 4 y 6 [ng/m<sup>3</sup>N].

**Tabla 2-94 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación C.P.V.K**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	100	106	107	74	104	115	104	114	36
<b>Max.</b>	1.459	5.032	2.531	1.146	2.159	73	21	50	53
<b>3rd Qu.</b>	208	308	62	17	13	7	5	9	7
<b>Mediana</b>	2	2	21	10	7	4	3	6	4
<b>Media</b>	155	355	127	29	32	7	5	8	7
<b>1st Qu.</b>	2	2	2	5	5	3	2	3	3
<b>Min.</b>	2	2	2	3	2	2	2	2	2

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-95 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación CD 23 de Marzo**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	70	41	66	85	108	118	117	119	35
<b>Max.</b>	1.469	2.086	1.277	2.542	33	52	19	22	37
<b>3rd Qu.</b>	340	630	106	18	11	8	5	8	7
<b>Mediana</b>	160	335	42	11	7	5	3	5	4
<b>Media</b>	258	531	166	51	9	7	4	7	6
<b>1st Qu.</b>	2	167	21	6	4	3	2	4	3
<b>Min.</b>	2	2	16	3	2	2	2	2	2

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-96 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Centro**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	59	42	91	86	112	113	117	118	36
<b>Max.</b>	1.458	1.702	2.526	208	39	23	20	48	19
<b>3rd Qu.</b>	341	696	83	18	11	7	4	6	5
<b>Mediana</b>	160	375	21	9	7	4	2	4	4
<b>Media</b>	239	561	122	20	9	6	4	6	4
<b>1st Qu.</b>	2	207	20	6	4	3	2	2	3
<b>Min.</b>	2	21	2	2	2	2	2	2	2

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-97 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Chiu-Chiu**

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
<b>N</b>	32	66	43	113	113	114	88	114	117	19
<b>Max.</b>	1.331	1.424	1.703	1.627	3.371	587	6.563	129	28	3
<b>3rd Qu.</b>	530	825	625	227	210	34	25	17	7	2
<b>Mediana</b>	298	514	227	2	22	2	12	10	5	2
<b>Media</b>	395	615	448	259	335	46	176	13	6	2
<b>1st Qu.</b>	204	406	205	2	2	2	8	6	3	2
<b>Min.</b>	32	184	203	2	2	2	3	2	2	2

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-98 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Nueva Chiu-Chiu**

Año	2019	2020	2021
<b>N</b>	87	120	36
<b>Max.</b>	31	23	44
<b>3rd Qu.</b>	5	7	5
<b>Mediana</b>	3	4	3
<b>Median</b>	4	5	5
<b>1st Qu.</b>	2	2	3
<b>Min.</b>	2	2	2

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-99 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ $\text{ng}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Servicio Médico Legal**

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	51	69	33	45	10	91	122	122	116	0	0
<b>Max.</b>	S/I	1.533	1.203	1.068	1.885	167	396	71	57	28	S/I	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/I	635	625	416	1255	63	30	16	9	7	S/I	S/I
<b>Mediana</b>	S/I	421	417	210	466	42	18	10	6	5	S/I	S/I
<b>Median</b>	S/I	526	467	339	683	61	33	14	9	6	S/I	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/I	412	211	169	167	42	11	7	5	4	S/I	S/I
<b>Min.</b>	S/I	208	104	110	20	21	3	2	2	2	S/I	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

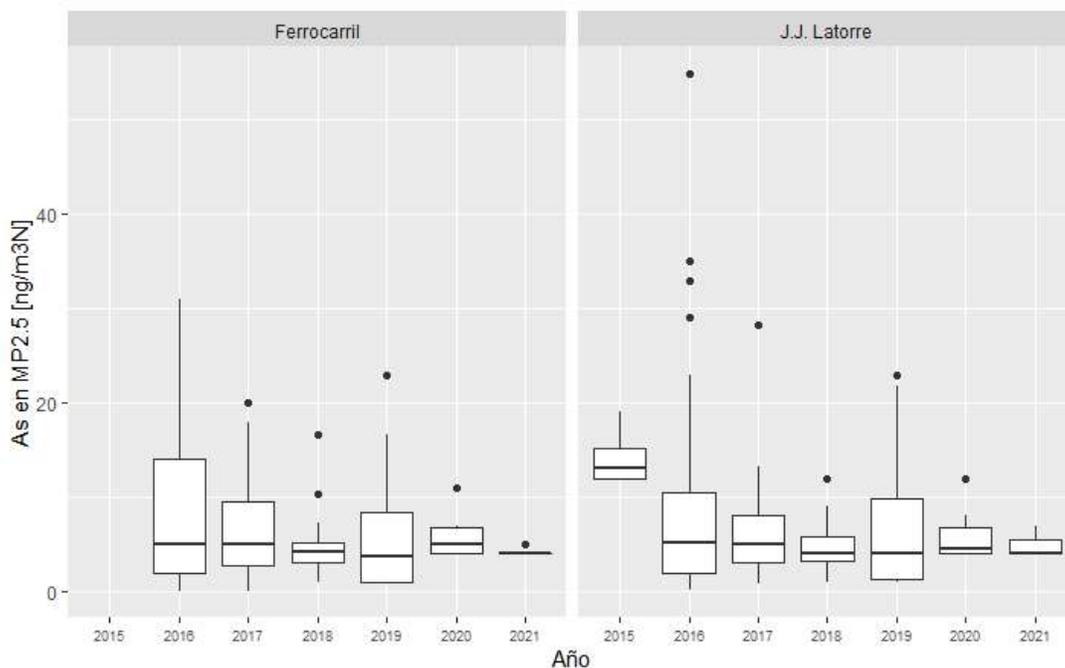
**Tabla 2-100 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre**

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	38	62	63	35	50	62	95	114	115	116	120	37
<b>Max.</b>	1.969	1.677	3.877	1.238	3.244	2.396	833	67	26	15	27	12
<b>3rd Qu.</b>	717	623	619	646	957	82	21	11	7	4	7	5
<b>Mediana</b>	417	418	412	317	456	34	11	7	4	2	5	4
<b>Median</b>	539	494	493	421	682	146	55	10	6	4	6	5
<b>1st Qu.</b>	211	209	209	171	208	20	7	5	2	2	3	2
<b>Min.</b>	204	205	21	110	20	16	2	2	2	2	2	2

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.3.2 Estaciones cercanas a termoeléctricas Andina y Mejillones

En la Figura 2-49 se presenta la evolución de la concentración de As medida en las estaciones ubicadas en las cercanías de las termoeléctricas Andina y Mejillones (ver Figura 2-15), sus estadígrafos resumidos en las siguientes dos tablas.



**Figura 2-49 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

Para la estación Ferrocarril (ver Tabla 2-101) se observan las concentraciones medianas de As en el rango entre 4 y 5 [ng/m<sup>3</sup>N], con máximas entre 11 y 31 [ng/m<sup>3</sup>N] hasta 2020.

**Tabla 2-101 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación Ferrocarril**

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	57	40	35	34	11	5
<b>Max.</b>	S/I	31	20	17	23	11	5
<b>3rd Qu.</b>	S/I	14	10	5	8	7	4
<b>Mediana</b>	S/I	5	5	4	4	5	4
<b>Media</b>	S/I	9	7	5	6	6	4
<b>1st Qu.</b>	S/I	2	3	3	1	4	4
<b>Min.</b>	S/I	0	0	1	1	4	4

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación J.J. Latorre (Tabla 2-102), al igual que en la estación Ferrocarril, las concentraciones medianas de As se mantienen en el rango de 4 y 5 [ng/m<sup>3</sup>N], sin considerar los años 2015 y 2021 debido a que solo cuentan con cuatro y 3 mediciones respectivamente. Mientras que los valores máximos medidos se encuentran en el orden de 12 a 28 [ng/m<sup>3</sup>N], exceptuando el año 2016 en que se observa una medición de 55 [ng/m<sup>3</sup>N].

**Tabla 2-102 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m<sup>3</sup>N] en cercanías termoeléctricas Andina y Mejillones, estación J.J. Latorre**

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	4	46	33	26	26	10	3
<b>Max.</b>	19	55	28	12	23	12	7
<b>3rd Qu.</b>	15	11	8	6	10	7	6
<b>Mediana</b>	13	5	5	4	4	5	4
<b>Media</b>	14	10	6	5	6	6	5
<b>1st Qu.</b>	12	2	3	3	1	4	4
<b>Min.</b>	12	0	1	1	1	4	4

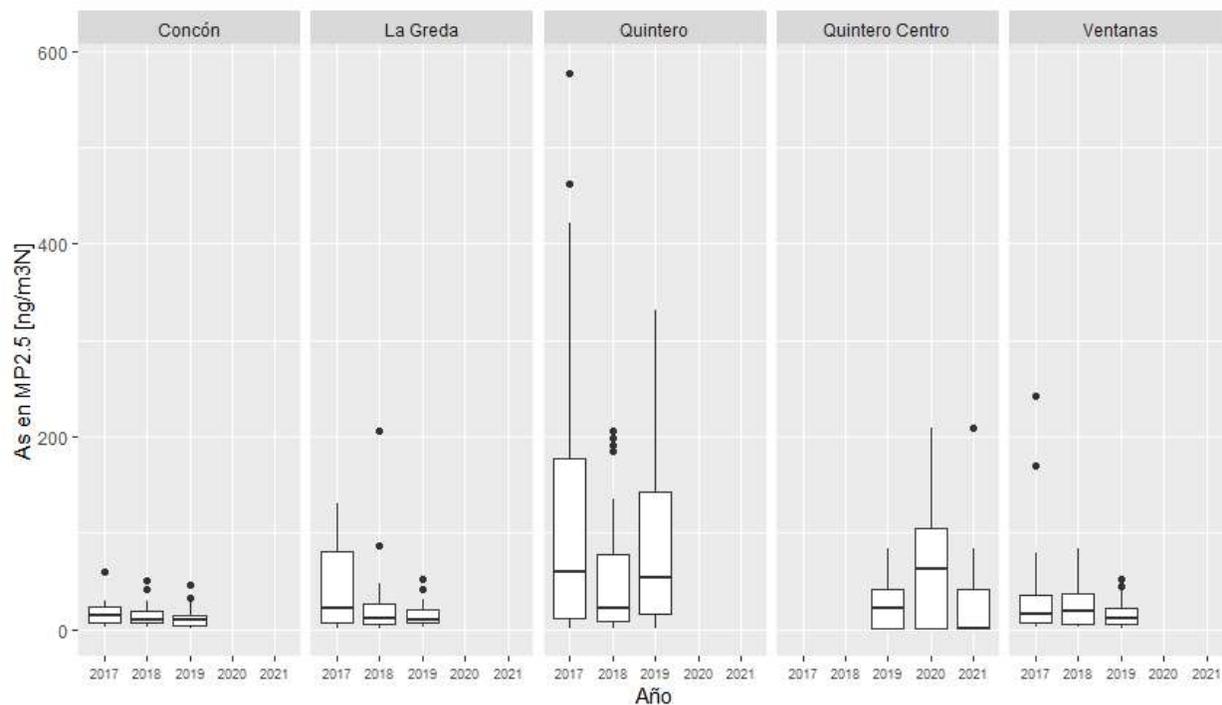
Fuente: Elaboración propia

### 2.3.3.3 Estaciones cercanas a fundición Ventanas

En la Figura 2-50 se presentan las mediciones de As en MP2,5 en las estaciones cercanas a la fundición Ventanas (su ubicación disponible en la Figura 2-31 y Figura 2-35), incluida la estación Concón de ENAP. Los estadígrafos asociados se presentan en la Tabla 2-103.

Se observa que los valores de concentración presentan medianas entre 1 y 54 [ng/m<sup>3</sup>N]. En la estación Quintero es donde se observan las mayores concentraciones, seguido por Quintero Centro y La Greda, mientras que el valor observado en Concón es significativamente menor, lo que es coherente con su mayor lejanía y vientos predominantes desde el Sur. Los altos valores de Quintero en comparación a las otras dos estaciones cercanas no es del todo esperable si se considera que recibe vientos principalmente desde el Sur (ver Anexo de la Sección 10.3.5), sin embargo, esto se explica por ciertas condiciones meteorológicas de la zona que producen que las emisiones de la fundición se dirijan a estas estaciones. En 2017 se alcanzan los mayores

valores de máximas, exceptuando la Greda en que se observa en 2018 y Quintero Centro, estación que registra una menor cantidad de datos.



**Figura 2-50 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m3N] en la región de Valparaíso**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-103 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m3N] en la región de Valparaíso**

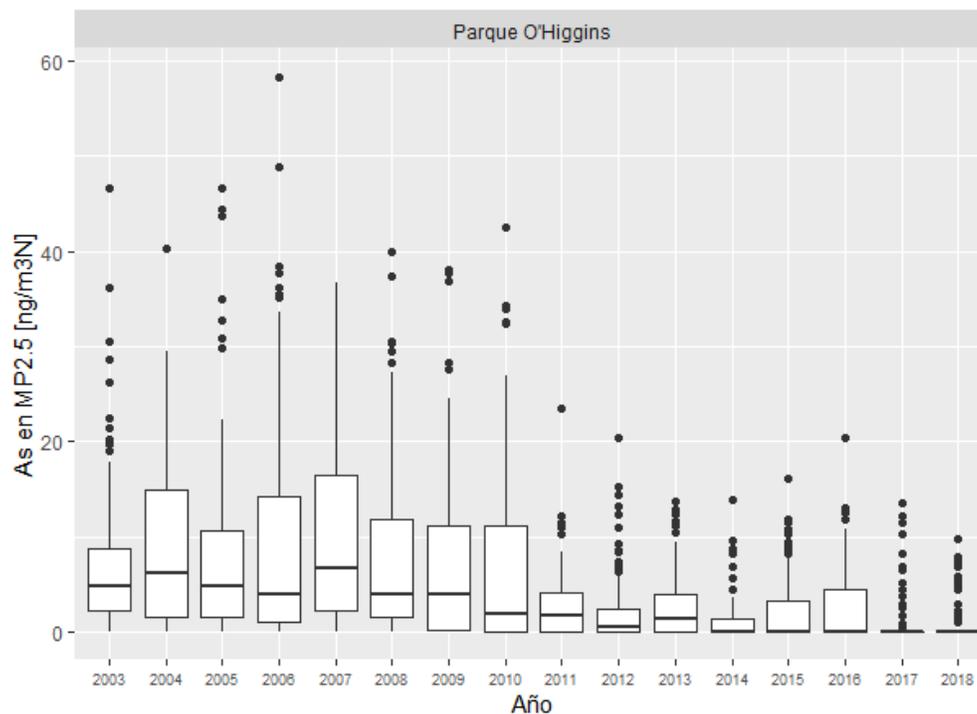
Estación	Concón			La Greda			Quintero			Quintero Centro			Ventanas		
Año	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2019	2020	2021	2017	2018	2019
<b>N</b>	23	28	21	25	28	26	30	29	29	12	12	7	24	26	27
<b>Max.</b>	60	50	47	130	205	52	577	206	331	83	208	208	242	83	52
<b>3rd Qu.</b>	23	18	15	81	26	20	178	78	143	42	104	42	36	37	21
<b>Mediana</b>	15	9	10	22	12	10	60	22	54	21	62	1	16	19	11
<b>Media</b>	16	14	13	41	24	15	121	56	87	25	71	42	37	23	16
<b>1st Qu.</b>	6	6	4	7	5	7	12	8	16	1	1	1	7	6	6
<b>Min.</b>	2	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	1

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.3.4 Estaciones de la ciudad de Santiago

En la Figura 2-51 se presentan las mediciones de As en MP2,5 en la estación Parque O’Higgins de la región Metropolitana. En este caso se cuenta con un perfil temporal extenso, en que se observa una clara disminución de las concentraciones de As en MP2,5 a partir de 2011. Desde el año 2003 hasta 2009, la concentración mediana se encontraba en el rango de 4 a 7 [ng/m3N], para luego

disminuir a 0 a 2 [ng/m3N] de 2010 a 2013, para posteriormente estabilizarse con una mediana de valor 0 [ng/m3N] desde 2014, lo que en 2017 y 2018 se acentúa por cuanto se observa que el 75% de los valores reportados son iguales a 0 [ng/m3N]. En cuanto al estadígrafo de máximas, hasta 2010 se alcanzaban concentraciones entre 37 y 58 [ng/m3N], mientras que desde 2011 estas se mantienen en el rango de 10 a 23 [ng/m3N]. Los estadígrafos asociados se presentan en la Tabla 2-104.



**Figura 2-51 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m3N] en la estación Parque O’Higgins de la ciudad de Santiago**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-104 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m3N] en la estación Parque O’Higgins de la ciudad de Santiago**

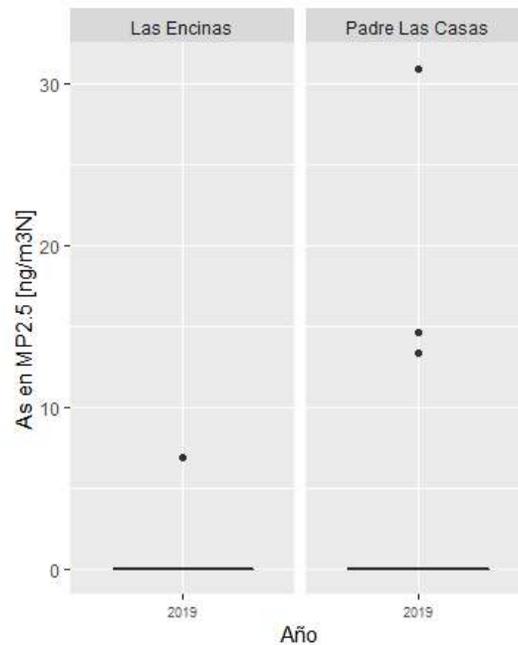
Año	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
N	81	88	86	88	89	104	85	92
Max.	47	40	47	58	37	40	38	43
3rd Qu.	9	15	11	14	16	12	11	11
Mediana	5	6	5	4	7	4	4	2
Media	8	9	9	10	9	8	8	7
1st Qu.	2	2	2	1	2	1	0	0
Min.	0	0	0	0	0	0	0	0

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
<b>N</b>	98	109	92	49	88	89	84	80
<b>Max.</b>	23	20	14	14	16	20	14	10
<b>3rd Qu.</b>	4	2	4	1	3	4	0	0
<b>Mediana</b>	2	0	1	0	0	0	0	0
<b>Media</b>	3	2	3	2	2	3	1	1
<b>1st Qu.</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Min.</b>	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.3.5 Estaciones de la ciudad de Temuco

En el caso de las mediciones disponibles en la región de La Araucanía, correspondientes a la ciudad de Temuco, estas se presentan en la Figura 2-52, con sus respectivos estadígrafos disponibles en la Tabla 2-105. En el caso de estas mediciones la mayoría corresponde a 0 [ng/m<sup>3</sup>N], donde tanto para Las Encinas como para Padre las Casas el 75% de los valores son iguales a 0 [ng/m<sup>3</sup>N], de modo que los valores mostrados fuera de rango equivalen a los únicos con valor no nulo. Cabe destacar que solo se cuenta con datos para 2019, lo que no permite profundizar en cuanto a la evolución de estas concentraciones.



**Figura 2-52 Concentraciones de As en MP2,5 [ng/m<sup>3</sup>N] en estaciones de la ciudad de Temuco**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-105 Estadígrafos concentraciones de As en MP2,5 [ng/m<sup>3</sup>N] en la ciudad de Temuco**

Estación	Las Encinas	Padre Las Casas
Año	2019	2019
N	64	61
Max.	7	31
3rd Qu.	0	0
Mediana	0	0
Media	0	1
1st Qu.	0	0
Min.	0	0

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.4 Comparación entre estaciones

En la siguiente Tabla 2-106 se muestra una comparación de las estaciones. Para cada grupo de estaciones cercanas a una fundición, se selecciona aquella en las que se observaron las mayores concentraciones, y aquella con representatividad poblacional en la que se haya observado la mayor concentración de As.

Para la mayoría de las fundiciones, la estación más cercana es aquella que presenta las más altas concentraciones de As, siendo la excepción las zonas de Chagres y Ventanas. Sin considerar las mediciones de la estación Doña Inés debido a que se encuentran en un orden de magnitud mayor, la estación Sur cercana a Altonorte tiene las mayores concentraciones medias, con 103 [ng/m<sup>3</sup>N] en 2020, año en el que también destacan Sewell cercana a Caletones con 67 [ng/m<sup>3</sup>N] y Aukahuasi, aldeaña a Chuquicamata, con 72 [ng/m<sup>3</sup>N].

En cuanto a las concentraciones máximas, en 2019 la mayor fue la estación Sur cercana a Altonorte, con 522 [ng/m<sup>3</sup>N], que en 2020 registró 455 [ng/m<sup>3</sup>N]. Pero en 2020 el mayor valor se observó en CD 23 de Marzo, cercana a la fundición Chuquicamata con 664 [ng/m<sup>3</sup>N]. Destaca también el mismo año la estación Paipote con 559 [ng/m<sup>3</sup>N] y Aukahuasi con 483 [ng/m<sup>3</sup>N].

De las estaciones con representatividad poblacional, La Negra cercana a Altonorte tiene las peores concentraciones medidas; destacan también en este aspecto las estaciones Los Maitenes y Quintero, cercanas a Ventanas y la estación Paipote, cercana a Hernán Videla Lira.

Cabe destacar que en la Sección 2.4.1 se presenta un resumen de las metodologías de análisis utilizadas para determinar las concentraciones de material particulado y arsénico en los filtros de cada una de las estaciones. De aquí se concluye que son comparables los métodos utilizados en todas las estaciones para el análisis de arsénico en MP10, exceptuando la estación La Negra – Inacal. Por otra parte, cabe destacar que no se tiene conocimiento de la metodología utilizada para las mediciones de MP10 en las estaciones La Negra – Inacal, y las estaciones cercanas a Minera Spence, Potrerillos y Chagres.

**Tabla 2-106 Comparación de estaciones con mayores concentraciones de As en MP10 [ng/m<sup>3</sup>N]**

Fuente	Estación con mayores valores de concentración				Media concentración		Máxima concentración	
	Nombre	Distancia [km]	Dirección desde fundición	Representatividad Poblacional	2019	2020	2019	2020
<b>Tocopilla</b>	Super Site	2,9	NE	MP10, MP2,5, SO <sub>2</sub>	2	2	8	6
<b>Chuquicamata</b>	Aukahuasi	5,4	O	N/A	45	72	233	483
	CD 23 de Marzo	16,9	S	MP10, MP2,5	16	29	46	664
<b>Spence</b>	Spence	6,7	NE	S/I	9	10	17	15
<b>Andina y Mejillones</b>	Subestación Eléctrica	1	SO	N/A	3	3	17	11
<b>Altonorte</b>	Sur	1,4	SE	N/A	103	103	522	455
	La Negra-Inacal	4,5	N	MP10, SO <sub>2</sub>	68	42	421	199
<b>Potrerillos*</b>	Doña Inés	0,4	SO	N/A	827	1.056	3.080	10.070
<b>Hernán Videla Lira</b>	Paipote	1,5	NO	MP10, SO <sub>2</sub>	23	54	264	559
<b>Ventanas</b>	Quintero	5,0	SE	MP10, MP2,5, SO <sub>2</sub>	49	50	376	321
	Los Maitenes	2,7	E	MP10, MP2,5, SO <sub>2</sub>	32	30	314	182
<b>ENAP Aconcagua</b>	Las Gaviotas	1,6	E	SO <sub>2</sub>	6	4	22	9
<b>Chagres</b>	Lo Campo	5,4	E	MP10, SO <sub>2</sub>	35	16	97	31
<b>Caletones</b>	Sewell	6,8	NE	N/A	51	67	185	171
	Coya Población	13,1	SO	M10, SO <sub>2</sub>	10	10	28	46

N/A: La estación no tiene representatividad poblacional para ningún contaminante.

S/I: No se dispone de información de representatividad para esa estación

\* Notar que la fundición Potrerillos no tiene ninguna estación cercana con representatividad poblacional.

Fuente: Elaboración propia

## 2.4 Diagnóstico del estado del arte de monitoreo de As en aire

A continuación, se presenta un diagnóstico del estado del arte del monitoreo de la concentración de arsénico en el aire, tanto a nivel nacional como internacional.

### 2.4.1 Estado del arte a nivel nacional

En el D.S. 61/2008 del Ministerio de Salud (Ministerio de Salud, 2008) sobre el Reglamento de estaciones de medición de contaminantes atmosféricos se definen las condiciones de instalación y funcionamiento de las estaciones de medición de contaminantes atmosféricos para que sus mediciones sean consideradas válidas por las autoridades sanitarias respectivas. Específicamente, en el Artículo 5 de dicho decreto se afirma que:

“Las estaciones de monitoreo sólo deberán emplear instrumentos de medición de concentraciones ambientales de contaminantes atmosféricos incluidos en la lista de Métodos Denominados de Referencia y Equivalentes publicada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica o que cuenten con certificación de alguna de las agencias de los países miembros de la Comunidad Europea que implementan las directrices del Comité Europeo para Estandarizaciones o que tengan certificación de que dan cumplimiento a los estándares de calidad exigidos en el país de origen entregada por algún ente acreditado por el gobierno de ese país. Ello, sin perjuicio de lo dispuesto en las normas primarias de calidad del aire respectivas.” (Ministerio de Salud, 2008).

Dado que el arsénico se mide a partir de muestras de material particulado, es de interés que las estaciones monitoras de este último cumplan con los estándares de calidad exigidos. A continuación, en la Tabla 2-107, se presentan los equipos para toma de muestras de material particulado MP10 y MP2,5 en las estaciones monitoras de interés revisadas en la Sección 2.3. Cabe destacar que se presentan únicamente los equipos de monitoreo discretos, ya la cantidad de arsénico se mide a partir de las muestras recolectadas en estos. Además, las estaciones de monitoreo cercanas a la fundición Ventanas no presentan información sobre el tipo de equipos que utilizan.

Es posible observar que, para los equipos que presentan suficiente información de marca y modelo, cumplen con los estándares de calidad exigidos al encontrarse en la lista de Métodos Denominados de Referencia y Equivalentes publicada por la US-EPA.

**Tabla 2-107 Equipos de monitoreo utilizados en todas las estaciones de interés para la medición discreta de MP**

Fundición	Estación	Contaminante	Equipo	Marca	Modelo	Cumple estándar <sup>1</sup>
<b>Altonorte</b>	La Negra-Altonorte	MP10	Alto Volumen	Tisch	S/I	S/I
		MP2,5	Bajo Volumen	BGI	PQ200	Sí
	La Negra-Inacal Sur	MP10	Alto Volumen	Thermo	Tisch Environmental	S/I
		MP10	Alto Volumen	Thermo	Hi-vol	S/I
	Coviefi	MP10	Alto Volumen	Tisch	S/I	S/I
		MP2,5	Bajo Volumen	BGI	PQ200	Sí
<b>Caletones</b>	Cauquenes, Cipreses, Coya Población, Coya Club, Sewell	MP10	Alto Volumen	Andersen	G25A/G10557	S/I
<b>Chagres</b>	Catemu, Lo Campo	MP10	Alto Volumen	Tisch	Hi-vol	S/I
<b>Chuquicamata<sup>2</sup></b>	Aukahuasi, H. del Cobre, Nueva Chiu Chiu, Centro, C.P.V.K., 23 de Marzo	MP10	Alto Volumen	Thermo Scientific	S/I	S/I
		MP10	Bajo Volumen <sup>3</sup>	Thermo Fisher Scientific	Partisol 2025i D	Sí
		MP2,5	Bajo Volumen	BGI	PQ200	Sí
		MP2,5	Bajo Volumen	Thermo Fisher Scientific	Partisol 2025i D	Sí
		MP2,5	Bajo Volumen	Thermo Scientific	Partisol 2000 i	Sí
<b>Ventanas</b>	Puchuncaví, La Greda, Los Maitenes, Sur, Valle Alegre, Quintero, Ventanas	MP10	Alto Volumen	S/I	S/I	S/I
<b>Hernán Videla Lira</b>	Copiapó, San Fernando, Paipote, Tierra Amarilla	MP10	Alto Volumen	Thermo Scientific	TE-6070	Sí
<b>Potrerrillos<sup>4</sup></b>	CAP, Intelec	MP10	Alto Volumen	Thermo Andersen	GBM23601	S/I
	Cine Inca	MP10	Alto Volumen	Thermo Andersen	GBM23601	S/I
		MP2,5	Bajo Volumen	BGI	PQ200	Sí
	Doña Inés	MP10	Alto Volumen	Graseby Andersen/general Metal Works	SAUV 10H	Sí
<b>Sierra Gorda</b>	Sierra Gorda	MP10	Alto Volumen	Tisch Environmental	TE-6070 ns 8011033	Sí
	Spence	MP10	Alto Volumen	Tisch Environmental	TE-6070 ns P6817x	Sí
<b>Termoeléctrica Mejillones</b>	Ferrocarril	MP10	Alto Volumen	Tisch	TE-6070V GES9V 2980	Sí
		MP2,5	Bajo Volumen	Thermo	Partisol 20001201731203	S/I
<b>Termoeléctrica Tocopilla</b>	Super Site	MP10	Alto Volumen	Tisch	TE-6070	Sí
		MP2,5	Bajo Volumen	Partisol	2000i	Sí
<b>Termoeléctrica Andina</b>	Subestación Eléctrica J.J. Latorre	MP10	Alto Volumen	Tisch	TE6070V P10058X	Sí
		MP10	Alto Volumen	Tisch	TE6070V P10058X	Sí
		MP2,5	Bajo Volumen	Tisch	Partisol N/S 0509-175	Sí

1. Se clasifican como S/I los equipos de los que no se dispone de suficiente información como para saber si cumplen con el estándar de la US-EPA o si es que tienen una certificación.
2. En los informes de la fundición Chuquicamata se presentan al inicio todos los tipos de equipos de monitoreo utilizados en las estaciones asociadas, sin embargo, no es posible saber qué tipo de equipo está instalado en cuál estación.
3. Único equipo de monitoreo de MP10 que es de Bajo Volumen
4. En octubre de 2015, la estación Intelec cambia de un equipo muestreador de Bajo Volumen, Marca BGI, modelo PQ200 a un equipo muestreador de Alto Volumen, Marca Thermo Andersen, modelo GBM23601.

Fuente: Elaboración propia en base a informes de reporte de las fundiciones

Por otra parte, las normativas relacionadas al arsénico son el D.S. 165/1998 del Minsegres (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 1998) sobre la Norma de Emisión para la regulación del contaminante arsénico emitido al aire, posteriormente modificado por el D.S. 28/2013 del MMA (2013a), que establece Norma de Emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico. En ninguna de las dos se mencionan aspectos asociados al monitoreo de las concentraciones atmosféricas, sino que se centran en detalles de las mediciones de arsénico en emisiones. Sólo en el D.S. 477/1994 del Minsal, donde se establece la Norma Primaria de Calidad del Aire para arsénico, derogada el mismo año, se establece como método de análisis la “Espectrofotometría de Absorción Atómica, o cualquier equivalente que la autoridad sanitaria apruebe”.

En la siguiente Tabla 2-108 se presentan las metodologías de análisis utilizadas para determinar la concentración de material particulado (MP10 y MP2,5) y el arsénico contenido en las muestras, en las diferentes estaciones de interés, de acuerdo con la información que fue posible recopilar de los informes de reportes de las fundiciones.

Se observa que las metodologías utilizadas para el análisis del MP10 y MP2,5, según los códigos indicados en los análisis hechos por los laboratorios, son:

- I-ENV-LAB-404 Code F.R. Part 50, App.J Ed.1999, EPA5 1990, Minsal 2009 (SGS)
- Code of Federal Regulation. Part 50, App. J. Ed.07.01.99 (SGS)
- ILAB-F/01 rev.08. Basado en EPA 40 CFR, Parte 50. Apéndice J (Algoritmos y Mediciones Ambientales)
- IGC-SGR-006 (SERPRAM S.A.)

Todas, menos la última, hacen referencia al Apéndice J de la parte 50 del Código de Regulación Federal de Estados Unidos, donde se define el método de referencia para la determinación de material particulado como MP10 en la atmósfera. La metodología IGC-SGR-006 se señala para el análisis de las muestras provenientes de la estación La Negra – Inacal, la cual debe corresponder a un código interno del laboratorio, de modo que no es posible saber si el método corresponde al mismo de las demás estaciones o no. Para las estaciones cercanas a Minera Spence, Potrerillos y Chagres, no se tiene conocimiento de la metodología de análisis utilizada para sus mediciones de MP10.

Por una parte, se observa que las metodologías utilizadas para el análisis de metales en MP10 son:

- EPA 3050 Std Methods Ed.20 1998 3111 c-d-3500 (SGS)
- Espectroscopía de Absorción Atómica (SGS)
- I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114B, 3111D, 3112B Ed.23, 2017 (SGS)
- I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114BC, 3111D Ed.22, 2012 (SGS)
- IE-E.54-CHA, versión 10, basado en TMECC 04.14, 2001 y TMECC 04.12-B, 2002. Método ICP/OES (Espectroscopia de Absorción Atómica) (DICTUC)

- ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B 1996, SM 3114-B (Algoritmos y Mediciones Ambientales)

Por otra parte, las metodologías utilizadas para el análisis de metales en MP2,5 son:

- I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114B, 3111D Ed.23, 2017 (SGS)
- ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B 1996, SM 3114-B (Algoritmos y Mediciones Ambientales)

Se observa que la mayoría de los métodos están basados en el método estándar 3050B de la US-EPA, donde específicamente el código 3114B hace referencia a la medición de arsénico y selenio utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica con generación de hidruro. Por otra parte, el método utilizado por DICTUC en las muestras provenientes de estaciones cercanas a Minera Spence y la fundición Chagres, se basa en los métodos de prueba para el examen de compost y compostaje (TMECC por sus siglas en inglés) del US Composting Council. Se indica que el método es el ICP/OES, correspondiente a Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo. En las estaciones cercanas a la fundición Potrerillos sólo se indica que utilizan Espectroscopía de Absorción Atómica. No se tiene conocimiento sobre la metodología utilizada en La Negra – Inacal para el análisis de arsénico en MP10.

En síntesis, se tiene certeza de que son comparables los métodos utilizados en todas las estaciones para el análisis de arsénico en MP10, exceptuando la estación La Negra – Inacal.

**Tabla 2-108 Metodología de análisis, laboratorio y frecuencia de muestreo de MP10, MP2,5 y As**

Fuente principal	Estación	Contaminante	Frecuencia muestreo	Período de muestreo	Detalle metodología análisis	Laboratorio	Límite de detección	
Altonorte	La Negra-Altonorte, Sur	MP10 Discreto	3 días	24 horas	I-ENV-LAB-404 Code F.R. Part 50, App.J Ed.1999, EPA5 1990, Minsal 2009	SGS	NA	
		As	Se mide As en todos los filtros de MP10	NA	I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114BC, 3111D Ed.22, 2012		1 µg <sup>6</sup>	
	La Negra-Inacal	MP10 Discreto	3 días	24 horas	IGC-SGR-006	SERPRAM S.A.	NA	
		As	Se mide As en todos los filtros de MP10	NA	S/I		S/I	S/I (Valores bajo límite se informan como ND)
	Coviefi	Coviefi	MP10 Discreto	3 días	24 horas	I-ENV-LAB-404 Code F.R. Part 50, App.J Ed.1999, EPA5 1990, Minsal 2009	SGS	NA
			As	Se mide As en todos los filtros de MP10	NA	I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114B, 3111D, 3112B Ed.23, 2017		1 µg <sup>6</sup>
Caletones	Coya Población	MP10 Discreto	3 días	24 horas	I-ENV-LAB-404 Code F.R. Part 50, App.J Ed.1999, EPA5 1990, Minsal 2009	SGS	NA	
		As	Se mide As en 1 filtro de MP10 por semana, en la misma fecha que las demás estaciones cercanas a la fundición <sup>1</sup>	NA	I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114BC, 3111D Ed.22, 2012		S/I (Valores bajo límite se informan como ND)	
	Coya Club, Sewell	MP10 Discreto	3 días	24 horas	I-ENV-LAB-404 Code F.R. Part 50, App.J Ed.1999, EPA5 1990, Minsal 2009	SGS	NA	
		As	Se mide As en 1 filtro de MP10 por semana, en la misma fecha que las demás	NA	I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114BC, 3111D Ed.22, 2012		S/I (Valores bajo límite se informan como ND)	

Fuente principal	Estación	Contaminante	Frecuencia muestreo	Período de muestreo	Detalle metodología análisis	Laboratorio	Límite de detección
			estaciones cercanas a la fundición <sup>2</sup>				
<b>Chagres</b>	Catemu, Lo Campo	MP10 Discreto <sup>5</sup>	3 días	24 horas	S/I	S/I	NA
		As	Se mide As en compósitos de un mes <sup>3</sup>	NA	IE-E.54-CHA, versión 10, basado en TMECC 04.14, 2001 y TMECC2001 y TMECC04.12-B, 2002. Método por ICP/OES	DICTUC	0,0015 µg/m <sup>3</sup>
<b>Chuquicamata</b>	Aukahuasi, H. del Cobre, Chiu-Chiu, Nueva Chiu Chiu, Centro, C.P.V.K., 23 de Marzo	MP10 Discreto	3 días	24 horas	I-ENV-LAB-404 Code F.R. Part 50, App.J Ed.1999, EPA5 1990, Minsal 2009.	SGS	NA
		As en MP10	Se mide As en todos los filtros de MP10	NA	I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114BC, 3111D Ed.22, 2012		0,00004 µg/m <sup>3</sup>
		MP2,5 Discreto	3 días	24 horas	I-ENV-LAB-404 Code F.R. Part 50, App.J Ed.1999, EPA5 1990, Minsal 2009.		NA
		As en MP2,5	Se mide As en todos los filtros de MP2,5	NA	I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114B, 3111D Ed.23, 2017		0,002 µg/m <sup>3</sup>
<b>Ventanas</b>	Puchuncaví, La Greda, Los Maitenes, Sur, Valle Alegre, Quintero, Ventanas	MP10 Discreto	3 días	24 horas	Code of Federal Regulation. Part 50, App. J. Ed.07.01.99	SGS	NA
		As	Se mide As en todos los filtros de MP10	NA	EPA 3050 Std Methods Ed.20 1998 3111 c-d-3500		0,001 µg/m <sup>3</sup>
<b>Hernán Videla Lira</b>	Copiapó, San Fernando, Paipote, Tierra Amarilla	MP10 Discreto	3 días	24 horas	I-ENV-LAB-404 Code F.R. Part 50, App.J Ed.1999, EPA5 1990, Minsal 2009	SGS/Algoritmos y Mediciones Ambientales <sup>4</sup>	NA
		As	Se mide As en todos los filtros de MP10	NA	I-ENV-LAB-400 basado en EPA 3050, SM 3111B, 3114BC, 3111D Ed.22, 2012		0,007 µg/m <sup>3</sup>
<b>Potrerosillos</b>	CAP,	MP10	3 días	24 horas	S/I	SGS	NA

Fuente principal	Estación	Contaminante	Frecuencia muestreo	Período de muestreo	Detalle metodología análisis	Laboratorio	Límite de detección
	Intelec, Cine Inca, Doña Inés	Discreto					
		As	Se mide As en los 2 filtros con mayor concentración de MP10 al mes		Espectroscopia de Absorción Atómica		S/I
Minera Spence	Sierra Gorda, Spence	MP10 Discreto <sup>5</sup>	3 días	24 horas	S/I	DICTUC	NA
		As	Se mide As en 2 filtros al mes	NA	IE-E.54-CHA, versión 10, basado en TMECC 04.14, 2001 y TMECC 04.12-B, 2002. Método ICP/OES (Espectroscopía de Absorción Atómica)		S/I
Termoeléctrica Mejillones	Ferrocarril	MP10 Discreto	3 días	24 horas	ILAB-F/01 rev.08. Basado en EPA 40 CFR, Parte 50. Apéndice J	Algoritmos y Mediciones Ambientales	NA
		As en MP10	Se mide As en los 5 filtros con mayor concentración de MP10 al mes	NA	ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B 1996, SM 3114-B		0,007 µg/m <sup>3</sup>
		MP2,5 Discreto	3 días	24 horas	ILAB-F/01 rev.08. Basado en EPA 40 CFR, Parte 50. Apéndice J		NA
		As en MP2,5	Se mide As en los 5 filtros con mayor concentración de MP2,5 al mes	NA	ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B 1996, SM 3114-B		0,007 µg/m <sup>3</sup>
Termoeléctrica Tocopilla	Super Site	MP10 Discreto	3 días	24 horas	ILAB-F/01 rev.08. Basado en EPA 40 CFR, Parte 50. Apéndice J	Algoritmos y Mediciones Ambientales	NA
		As	Se mide As en los 3 filtros con mayor concentración de MP10 al mes	NA	ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B 1996, SM 3114-B		0,007 µg/m <sup>3</sup>
Termoeléctrica Andina	J.J. Latorre	MP10 Discreto	3 días	24 horas	ILAB-F/01 rev.08. Basado en EPA 40 CFR, Parte 50. Apéndice J	Algoritmos y Mediciones Ambientales	NA
		As en MP10	Se mide As en el filtro con mayor concentración de	NA	ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B 1996, SM 3114-B		0,099 µg/m <sup>3</sup>

Fuente principal	Estación	Contaminante	Frecuencia muestreo	Período de muestreo	Detalle metodología análisis	Laboratorio	Límite de detección
			MP10 a la semana				
		MP2,5 Discreto	3 días	24 horas	ILAB-F/01 rev.08. Basado en EPA 40 CFR, Parte 50. Apéndice J		NA
		As en MP2,5	Se mide As en el filtro con mayor concentración de MP2,5 a la semana	NA	ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B 1996, SM 3114-B		0,099 µg/m <sup>3</sup>
	Subestación Eléctrica	MP10 Discreto	3 días	24 horas	ILAB-F/01 rev.08. Basado en EPA 40 CFR, Parte 50. Apéndice J	Algoritmos y Mediciones Ambientales	NA
		As	Se mide As en el filtro con mayor concentración de MP10 a la semana	NA	ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B 1996, SM 3114-B		0,099 µg/m <sup>3</sup>

1. Para las mediciones de As de Coya Población, hasta julio de 2016 se presentan valores mensuales, sin indicar metodología.

2. Para las mediciones de As de Coya Club y Sewell, hasta julio de 2016 se presentan valores mensuales, sin indicar metodología. Desde agosto de 2016 a marzo de 2019 se hace caracterización química a los 4 filtros con mayores concentraciones de MP10.

3. Para las mediciones de As en Catemu y Lo Campo, hasta junio de 2018 se realizaban mediciones en compósitos de 3 meses, luego la medición comenzó a ser mensual (método anterior: TMECC04.14 y 04.12B Of.2001)

4. Los análisis de filtros de MP10 y mediciones de As en las estaciones cercanas a HVL los comenzó a hacer Algoritmos y Mediciones Ambientales SpA a partir de abril de 2019. Metodología para MP10: ILAB-F/01 rev.08. Basado en EPA 40 CFR, Parte 50. Apéndice J Ed. 07.01.99; Metodología para As: Metodología ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B, SM 3114-B, ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B, SM 3111-D, ILAB-27 rev.00. Basado en EPA 3050-B, SM 3112-B

5. Las mediciones de MP10 de Minera Spence y fundición Chagres son las únicas que dicen tener cadena de custodia

6. Valor se presenta en masa y no normalizado por volumen.

Fuente: Elaboración propia en base a informes de reporte de las fundiciones

#### **2.4.2 Estado del arte a nivel internacional**

Se han utilizado una variedad de técnicas analíticas y de muestreo para medir las concentraciones de metales traza en el aire, incluidos los impactadores, los precipitadores electrostáticos y los filtros (Lewis, Reid, Pollock, & Campleman, 2012). El estudio de Helsén (2005) hace una revisión de tecnologías de muestreo y dispositivos de control de la contaminación del aire para arsénico gaseoso y particulado, los que se muestran en la Tabla 2-109 en la cual se pueden observar también las eficiencias de cada técnica. El estudio de Helsén (2005) presenta conclusiones interesantes, por ejemplo, que la filtración a través de un filtro de fibra de cuarzo, fibra de vidrio o teflón recoge el arsénico solo parcialmente, mientras que para los filtros Nuclepore y Millipore, se reportaron altas eficiencias de filtrado. Además, los filtros de membrana de éster de celulosa y la combinación de filtros e impactadores también informaron buenas eficiencias de recolección. Mientras menor sea la concentración de arsénico en el aire a medir, menor será la eficiencia de filtrado (2005).

**Tabla 2-109 Descripción general de las técnicas de muestreo utilizadas para medir las concentraciones de arsénico en el aire ambiental**

Referencia	Compuesto de metal	Sistema de muestreo	Eficiencia
<b>Roberts et al., 1977</b>	As Concentración > $1 \mu\text{g m}^{-3}$	Filtro de fibra de vidrio	17-65%
		Filtro de fibra de vidrio	46,7-97%
		Nucleoporo	99,2-99,8%
		AA Milliporo	98,2-99,9%
	As Concentración < $1 \mu\text{g m}^{-3}$	-	Más bajo
<b>Lao et al., 1974</b>	$As_2O_3$	Filtro de fibra de vidrio	Baja (10-24%)
		Filtro + impactador de Greenburg-Smith	Más alto
<b>Creelius y Sanders, 1980</b>	As + $As_2O_3$ vapor + $AsH_3$	Impactador seco + filtro de teflón	Alto para parte As
		+2 impactadores ( $NaOH$ , $H_2O$ , $HNO_3$ o $NH_4OH$ )	>97% para $As_2O_3$ <1% para $AsH_3$
		+2 trampas de cuentas de cuarzo plateadas	Bajo para $As_2O_3$ (44+29) % $AsH_3$
		+ Trampa de carbón de 4 etapas	Backup para $AsH_3$ Efectivo para $As_2O_3$
<b>Maggs, 2000</b>	As + As inorg + vapor de $AsO_3$	Filtro de membrana de celulosa de éster+ almohadilla de respaldo impregnada de $Na_2CO_3$	No disponible
<b>MDHS, 1995</b>	As + As inorg + vapor de $As_2O_3$	Filtro de membrana de celulosa de éster+ almohadilla de respaldo impregnada de $Na_2CO_3$	No disponible
<b>NIOSH, 1984</b>	As + $As_2O_3$	Filtro de membrana impregnado de $Na_2CO_3$ + almohadilla de respaldo	93%
<b>NIOSH, 1985</b>	$AsH_3$	Tubo absorbente sólido con carbón activado de cáscara de coco	89%

Fuente: Elaboración propia (Helsen, 2005)

En la Tabla 2-110 se muestran algunos ejemplos de procedimientos de recolección y análisis de muestras para el arsénico en el aire ambiente, se describe el método de análisis, compuestos analizados y medio de muestreo, sin embargo, la mayoría de estos métodos publicados no especifican procedimientos para determinar simultáneamente múltiples especies individuales de arsénico en el aire (Lewis et al., 2012).

Generalmente las muestras se recolectan utilizando un aparato que tiene una entrada, un medio de recolección de muestras y bombas de muestreo de aire destinadas a recolectar aire durante un período de tiempo específico. El tamaño de las partículas que se recolectarán en el medio de muestreo se define generalmente según el tamaño de la entrada de muestreo y la velocidad de flujo. Durante la recolección de la muestra, el aire se extrae a través del dispositivo de muestreo

y se recolecta en medios filtrantes. Algunos de los filtros que se utilizan son fibra de vidrio, fibra de cuarzo, filtros de membrana y filtros de teflón. El medio de filtrado utilizado depende de los protocolos de muestreo y análisis que se realizarán (Lewis et al., 2012).

**Tabla 2-110 Ejemplos de procedimientos de recolección y análisis de muestras para el arsénico en el aire ambiente**

Referencia	Método de análisis	Título del método	Compuestos analizados	Medio de muestreo	Análisis
<b>NIOSH, 1994a</b>	Método 7900 de NIOSH	Arsénico y compuestos como As	Todos los compuestos de arsénico (como As) excepto $AsH_3$ y $As_2O_3$	Filtro de membrana de éster de celulosa de $0,8 \mu m$	Flame AA, generación de arsina
<b>NIOSH, 1994b</b>	Método NIOSH 5022	Arsénico, orgánico	MMA, DMA, ácido arsénico <sup>15</sup>	Filtro de PTFE <sup>16</sup>	Cromatografía iónica / hidruro AA
<b>NIOSH, 1994c</b>	Método NIOSH 6001	Arsina	$AsH_3$	Tubo absorbente	GFAA
<b>EPA, 1988</b>	EPA de EE. UU.	Determinación de arsénico en material particulado suspendido recolectado del aire ambiente	As total	Filtros de fibra de vidrio o cuarzo	GFAA
<b>EPA, 1999</b>	EPA de EE. UU.	Compendio de métodos para la determinación de compuestos inorgánicos en aire ambiente	As total	Múltiples métodos analíticos	GFAA, ICP, ICP / MS, NAA, etc. <sup>17</sup>

Fuente: Elaboración propia (Lewis et al., 2012)

En la Tabla 2-111 se presentan diferentes métodos de recolección y análisis para un subconjunto de las especies de arsénico individuales (es decir, As (III), As (V), MMA, DMA y otras). Se utilizaron variadas técnicas para recolectar muestras de aire en los estudios revisados por Lewis et al (2012), pero en general fueron consistentes con los procedimientos estandarizados definidos por la EPA de los Estados Unidos y otros (Lewis et al., 2012).

Los estudios revisados por Lewis et al. (2012) presentan gran variabilidad en cuanto a diferencias en fechas y duración del muestreo, entorno ambiental, métodos de recolección y análisis. Solo 2 de los 12 estudios revisados se realizaron en los Estados Unidos (Rabano et al., 1989; Solomon et al., 1993). El resto se llevó a cabo en Japón (Mukai y Ambe, 1987a Mukai y Ambe, 1987b) Hungría,

<sup>15</sup> MMA: ácido monometilarsónico y DMA: ácido dimetilarsínico

<sup>16</sup> PTFE: politetrafluoreno

<sup>17</sup> ICP: plasma acoplado inductivamente, ICP/MS: espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente

(Šlejkovec et al., 2000), Portugal (Farinha et al., 2004), España (Oliveira et al., 2005; Sanchez de la campa et al., 2008; Sanchez-Rodas et al., 2007) y Grecia (Tsopelas et al., 2008). Las fechas de muestreo abarcan tres décadas (1975-2008) y durante estas evolucionaron las técnicas de muestreo y análisis. La mayoría de los estudios se realizaron midiendo el aire en áreas urbanas y/o industriales y en general, indicaron que los métodos analíticos realizados estaban bajo control.

Las especies de arsénico detectadas en MP eran típicamente inorgánicas (es decir, más del 90%), solo en dos estudios, el arsénico inorgánico constituyó menos de la mitad del As total.

Varios de los estudios revisados evaluaron la precisión en términos de eficiencia de extracción, comparando las concentraciones sumadas de arsénico especiado (As (III) + As (V)) con los resultados de arsénico total y calculando el porcentaje de recuperación.

Casi la mitad de los estudios utilizaron una metodología de HPLC junto con la generación de hidruros y la espectrometría de fluorescencia atómica (HPLC-HG-AFS). Estos resultan ser también de los estudios más recientes. Esta técnica pudo diferenciar y separar cuatro especies de arsénico: As (III), As (V), MMA y DMA.

De acuerdo con lo observado en la literatura, habría cierta evidencia de que la metodología HG, junto con varios detectores, es el método de elección, particularmente porque ha demostrado ser muy sensible para la separación de As (III) y As (V).

**Tabla 2-111 Estudios de arsénico en aire ambiente y comparación de metodologías de estudio**

Referencia	Tamaño de partícula	Compuestos de arsénico analizados <sup>(1)</sup>	Método de recolección	Método analítico <sup>(1)</sup>	Límite de detección
<b>Johnson y Braman, 1975</b>	<3 µm, > 3 µm	As inorgánico; metilarsina, dimetilarsina, trimetilarsina	Filtro de bajo volumen / fibra de vidrio para partículas > 0,3 µm Tubo de pyrex de 14 mm / malla Perlas de pyrex plateadas	descarga de d.c.: espectroscopia de emisión	0,1-0,2 ng/m <sup>3</sup>
<b>Mukai y Ambe, 1987b</b>	TSP	MMA, DMA, TMA	Alto volumen; filtro de fibra de cuarzo	HG-GC-AAS	<3-10 ng/m <sup>3</sup> (para las 3 especies As)
<b>Mukai y Ambe, 1987a</b>	TSP	MMA, DMA	Alto volumen; filtro de fibra de cuarzo	HG-GC-AAS	~0,1 ng/m <sup>3</sup>
<b>Rabano y col., 1989</b>	<2,5 µm, > 2,5 µm, TSP	As total, As (III), As (V)	TSP: microfibra de vidrio / de alto volumen <MP <sub>2,5</sub> y > MP <sub>2,5</sub> : DCVI/PTFE de alto volumen	As total: método no especificado As Especiado: HG-AAS	1 ng/m <sup>3</sup>

Referencia	Tamaño de partícula	Compuestos de arsénico analizados <sup>(1)</sup>	Método de recolección	Método analítico <sup>(1)</sup>	Límite de detección
Solomon y col., 1993 ; Salomón, 1984	TSP	As (III), As (V)	TSP: filtro de fibra de cuarzo / alto volumen	<i>Assumed flame-AAS</i>	0,25 ng/m <sup>3</sup>
Talebi, 1999	TSP	As total, As (III)	Filtro de fibra de cuarzo / alto volumen	<i>Flame-AAS</i>	No reportado
Šlejkovec y col., 2000	<2 µm, 2–10 µm	As total, As (III), As (V), MMA, DMA en partículas gruesas (2–10 µm) y finas (<2 µm)	Unidades de filtrado apiladas	As-INAAAs totales (III), As (V), MMA, DMA: HPLC-HG-AFS	<0,01 ng/m <sup>3</sup> (As (III), MMA) <0,05 ng/m <sup>3</sup> (DMA); <0,08 ng/m <sup>3</sup> (As (V))
Farinha y col., 2004	<2,5 µm, 2,5–10 µm	As (III) / As (V) en PM 2.5–10 y <PM 2.5	No especificado; descrito en Reis et al., 1999	As especificado: HPLC-UV-HG-AFS As total: INAA	Supuesto <0.05–1.1 ng/m <sup>3</sup>
Oliveira et al., 2005	TSP	As total, As (III), As (V), DMA, MMA	Filtros de fibra de cuarzo / alto volumen	As especiada: HPLC-HG-AFS As total: HG-AFS	Supuesto <0,2 ng/m <sup>3</sup>
Sánchez-Rodas et al., 2007	<10 µm	As (III), As (V) en MP <sub>10</sub>	Filtro de fibra de cuarzo / alto volumen	As especiada: HPLC-HG-AFS As total: HG-AFS	0,1 ng/m <sup>3</sup> para As (III) 0,4 ng/m <sup>3</sup> para As (V)
Sánchez de la Campa et al., 2008	<2,5 µm	As (III) y As (V) en MP <sub>2,5</sub>	Filtros de fibra de cuarzo / alto volumen	As especiada: HPLC-HG-AFS As total: HG-AFS	0,1 ng/m <sup>3</sup> para As (III) 0,4 ng/m <sup>3</sup> para As (V)
Tsopelas et al., 2008	<2,5 µm, 2,5–10 µm	As (III), As (V), MMA, DMA en MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub>	TSP de alto volumen/fibra de vidrio y Filtros PFTE de alto y bajo volumen / apilados: MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub>	As total / As especiada: HG-ICP-OES Intercambio de iones (separación de As (V), MMA y DMA)	As (III): 0,1 ng/m <sup>3</sup> As(V): 0,7 ng/m <sup>3</sup> MMA: 0,3 ng/m <sup>3</sup> DMA: 0,4 ng/m <sup>3</sup>

- (1) MMA: Metilarsina (monomethylarsonic acid); DMA: Dimetilarsina (dimethylarsinic acid);TMA: Trimetilarsina (trimethyl arsenate)
- (2) HG: Generación de hidruros (hydride generation); GC: Cromatografía de gases (gas chromatography); AAS: Espectrometría de absorción atómica (atomic absorption spectrometry); HPLC: Cromatografía líquida de alta resolución (high-performance liquid chromatography); UV: Reactor ultra violeta (ultraviolet reactor); AFS: Espectroscopia de fluorescencia atómica (atomic fluorescence spectroscopy); ICP-OES: Espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (inductively coupled plasma optical emission spectroscopy)

Fuente: (Lewis et al., 2012)

### 3. Emisión de arsénico

En el presente capítulo se presenta el proceso de recolección de información, sus resultados y análisis. Los datos estudiados corresponden a los reportes técnicos elaborados por las fundiciones de cobre, según el protocolo de la Superintendencia del Medio Ambiente para balances de masa de azufre y arsénico.

#### 3.1 Compilación de información disponible de emisiones

La norma de emisiones para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico (DS 28/2013), en sus artículos 11 y 12 disponen las formas en que se fiscaliza y verifica el cumplimiento (MMA, 2013a). En estos artículos se establece que las funciones de control y fiscalización corresponden a la SMA. Adicionalmente establece que la SMA definirá los protocolos para la implementación de los balances de masas de arsénico y azufre, los cuales son utilizados para la determinación de las emisiones y verificar el cumplimiento de los límites de emisión establecidos en el artículo 3° de la norma. Sin perjuicio de lo anterior, explicita que el balance de masa de arsénico debe considerar lo indicado en los artículos 15 al 29 de DS 165/1998<sup>18</sup>.

Respecto a los plazos del reporte, artículo 16 establece la obligación de remitir informes mensuales que den cuenta sobre el cumplimiento de la norma, junto con un informe anual consolidado. Entretanto, los informes mensuales deben ser remitidos dentro de los veintidós días del mes siguiente del periodo que se informa. Por otra parte, los informes anuales deben reportarse en el mes de enero de cada año calendario.

Estos reportes corresponden a la información base para el presente capítulo. En ellos se informan detalladamente balances de masa, mediciones en chimeneas, emisiones de contaminantes, indicadores de desempeño ambiental, composición química del concentrado, consumo de combustible y registros de horas de operación y mantención de unidades y equipos de medición.

Una segunda fuente de información corresponde a los reportes realizados por los establecimientos en el marco del DS138/2005 del MINSAL, el cual es compilado, sistematizado y presentado por el RETC. Esta información permite la estimación de emisiones de las fuentes restantes.

##### 3.1.1 Fundiciones de cobre: Metodología de balance de masa

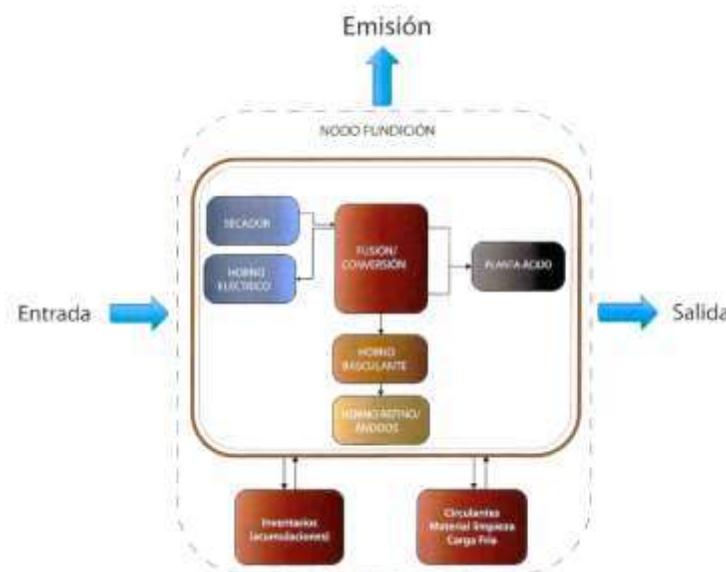
Las fundiciones de cobre cuentan con procesos pirometalúrgicos variados con el fin de llevar el concentrado de cobre a un estado de alta pureza. De esta forma, se tratan de sistemas complejos

---

<sup>18</sup>Decreto 165 - Establece Norma de Emision Para La Regulación Del Contaminante Arsenico Emitido Al Aire (1998) MINSEGPRES.

donde cada fundición tiene sus particularidades que, por lo demás van evolucionando en el tiempo, por ejemplo, a raíz de cambios tecnológicos para adaptarse y cumplir con la normativa ambiental. De esta forma, la SMA, por medio de la RE 694/2015 - “Protocolo para validación de metodologías para balance de masa de arsénico y azufre en fuentes emisoras de acuerdo al DS 28/2013 MMA” (SMA, 2015) establece definiciones y metodologías con el fin de estandarizar y asegurar resultados confiables y comparables entre las distintas fuentes de emisión.

Cabe destacar, que los resultados de los balances de masa corresponden al cumplimiento de acuerdo con la letra a) del artículo 16 del D.S. 28/2013 MMA. Por consiguiente, la resolución exenta N° 694, establece los protocolos para formular los balances de masa de arsénico y azufre, con el objetivo de determinar la emisión de dichos parámetros de interés que se encuentran regulados en la norma de emisión. En el protocolo se definen conceptos relevantes, el sistema donde se aplica el balance, los flujos de entrada, flujos intermedios y flujos de salida mínimos que deben considerarse para los balances, las metodologías de muestreo y análisis químico, las ecuaciones matemáticas y la forma de presentar la metodología para aprobación.



**Figura 3-1 Sistema, Flujos y límites de balance de masa**

Fuente: Protocolo de Balances de Masa aprobado mediante Resolución Exenta N° 694/2015 (SMA, 2015, fig. 1)

En la Figura 3-1 se aprecian los elementos necesarios para definir los componentes del balance de masa por fuente emisora. En primer lugar, los flujos de entrada se ubicarán justo antes de equipos de tostación, si existieran, o antes del o los equipos de secado o, si estos no existieran, del o los equipos de fusión. En caso de no ser posible este requerimiento, la fuente emisora deberá justificar técnicamente por qué no es posible cumplir el requerimiento. En este caso la fuente emisora deberá registrar diariamente la cantidad de arsénico que se maneja en las operaciones unitarias. En los flujos intermedios, se encuentran las unidades que llevan a cabo la fusión/conversión, y los hornos de basculante y de refino. Posteriormente, el tratamiento sigue

en la unidad de planta de tratamiento de ácido. Luego, los circulantes, de ser tratados como entradas y salidas, deben ser registrados semanalmente con información detallada de las cantidades másicas y contenido de As. Así, se generan los límites para contabilizar y evaluar las salidas y emisiones. Cabe destacar, que las fundiciones tienen configuraciones de equipos únicas, por lo que la definición del sistema permite comprender los procesos donde se aplicará el balance de masa.

### Flujos y Nodos

Los balances se constituyen sobre un modelo de nodos y flujos. Los nodos representan subprocesos y pueden ser descritos matemáticamente según la Ecuación 1:

$$\text{Entradas} + \text{Existencia}_{\text{inicial}} = \text{Salidas} + \text{Existencia}_{\text{final}}$$

#### **Ecuación 1 Balance de masa**

Fuente: Elaboración propia en base a Protocolo de Balances de Masa aprobado mediante Resolución Exenta N° 694/2015 (SMA, 2015)

Los flujos corresponden a movimientos de materiales que entran o salen de un nodo, y se diferencian por el comportamiento de origen y destino que tienen en un nodo determinado. De acuerdo con el protocolo establecido, se requiere categorizar los flujos de la siguiente manera:

**Tabla 3-1 Flujos Establecidos por el Protocolo de Balance de Masa**

Flujos de Entrada	Flujos de Salida	Flujos Intermedios/Inventarios (clasificados en inicial y final)
Concentrado Propio de Cu o Au	Ácido sulfúrico	Escoria
Concentrado Externo	Ácido sulfúrico grado C	Metal Blanco
Calcinas	Polvos captados no recirculados producto de la operación de equipos de control	Polvos
Scrap (sobrantes y restos de ánodos)	Efluentes producto de la limpieza de gases	Carga Fría
Fundentes (cuarzo, ceniza de soda, carbonato de calcio u otros)	Escorias de descarte producto de la limpieza de escoria	Circulante
Cementos de Cobre	Ánodo, RAF u otro refinado	Ánodos
Polvos de Entrada	Circulante o carga fría (dependiendo de necesidades operacionales)	Cargas Líquidas
Blíster externo	Otros, deben ser justificados	Moldes
Ánodos externos rechazados o restos de estos	Escoria	Ladrillos
Circulante o carga fría (dependiendo de necesidades operacionales)		Otros
Otros, deben ser justificados.		Limpieza

Fuente: Elaboración propia en base a Protocolo de Balances de Masa aprobado mediante Resolución Exenta N° 694/2015 (SMA, 2015)

### Balances de Masa

Respecto al cálculo de la emisión de los contaminantes, esta se obtiene a través de un desarrollo matemático, el cual considera los flujos másicos  $m$  en el nodo fundición. Esta ecuación tomará 12 incrementos temporales de 1 mes. De esta manera, la expresión para la masa de emisión en toneladas, considerado el mes a informar  $p$  y el anterior, será la siguiente:

$$m_{emisión}^p = m_{entra}^p - m_{sale}^p - (m^p - m^{p-1})$$

#### Ecuación 2 Estimación de emisiones mediante balance de masa

Fuente: Protocolo de Balances de Masa aprobado mediante Resolución Exenta N° 694/2015 (Ec. 6 SMA, 2015)

### Balance Mensual

En específico, para la emisión del contaminante de interés arsénico, la ecuación de cálculo utilizada es la siguiente:

$$Emisión As(mes) = \sum As(entrada) - \sum As(salida) - [As(final) - As(inicial)]$$

**Ecuación 3 Estimación de emisiones mensuales de arsénico mediante balance de masa**

Fuente: Protocolo de Balances de Masa aprobado mediante Resolución Exenta N° 694/2015 (Ec. 9 SMA, 2015)

**Balance Anual**

Asimismo, se requiere informar la emisión del arsénico para periodos anuales. A diferencia de la anterior, esta considera el material de limpieza acumulado durante un año. La ecuación de cálculo utilizada es la siguiente:

$$Emisión As(año) = \sum As(entrada) - \sum As(salida) - [As(final) - As(inicial)] - \sum MLAs$$

**Ecuación 4 Estimación de emisiones anuales de arsénico mediante balance de masa**

Fuente: Protocolo de Balances de Masa aprobado mediante Resolución Exenta N° 694/2015 (Ec. 12 SMA, 2015)

**Validación del Balance**

Para validar el balance del contaminante de interés, se utilizan los pesos secos de los flujos determinados a través del balance de Cu y/o Fe ajustado. Este ajuste se realiza a través de un método matemático como mínimos cuadrados, LaGrange, u otro, el cual es necesario para corregir los errores asociados inherentes al proceso.

Para este procedimiento, se cuenta con los pesos secos ajustados de cada flujo y el análisis químico, denominado ley base. Cabe destacar, que el balance de cobre es el parámetro con los datos más confiables dentro del sistema<sup>19</sup>. El peso de cobre o fino de cobre en todos los flujos se calcula de la siguiente manera (ley base):

$$Fino de Cu en flujo 1 = Peso seco flujo 1 * \% en peso Cu en flujo * \frac{1}{100}$$

**Ecuación 5 Estimación del contenido de cobre en un flujo**

Fuente: Protocolo de Balances de Masa aprobado mediante Resolución Exenta N° 694/2015 (Ec. 18 SMA, 2015)

**Aplicación Flujos Ajustados al Balance de As**

Es importante destacar que el balance de As no se ajusta directamente para la validación. Para el balance de As se cuenta con los pesos secos ajustados de entrada, salida y acumulados y la fracción de arsénico de cada flujo. Luego mediante la multiplicación del peso seco ajustado y la fracción de As, se determina los finos de As en todos los flujos, con dicha información se obtiene un balance de As validado.

---

<sup>19</sup> El protocolo de la SMA lo califica de esta forma, en parte por la relevancia de este elemento para el proceso, además del hecho de no haber emisiones de cobre.

Tal como se indicó anteriormente, para el balance de arsénico se tienen los pesos secos ajustados de cada flujo y se multiplica el peso seco del flujo ajustado por la fracción en peso del arsénico:

$$\text{Fino As en flujo } i = \text{Peso seco flujo } i_{\text{ajustado}} * \frac{\% \text{ en peso As en flujo } i}{100}$$

#### **Ecuación 6 Estimación de Arsénico en flujo "i"**

Fuente: Protocolo de Balances de Masa aprobado mediante Resolución Exenta N° 694/2015 (Ec. 23 SMA, 2015)

Con el resultado de la Ecuación 6 se puede entonces estimar la emisión de acuerdo con lo descrito en la Ecuación 3.

En el caso de tener que realizar algún ajuste en el balance de arsénico, se debe considerar lo siguiente, en orden jerárquico:

1. Ajustar los flujos máxicos de acuerdo con los balances de cobre y/o hierro.
2. Si no cuadra el balance de arsénico, se debe variar la concentración de arsénico de acuerdo con el rango de concentración de los mismos, del resultado del análisis químico, el cual entrega el promedio y desviación de la muestra.
3. Si no cuadra el balance, volver al punto inicial.

#### **Metodologías de Muestreo, Incrementos y Análisis Químico**

Para el muestreo, es necesario tomar incrementos para conformar una muestra<sup>20</sup> representativa de la unidad de muestreo y luego analizarlas. Estas muestras se obtienen en puntos definidos en el sistema, los cuales coinciden con la medición de flujo. El titular debe presentar los puntos de muestreo con el proceso asociado a cada muestra, así también señalar el o los tipos de muestreo, número de incrementos, frecuencia de muestreo y forma de determinación. Los puntos de muestreo y las características del muestreo se presentan en la Tabla 3-2.

---

<sup>20</sup> Definida como la parte de una unidad de muestreo generalmente obtenida por la unión de incrementos o fracciones de ésta y destinada a representar a la unidad en cuanto a la fracción de arsénico contenido en ésta. Según letra ñ, art 2, DS 75/2008 MINSEGPRES

**Tabla 3-2 Requisitos de muestreo**

Flujo	Punto de muestreo (a cada unidad de muestreo)	Número mínimo de incrementos (por unidad de muestreo)	Número mínimo de compósitos
Flujo de Entrada	Proceso discontinuo: 1 camión, 1 tolva, 1 carro de ferrocarril, 1 carga o camada preparada en cancha	10 por unidad de muestreo	Uno cada 500 toneladas de material o por proveedor (si es < 500 ton)
	Proceso continuo: correa transportadora o ducto	4 por hora	Uno cada 8 horas (3 compósitos diarios)
Flujo de Salida	Escoria de Descarte	3 incrementos por olla o taza. Punto de sangría 3 incrementos por hora. 20 incrementos o 3 sondajes por cancha	Uno diario
	Producto final: ánodo, blíster y otro semejante.	5 perforaciones por ánodo (número de ánodos: 0.25% del ciclo de moldeo). Punto de sangría o canal: 3 incrementos por ciclo, uno al inicio, otro al medio, y otro al final del ciclo de moldeo	Uno por ciclo de operación
Otros flujos de salida	Proceso Discontinuo: 1 camión y otro equivalente, 1 contenedor.	10 por unidad de muestreo	Uno por unidad de muestreo
	Proceso continuo: un ducto o línea de flujo.	1 muestra por hora	Uno diario
Material Circulante	Un camión u otro equivalente, una carga en zona de acopio	10 por unidad de muestreo	Uno por lote, máximo de 500 ton

Fuente: Protocolo de Balances de Masa aprobado mediante Resolución Exenta N° 694/2015 (Tabla 1 SMA, 2015)

### Análisis Químico

Las técnicas analíticas para determinar el contenido de arsénico disuelto y/o en los efluentes líquidos son las siguientes:

- Espectrofotometría de Absorción Atómica
- Emisión de Plasma de Acoplado Inductivamente (ICP-OES)
- Fluorescencia de Rayos X (FRX)
- Una técnica analítica de referencia o equivalente designada o aprobada por una institución nacional o internacional

### Reportes de Muestreo

En torno a la entrega de información, esta debe ser entregada en un informe mensual, el cual contenga todos los puntos evaluados relacionados a la norma. Además, en los anexos deben estar incorporadas las planillas con el detalle necesario.

### 3.1.2 Resumen de información disponible para fundiciones de cobre

Para el levantamiento de la información y la sistematización de datos, se realizó una revisión completa de los documentos enviados por la contraparte y de los archivos disponibles en la página del Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (en adelante SNIFA). En estas fuentes de información, se encontraron antecedentes de las fuentes emisoras de arsénico asociados a los procesos, balances de masa, emisiones y metodologías.

**Tabla 3-3 Resumen de información sistematizada de emisiones de arsénico**

Fundición	Periodo con información disponible	Años totales con información disponible
Chuquicamata	1993-2010, 2014-2020	28
Altonorte	2004-2020	17
Potrerrillos	2014-2020	7
HVL	2014-2020	7
Ventanas	2005, 2008-2020	14
Chagres	2004-2020	17
Caletones	2014-2020	7

Nota: se considera como año con información disponible si al menos un mes de dicho año cuenta con información

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3-3 se aprecia la cantidad de años en donde se encuentran datos de emisiones proveniente de los balances de masa, por fundición. De esta manera, se nota la disponibilidad y sistematización del periodo 2014-2020 para todas las fundiciones, además, se observa que Caletones, HVL y Potrerillos son las que cuentan con los menores tiempos de registro de emisiones sistematizadas. Por otro lado, es importante señalar que esto corresponde a los años en los cuales se identificó información para por lo menos un mes, por lo que no necesariamente están los datos del año completo.

### 3.1.3 Fundiciones de cobre: Brechas de información identificadas y propuesta de estimación

Tras el procesamiento de la información (ver resultados en Sección 3.1.4), se identificaron brechas relacionadas a la estandarización, comparación, periodos disponibles y valores particulares.

En primer lugar, cabe destacar, que para años anteriores al año 2017, no hay una estandarización de los formatos ni indicadores disponible entre las distintas fundiciones. Esta falta de estandarización dificulta el procesamiento de información comparable entre fundiciones, impidiendo muchas veces contar con información en detalle que permita realizar el seguimiento de la información y, por lo tanto, aumentando la incertidumbre respecto a la comparabilidad de valores entre fundiciones. Por lo demás, si bien se contaba con los lineamientos del DS 165/1998 (MINSEGPRES, 1998), su implementación era ad-hoc a cada fundición existiendo incertidumbre respecto de si se pueden comparar los resultados. La aplicación de la norma de emisión, y los lineamientos entregados por el protocolo de balance de emisiones, vinieron a solucionar la

mayor parte de esta problemática. Si bien el protocolo ha sido una contribución relevante, y al observar los reportes del periodo 2017-2020 se observa que se ha avanzado en la uniformización de la forma de reportar la información, aún existe espacio para mejorar en estandarización, observándose variaciones, por ejemplo, en el detalle temporal reportado mensualmente<sup>21</sup>. Asimismo, se observan inconsistencias puntuales donde se referencian valores de meses que no corresponden. La estandarización, así como la sistematización y procesamiento de los datos podría ser más eficiente y robusta, en caso de implementarse una plataforma única para el reporte de estos datos. Lo anterior contribuye no sólo a un mejor y oportuno acceso a la información, sino que también contribuye a la transparencia y confiabilidad del problema.

Por otro lado, una brecha especialmente preocupante, consiste en los recurrentes resultados del balance de arsénico que arroja emisiones negativas mensuales en los reportes técnicos. En particular, esto sucede para dos fundiciones (ver Tabla 4-4): HVL y Potrerillos. Los valores negativos de emisiones no sólo carecen de sentido físico, sino que afectan la confiabilidad de los resultados positivos. También, es importante mencionar que estas irregularidades tienen consecuencias en otros indicadores, tales como la captación y fijación del contaminante<sup>22</sup> y la intensidad de emisión<sup>23</sup>, mientras el primero resulta en que las tasas de captura y fijación del arsénico supera el 100%, el segundo resulta en valores negativos.

**Tabla 3-4 Número de meses y promedio de emisiones negativas**

Fundición	Indicador	2017	2018	2019	2020	Total
HVL	N° meses	1	3	6	2	12
	Media Emisión As (ton/mes)	-0.90	-2.30	-1.66	-3.21	-2.01
Potrerillos	N° meses	-	1	3	2	6
	Media Emisión As (ton/mes)	-	-6.06	-17.64	-28.05	-19.18
<b>Total N° meses</b>		<b>1</b>	<b>4</b>	<b>9</b>	<b>4</b>	<b>18</b>
<b>Media Emisión As (ton/mes)</b>		<b>-0.90</b>	<b>-3.24</b>	<b>-6.98</b>	<b>-15.63</b>	<b>-7.73</b>

Fuente: Elaboración propia en base a información provista por SMA

Si bien en su artículo 22° el Decreto 165/1998 (MINSEGPRES, 1998), referenciado por la norma de emisiones, considera la alternativa de que las emisiones estimadas por balance pudieran resultar negativas en un periodo puntual, llama la atención lo frecuente que ha sucedido y que se hayan concentrado en solo dos fundiciones. El mismo artículo establece que si durante 3 meses seguidos una fuente emisora presentara resultados netos negativos, se requerirá una auditoría externa, los cuales debieran tener resultado en 2 meses desde la fecha de recepción por parte de la fuente emisora.

<sup>21</sup> Por ejemplo, algunas fundiciones reportan en el balance mensual los resultados de todos los meses del año hasta la fecha, mientras que otras sólo reportan el mes que se está declarando.

<sup>22</sup> Calculada como la unidad menos las emisiones de arsénico dividido las entradas totales de arsénico en un periodo determinado.

<sup>23</sup> Entendido como las emisiones de arsénico divididas como el total de cobre producido.

En el periodo observado, sólo HVL presentó esta situación obteniendo valores negativos en el periodo diciembre/2018 a febrero/2019 y nuevamente entre abril/2019 y julio/2019. Si bien, en la auditoría externa se identificaron los problemas de la aplicación de la metodología de balance de masa, de acuerdo con entrevista con la SMA<sup>24</sup>, sólo a partir de septiembre 2020 se lograron implementar las mejoras necesarias. En el periodo entre los primeros tres meses consecutivos y la implementación de las soluciones, marzo/2019 a agosto/2020, hubo un total de 18 nuevos reportes de HVL, de los cuales 6 resultaron valores negativos.

Respecto a lo anterior, si bien el artículo 22° establece como requisito para la auditoría externa<sup>25</sup> los 3 meses consecutivos de balances negativos, también establece que ante balances negativos la autoridad competente puede solicitar mayores antecedentes a la fuente emisora, instancias que fueron utilizadas por la SMA, y que también contribuyeron para lograr una solución al año 2020. A modo de ejemplo, en el año 2019 hubo requerimientos de información por parte de la Superintendencia previos a la auditoría externa a la fundición HVL, solicitando justificaciones para las desviaciones de los resultados obtenidos, ajustes metodológicos y antecedentes relacionados.

En los resultados de la auditoría a HVL se concluye que el documento metodológico del balance de masa de arsénico y azufre de la fundición HVL, aprobado por la SMA<sup>26</sup>,

*“... debe adecuarse a las condiciones actuales de Fundición Hernán Videla Lira. Por ejemplo, actualizar el algoritmo de cálculos, unificar los nombres de las corrientes de entrada, salida y acumulaciones en los balances de masa de arsénico, azufre y cobre”* (Servicios Mineros SpA, 2019).

El Informe de Auditoría Externa (Servicios Mineros SpA, 2019) presenta a continuación una serie de hallazgos respecto de la metodología y que resultan en balances de emisión no representativos de la operación de la Fundición Hernán Videla Lira. Entre estos, se encuentra que no se cumple con: la total trazabilidad en la asignación de corrientes en el balance másico, los algoritmos de cálculo, el criterio mínimo de incrementos, la naturaleza de las mediciones y procedimientos de muestreo, la metodología de análisis químico para concentrados con concentraciones de arsénico menores a 200ppm, consistencia de descripción de corrientes, desagregación de corrientes individuales, entre otras. En particular, una de las razones principales de la obtención de balances negativos, es la subestimación de las corrientes de

---

<sup>24</sup> Realizada en videoconferencia el día 07/09/2021 con participación de la contraparte de la subsecretaría del Medio Ambiente

<sup>25</sup> Vale destacar que, según la norma de emisión, en su artículo 13, anualmente se debe realizar una auditoría externa. A pesar de esto, los problemas con la metodología se arrastraron hasta agosto/2020.

<sup>26</sup> Mediante RE 280/2016 SMA.

entrada<sup>27</sup>. También, se encuentra una situación particular, donde para diciembre del año 2017, la fundición se encontraba en huelga, pero realizó entregas de Ácido C desde el inventario, y también se generó efluente como consecuencia de vaciado y lavado de los equipos en plantas de ácido. En el mismo sentido, la fundición realizó una justificación técnica de los valores negativos del año 2019<sup>28</sup>, donde explicó que los factores que influyen en que la captura de arsénico sea mayor a 100% son el aumento de inventario de circulantes, junto con una mayor generación de efluentes en plantas de ácido.

Luego, la fundición Potrerillos también ha acudido a auditorías, en las cuales se notan varias similitudes con los hallazgos encontrados en la fundición ENAMI. Entre ellos: la total trazabilidad entre los flujos declarados, la definición de corrientes en balance másico y la inconsistencia con los reportes de corrientes y muestreo. En particular, en el mes de mayo del 2019, se observa un sobre stock de los inventarios, lo cual está asociado al proceso de puesta en marcha en el mes mayo del 2019<sup>29</sup>, que resulta en un balance de masa con resultado negativo. Dentro de los casos extraordinarios, se señala que para el 2018, se produjo una falla en la torre de absorción de la planta de ácido<sup>30</sup>, que obligó a la detención de operaciones. Esto implicó un bajo nivel de fusión y una alta variación de inventarios circulante, por lo que el balance de emisión. Por otro lado, para el año 2019, se reporta un error en los inventarios (RE 1915/2020)<sup>31</sup>, debido a la omisión en la contabilidad de concentrado de flotación de escoria recirculada y venta de material efectuada. Respecto a lo reportado en el año 2020 a su vez se solicita aclaración técnica de las razones que explican las emisiones negativas de arsénico en los meses de enero y abril (RE 1974/2021 SMA). Al respecto la respuesta<sup>32</sup> del titular fueron que, en el caso de enero, se debió a la detención de la fusión de concentrados durante la mayor parte del mes, que combinado con la variación de los inventarios producto de la continuidad operacional de la Planta de Flotación de Escoria, resulta en un balance negativo. Por su parte, el reporte de emisiones negativas de arsénico para abril 2020 responde a la venta de concentrados generados en la planta de flotación de escorias, lo cual resulta en un aumento de los flujos de salida.

Considerando que las emisiones correspondientes a la Fundición HVL previo a agosto 2020 no fueron obtenidas bajo la metodología de balances de masa aprobada mediante la Res. Ex. 1479/2021, dichas emisiones solo deben ser consideradas referenciales. En vista de esto, se propone una metodología para la reestimación de la emisión (ver anexo en Sección 10.2), con el objetivo de contar con una aproximación del nivel de emisiones de arsénico de la fundición HVL.

---

<sup>27</sup> Información reportada en Informe de Evaluación de la Conformidad, Servicios Mineros SpA. IEC-01-2018

<sup>28</sup> Justificación Técnica Captura As >100%, Balance Paipote, ENAMI, 2019.

<sup>29</sup> Informe mensual Fundición Potrerillos Mayo 2019 VF (RE 1915/2020)

<sup>30</sup> Informe Mensual DS 28/13, Fundición Potrerillos, enero/2018

<sup>31</sup> RE 1915/2020 SMA señala la no conformidad y las acciones a tomar: incorporación de subinventario, rectificación inventario inicial y recálculo de balances año 2019.

<sup>32</sup> Informe Respuesta RE 1974/2021 SMA- Fundición Potrerillos División Salvador Codelco (septiembre 2021)

### 3.1.4 Información proveniente del DS138/2005

El RETC compila y sistematiza la información declarada por ventanilla única en el marco del DS138/2005, presentando estimación de emisiones a nivel de fuente emisora. Estos resultados de estimación emisiones provienen de una estimación basada en factores de emisión y niveles de actividad, usualmente el consumo de combustible. Este método es aplicado de forma transversal a las decenas de miles de fuentes que registran año a año su operación en el RETC.

El método utilizado cuenta con varias fuentes de incertidumbre. Por un lado, el nivel de actividad es reportado por los mismos titulares de las fuentes, sin que exista un proceso de verificación. Lo anterior resulta en posibles errores u omisiones en el registro, tales como sobre o sub reporte del nivel real, asignación incorrecta del combustible o materia prima relacionada, entre otros. De la misma forma, el factor de emisión asociado se vincula por medio de un código de clasificación de fuentes, en este caso CCF8, el cual actualmente considera el tipo de proceso, la materia prima y combustible declarado. De esta forma, la asignación del factor de emisión por este método representa otra fuente de incertidumbre en la medida que es posible, especialmente para procesos poco frecuentes, que el CCF8 asignado no represente correctamente la operación de la fuente. Por lo demás, los factores de emisión, aun cuando son correctamente asignados, tienen una incertidumbre inherente que surge del hecho que se realiza una extrapolación de datos observados históricamente, cuyas condiciones de operación, características de combustible, o de las mismas fuentes pueden haber variado.

Para reducir la incertidumbre por de sub-reporte de fuentes, para el inventario se consideran todas las fuentes con estimación de emisiones de Arsénico para el año 2020, así como también las emisiones de Arsénico para el año 2019. Se realiza un análisis fuente a fuente, donde en el caso que se cuente con una emisión 2020 se considera este, y si no hay reporte 2020 se considera la emisión resultante del año 2019. La excepción corresponde a las fuentes cuyas emisiones son estimadas en el marco del DS28/2013, cuyas estimaciones se consideran menos inciertas que las emisiones del DS138/2005. Como resultado se obtiene un universo de 4.901 fuentes que, de acuerdo a la información del RETC, contarías con emisiones de Arsénico.

Una revisión de las emisiones del RETC resultó en tres tipos de hallazgos. Estos, junto con la forma en que se abordan, se presentan a continuación:

- Estimación de emisiones de arsénico no considera sistemas de abatimiento: Utilizando los factores de emisión asociados a los CCF8 imputados a cada fuente, se comprobó que la estimación reportada por el RETC no considera que sistemas de abatimiento de MP también tienen resultados en el abatimiento de las emisiones de arsénico. Dado los altos niveles de eficiencia de estos sistemas de abatimiento, no incluirlos resulta en una sobreestimación de las emisiones. Para ello se reestimaron las emisiones considerando la misma eficiencia de abatimiento de los sistemas de abatimiento de MP. Se destaca que las principales diferencias en término de masas ocurren en las centrales de generación eléctrica a carbón, las cuales, por la norma de termoeléctrica, cuentan con sistemas de abatimiento de alta eficiencia.

- Estimación de emisiones se escapan de los valores esperados para tipo de fuente: Al analizar los valores reportados se observa un subconjunto de fuentes clasificadas como calderas de agua caliente, las cuales tienen emisiones reportadas en RETC comparables a las emisiones de las termoeléctricas, en particular se identifican 4 fuentes detalladas en la Tabla 3-5. Un análisis de esto apunta a que se trata de un sobre reporte del nivel de actividad. Ante esto se consideran las emisiones de arsénico del año 2019 en lugar del 2020.

**Tabla 3-5 Fuentes y establecimientos con emisiones reportadas de arsénico por sobre lo esperado**

Establecimiento	Código de fuente
COMUNIDAD EDIFICIO SANTA FE	CA-OR-6798
COMUNIDAD CONJUNTO HABITACIONAL MARIA GABRIELA	CA-OR-17999
COMUNIDAD CONJUNTO HABITACIONAL MARIA GABRIELA	CA-OR-17995
COMUNIDAD CONJUNTO HABITACIONAL MARIA GABRIELA	CA-OR-18007

Fuente: Elaboración propia

- Errores puntuales en la estimación de emisión de arsénico: Un análisis en detalle de las emisiones de arsénico permite observar que para las fuentes que reportan combustión de gas natural el año 2020 presentan una sobre estimación de tres órdenes de magnitud respecto del valor estimado en el ejercicio 2019. Un análisis considerando el consumo de combustible reportado, permite identificar que el orden de magnitud correcto corresponde a las del 2019. En estos casos se considera la estimación 2019, por sobre la estimación 2020. Lo anterior aplica para los casos reportados en la Tabla 3-6.

**Tabla 3-6 Fuentes con sobre estimación de emisiones para el año 2020**

Establecimiento	Código de fuente
METHANEX CHILE SA	IN-GEV-23969
METHANEX CHILE SA	IN-GEV-23977
METHANEX CHILE SA	IN-GEV-23992
METHANEX CHILE SA	IN-GEV-23987
ESSITY CHILE S.A.	IN-GEV-918
AGROINDUSTRIAL EL PAICO S.A.	IN-GEV-18261

Fuente: Elaboración propia

## 3.2 Inventario de emisiones

En base a la compilación de inventario de emisiones (ver Sección 3.1) se consolida el inventario para el año 2020, el cual se presenta en Tabla 3-7. Se observa que la estimación de emisiones de arsénico del año 2020 llega a 473 toneladas, concentrándose principalmente en las emisiones de las fundiciones de cobre, las cuales en términos porcentuales representan el 99,9% de las emisiones del país.

Es importante destacar que las mayores emisiones son estimadas siguiendo una metodología de balance de masa, la cual es explicada en detalle en la Sección 3.1.1. Esta metodología, de ser aplicada correctamente, permitiría contar con una estimación más precisa en la medida que considera características propias, no sólo de los procesos, sino también de la materia prima, combustibles, productos y co-productos. La metodología asume que la diferencia entre las entradas, salidas y cambios de las existencias corresponden a las emisiones. Este enfoque puede ser considerado como conservador en la medida que asigna la totalidad de la fracción desconocida del balance de masa a emisiones.

En contraste con los de una estimación siguiendo un enfoque de factor de emisión como el recomendado por la agencia europea del medio ambiente, el balance de emisiones resulta en una estimación 12 veces mayor que el valor más alto del rango del factor de emisión recomendado<sup>33</sup> (EMEP/EEA, 2019). Lo anterior valida que la estimación por medio de balance de masa en su formato actual resulta en estimados conservadores en comparación con otros métodos.

**Tabla 3-7 Inventario de estimación de emisiones [ton/año] de Arsénico 2020**

Tipo de fuente	Fuente	Emisiones As [ton/año]	Origen de estimación de emisiones
Fundiciones	Fundición Chuquicamata	180,8	Balances de masa DS28/2013
	Fundición Altonorte	117,8	Balances de masa DS28/2013
	Fundición Potrerillos	(1) 51,0	Balances de masa DS28/2013
	Fundición HVL	(2) 18,7	Reestimación basado en intensidad de emisiones
	Fundición Ventanas	28,4	Balances de masa DS28/2013
	Fundición Chagres	8,6	Balances de masa DS28/2013
	Fundición Caletones	67,0	Balances de masa DS28/2013
Planta Tostación	Ministro Hales	0,0	(4) Medición isocinética de planta de ácido.
Otras Fuentes	Termoeléctrica	(3) 0,24	Reestimación a partir de RETC DS138/2005
	Otras fuentes	(4) 0,38	Reestimación a partir de RETC DS138/2005
<b>Total</b>		<b>473,0</b>	

- (1) Emisiones reportadas las cuales consideran dos meses con emisiones reportadas negativas. De no considerar estas emisiones el estimado es 107,1 ton.
- (2) Reestimación basada en intensidad de emisiones considerando reportes del titular a ENAMI en el periodo oct2020 a sep2021. Las emisiones reportadas hasta agosto 2020, registran dos meses con valores negativos y fueron estimadas con una metodología que no se ajusta totalmente a la metodología que se encuentra aprobada bajo la Res. Ex. 1479/2021 SMA. El titular presentó una versión revisada a las SMA para el año 2020 con emisiones referenciales de 12,9 ton.
- (3) Originalmente RETC presenta estimaciones más altas, la diferencia se explica principalmente por la reestimación considerando eficiencia de abatimientos, y problemas puntuales solucionado tal como se detalla en la Sección 3.1.4.
- (4) La planta de tostación Ministro Hales no se encuentra afecta a límite máximo de emisión anual de As.

Fuente: Elaboración propia en base a origen de estimaciones reportadas

<sup>33</sup> Factor de emisión *Tier 1*, equivalente a 27 gr Arsénico por tonelada de cobre producida, lo cual considerando las 1320 kton de cobre fino producidas, resulta en cerca de 38 ton anuales de emisión de arsénico.

Otra consideración que también apunta a que la estimación por medio de balances de emisión es una estimación conservadora, es la concentración de arsénico en las emisiones de las plantas de ácido y de los hornos de limpieza de escoria, que de acuerdo a la Norma vigente (DS28/2013 del MMA), deben medir y reportar mensualmente, de acuerdo al método CH-29<sup>34</sup> aprobado por el MINSAL. Dentro de los datos operacionales registrados por este método, los cuales son reportados a la SMA, se puede contar con un estimado por hora de las emisiones de arsénico, y considerando las horas de operación se puede estimar las emisiones mensuales. La suma de estas emisiones para el año 2020 alcanza las 2,84 toneladas de arsénico para las 7 fundiciones (ver Tabla 3-8). Vale la pena destacar, que existirían posibles emisiones puntuales de arsénico para las cuales actualmente no se cuenta con estimación, notablemente los hornos de refinación, y los sistemas de captura secundarios de emisiones fugitivas.

La fundición con mayores emisiones puntuales dentro de las fuentes actualmente reguladas para arsénico corresponde a Caletones, lo que se debe a que es la fundición de mayor tamaño y presenta un mayor factor de planta para el año 2020. Sin embargo, si se realiza un control de la cantidad anual procesada, las emisiones puntuales de Chuquicamata y Potrerillos superan a las de Caletones. Estas dos fundiciones son las que siguen a Caletones en la cantidad de emisiones puntuales, lo que se explica por el contenido de arsénico en el concentrado procesado y las tecnologías utilizadas.

---

<sup>34</sup> “Determinación de emisión de metales desde fuentes fijas”

**Tabla 3-8 Estimación de emisiones de arsénico [ton/año] por chimenea con regulación de As en la actual norma, año 2020**

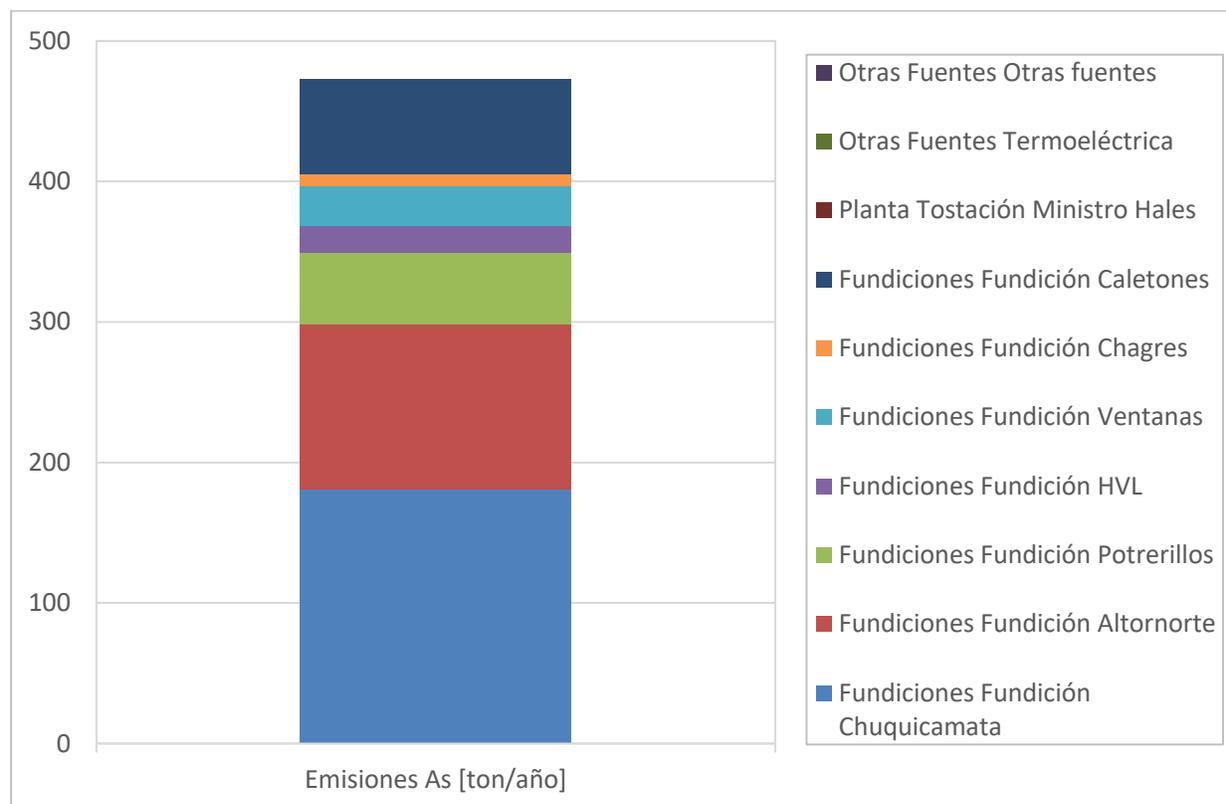
Fuente	Chimenea	Concentración [mg/Nm <sup>3</sup> ]	Caudal [Nm <sup>3</sup> /hr]	Tasa emisión [gr/hr]	Operación [horas]	Emisiones reportadas chimeneas [ton/año]
<b>Fundición Chuquicamata</b>	Planta de Ácido 3	0,49	121.991	57,70	6.003	0,32
	Planta de Ácido 4	0,45	118.790	54,01	5.213	0,28
<b>Planta de Tostación Ministro Hales</b>	Planta de Ácido Sulfúrico	0,03	94.092	3,22	7.083	0,02
<b>Fundición Altonorte</b>	Planta de Ácido 1	0,01	177.431	1,88	8.226	0,02
	Planta de Ácido 3	0,05	200.862	9,42	8.032	0,08
<b>Fundición Potrerillos</b>	Planta de ácido	0,41	196.336	80,06	6.807	0,55
<b>Fundición HVL</b>	Horno de Limpieza de Escoria	(1) 0,35	27.615	9,60	8.670	0,08
	Planta de Tratamiento de Gases de Cola	0,03	127.996	4,01	8.086	0,03
<b>Fundición Ventanas</b>	Horno de Tratamiento de Escoria	0,33	39.001	17,34	7.357	0,09
	Planta de ácido	0,29	99.033	28,82	7.771	0,22
<b>Fundición Chagres</b>	Horno de Limpieza de Escoria	0,68	61.027	41,40	8.784	0,36
	Planta de ácido	0,05	150.917	6,92	8.599	0,06
<b>Fundición Caletones</b>	PLG-1	0,27	173.707	7,05	8.537	0,40
	PLG-2	0,16	272.360	43,54	8.350	0,36
<b>Total</b>						<b>2,88</b>

(1) No considera concentraciones reportadas de marzo 2020 (13,45), pues muestra fue ejecutado bajo una condición operacional no normal del horno. Dicha medición se reemplaza por la media de los demás meses.

Fuente: Elaboración propia en base a mediciones isocinéticas reportadas por titulares a la SMA

Por las características en que se emite el arsénico, todas las emisiones cuantificadas corresponden a emisiones de fuentes fijas con el arsénico proveniente de la combustión de la materia prima y/o combustibles asociados. De esta forma, las emisiones son clasificadas como puntuales en su origen, aunque gran parte de ellas ocurren como fugitivas.

La distribución de las emisiones del balance se puede observar en la Figura 3-2, donde se observa que el 99,9% de las emisiones inventariadas provienen de las 7 fundiciones. De ellas dos fundiciones en conjunto superan el 63% de las emisiones a nivel nacional: la fundición Chuquicamata (38,2%) y fundición Altonorte (24,9%). La fracción restante se divide entre fundición Caletones (14,2%), Potrerillos (10,8%), Ventanas (6,0%), Hernán Videla Lira (3,9%) y Chagres (1,8%).

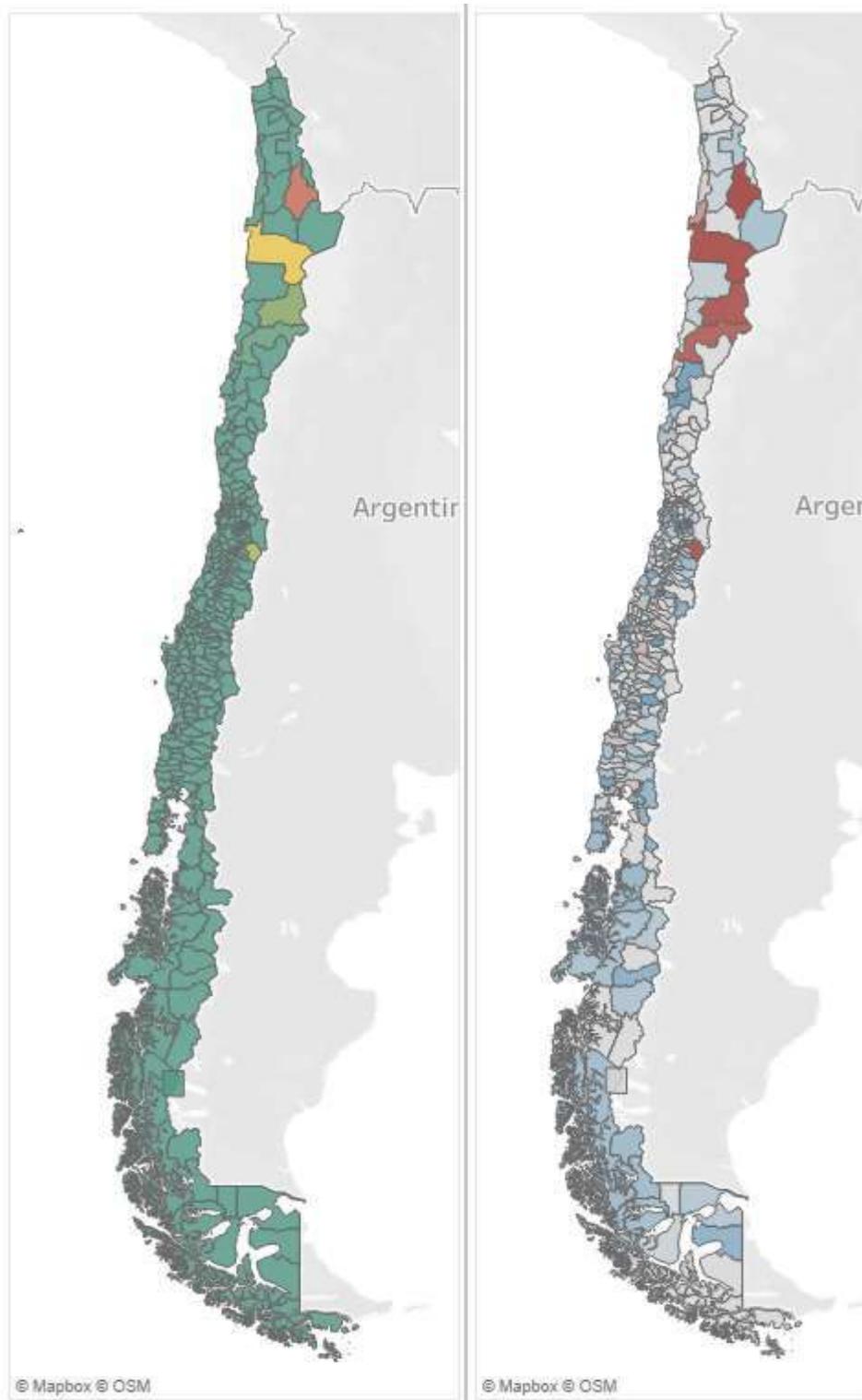


**Figura 3-2 Estimación de emisiones [ton/año] de Arsénico 2020 según fuente**

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3-3 se presenta la distribución de las emisiones a nivel territorial. En el primero de los mapas se presentan la distribución lineal de las emisiones, que permite identificar que dado el amplio rango que hay entre las fundiciones y el resto de las fuentes, e incluso entre las fundiciones, permite identificar las comunas donde se ubican las fundiciones: Calama (Chuquicamata), Antofagasta (Altonorte), Machalí (Caletones), Diego de Almagro (Potrerillos), Puchuncaví (Ventanas), Copiapó (Hernán Videla Lira) y Catemu (Chagres). Adicionalmente se identifican emisiones en 234 otras comunas del país, pero que en su conjunto representan el

0,1% de las emisiones nacionales. En la segunda figura se presentan las mismas emisiones, pero en escala logarítmica, lo cual permite distinguir de mejor manera aquellas comunas con un menor nivel de emisiones, sin perder de vista su comparación con el nivel de emisiones de las fundiciones. Entre ellas destaca, por ejemplo, Mejillones a causa de las centrales termoeléctricas a carbón instaladas en la zona.



Nota: Mapa de la izquierda en escala lineal de verde (valor más pequeño) a rojo (valor más alto). Mapa de la derecha en escala logarítmica de azul (valor más pequeño) a rojo (valor más alto)

**Figura 3-3 Emisiones de arsénicos en escala lineal y logarítmica por comuna**

Fuente: Elaboración propia

### 3.3 Análisis de inventario: Fundiciones

Si bien en la Tabla 3-2 se presenta una primera descripción de las emisiones de Arsénico, en el presente apartado se describen las emisiones de las principales fuentes de emisión: las fundiciones de cobre. Para eso se presenta cada fundición individualmente, esto, a través del diagrama de procesos y flujos con el cual se genera el balance de masa, junto con una tabla de las unidades que tiene la fundición, obtenidos de la última auditoría disponible de propuestas de metodología de balances, por fundición. También, se incluye un diagrama de corrientes del último año disponible y las emisiones. Estos últimos, corresponden a diagramas de cascada y diferencian corrientes de entrada y de salida, plasmando la contribución a la emisión de arsénico por corriente de la fundición, en un periodo anual. Para efectos prácticos, se identifican, pero no se incluyen las corrientes que tienen un valor de finos de arsénico nulo o cercano a cero.

Respecto a los valores de las emisiones anuales, estas son obtenidas desde los informes presentados a la SMA. Es importante destacar que, dada la ausencia del nivel de detalle requerida antes de la aplicación de la norma de emisión para Fundiciones y fuentes emisoras de arsénico (DS. 28/2013 MMA) balances de masa, no hay información disponible para todos los años anteriores acerca del material de limpieza, el cual tiene una contribución para rebajar el valor de emisión anual reportada. En este sentido, solo se tiene certeza de la inclusión de este valor para el periodo 2017-2020. Todos los valores de emisiones anuales presentados, consideran la remoción de este material cuando es declarado por la fundición.

Además, se presentan los comportamientos por fundición de indicadores relevantes mensuales y anuales<sup>35</sup> en el periodo 2017-2020. Estos, tales como la intensidad de emisión, calculado a través de la proporción de los gramos de arsénico emitidos y los finos de cobre, y también la captura y fijación de arsénico, obtenido a través de la proporción porcentual del arsénico emitido y la corriente de entrada. Los valores mencionados reflejan la relación entre la capacidad productiva y control de emisiones en el balance de masa.

Para finalizar, en la Sección 3.3.8 se presenta un análisis comparativo de las fundiciones y sus emisiones de arsénico según diferentes indicadores considerados relevantes, y que buscan dar antecedentes para la mejor comprensión de la problemática de las emisiones.

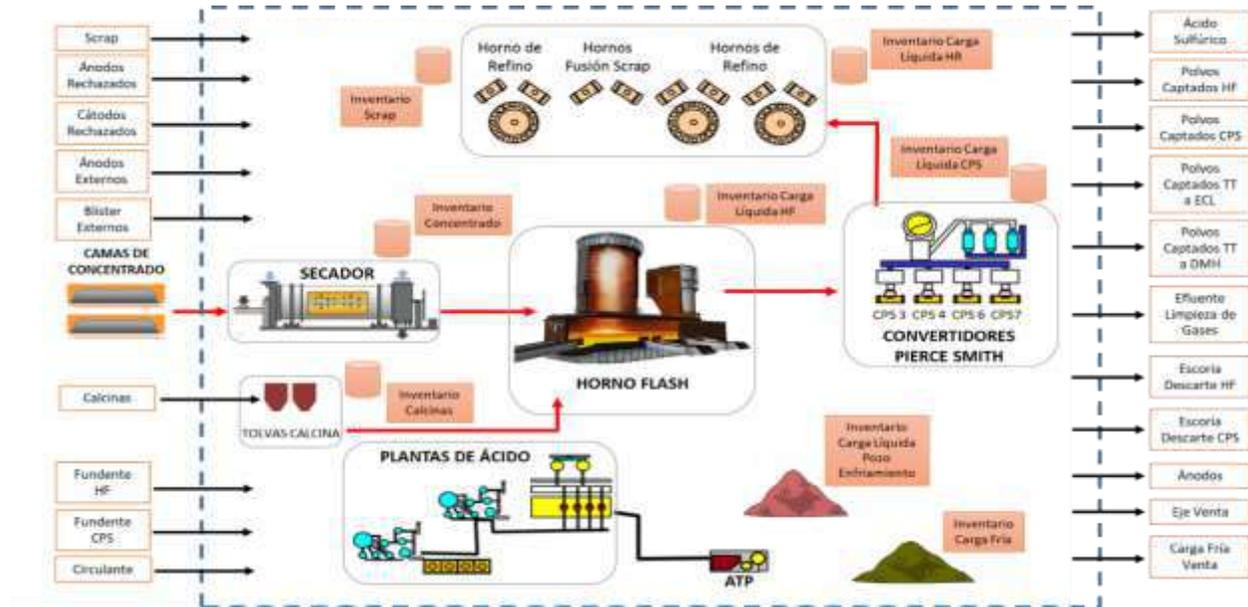
#### 3.3.1 Fundición Chuquicamata

La Figura 3-4 presenta un diagrama del proceso de operación de la fundición de Chuquicamata. Salvo para el concentrado de cobre y las calcinas, el diagrama simplifica las operaciones de la fundición, sin asignar las corrientes a los diferentes procesos. Es relevante destacar que en el marco de la norma de emisión la fundición Chuquicamata realizó modificaciones relevantes a su

---

<sup>35</sup> Los promedios anuales son calculados a través de los valores acumulados anuales necesarios.

operación, eliminando el Convertidor Teniente que hasta el 2018 operaba en paralelo al Horno Flash.



**Figura 3-4 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Chuquicamata**

Fuente: Elaboración propia en base a 2019 planillas técnicas, letra m)

La fundición Chuquicamata cuenta con varios equipos y unidades relevantes para los puntos de muestreo y para la elaboración del balance de masa. La información de cantidad de equipos y su capacidad se encuentra en la Tabla 3-9. Como se dijo anteriormente, se destaca el hecho de que, a diferencias de la situación previa al 2018, hoy en día Chuquicamata no cuenta con un convertidor teniente en paralelo al horno flash.

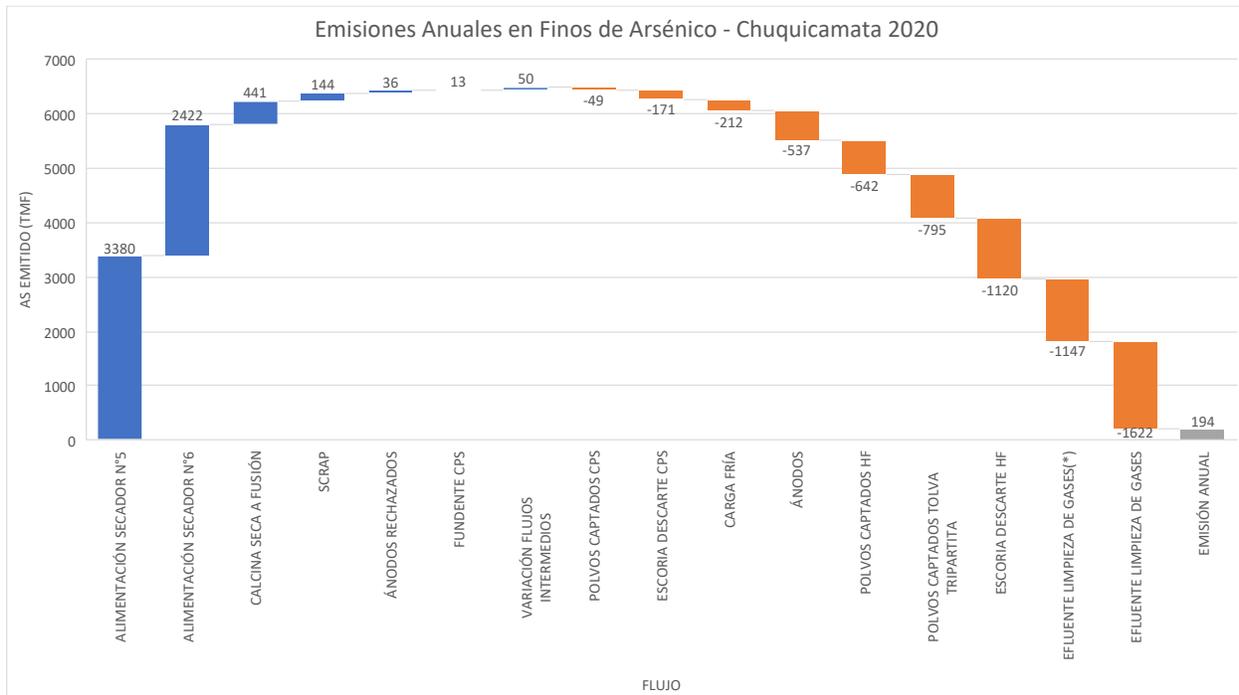
**Tabla 3-9 Equipos e instalaciones principales de fundición Chuquicamata**

Equipo/Instalación	Cantidad	Capacidad
Secador N°5	1	160 [t/h]
Secador a Vapor N°6*	1	207 [t/h]
Horno Flash	1	3000 [t/día]
CPS N°3, 4 y 6	3	250 [t/día]
CPS N°7*	1	250 [t/día]
Horno de Refino	4	250 [t/día]
Horno de Refino	2	350 [t/día]
Horno de Fusión Scrap	2	250 [t/día]
Planta de Ácido Sulfúrico*	2	2085 [t <sup>3</sup> /día]
ATP*	1	88 [m <sup>3</sup> /h]

Fuente: Elaboración propia en base a metodología de 2019 aprobada por la SMA

Es importante destacar, que hay varias unidades instaladas en el periodo 2017-2019, entre las cuales se encuentra un Convertidor Pierce Smith, Planta de Ácido Sulfúrico, ATP y un Secador de Vapor. Este último, comenzó su funcionamiento en Julio de 2020.

A nivel operacional, la Figura 3-5 representa el balance de emisiones de arsénico del año 2020. En ella las barras de color azul representan las “entradas”<sup>36</sup> de arsénico en el balance, las barras naranjas representan las “salidas”, por su parte, la “variación flujo intermedio” representa el cambio interanual de las existencias de arsénico en los flujos intermedios. Cabe destacar, que la variación interanual de las existencias impacta al balance de masa según lo descrito en la Ecuación 4, descrita en la sección 3.1.1.



**Figura 3-5 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Chuquicamata 2020**

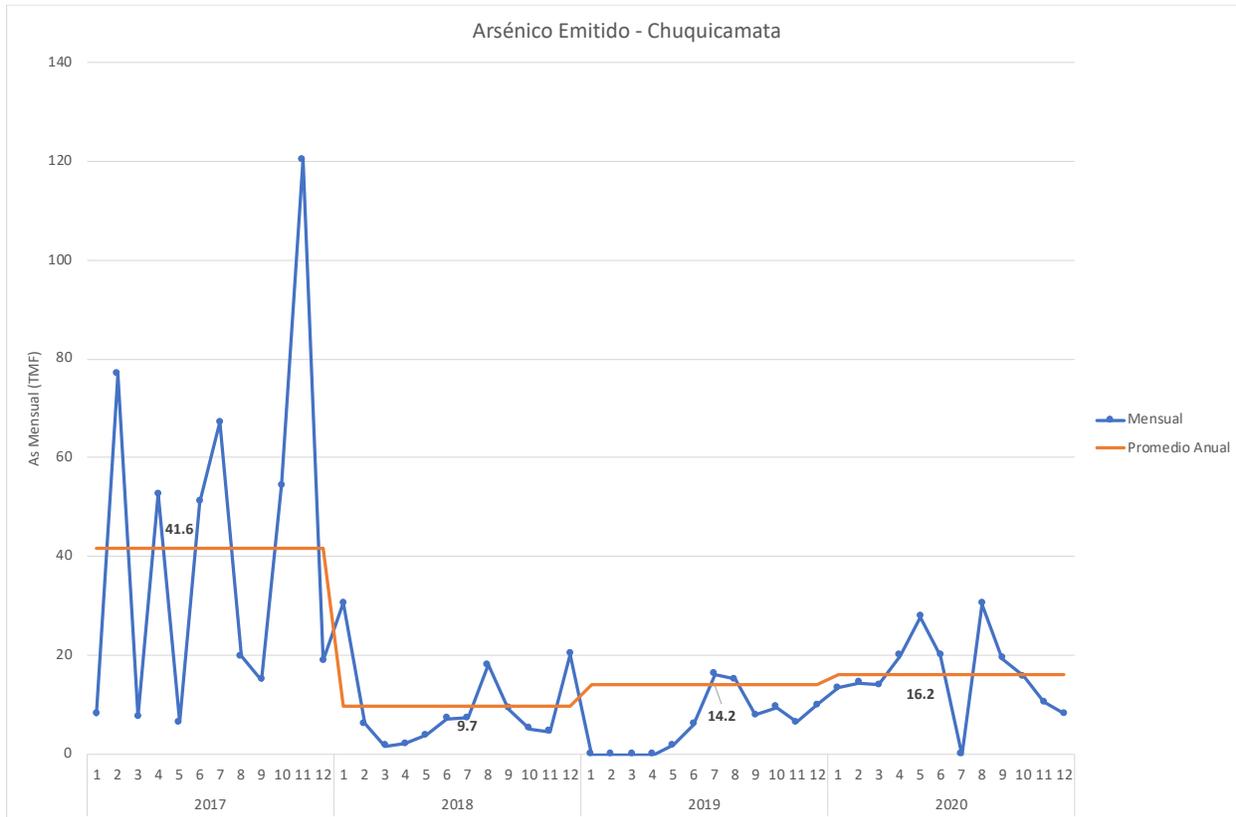
Fuente: Elaboración propia en base a datos de reportes mensuales

En la Figura 3-5 se puede ver que en la fundición Chuquicamata, el año 2020 las únicas entradas considerables provienen de los Alimentador de los Secador N°5 y N°6, así como las calcinas secas que entran directo al horno de fusión. Por el otro lado, las salidas tienen una distribución en más corriente, donde se destaca el Efluente de la limpieza de gases, Escoria de descarte, Polvo captados en Tolva Tripartita, Polvos captados HF y Ánodos.

Cabe mencionar, que la variación de flujo intermedio se calcula como la diferencia entre la existencia final y la existencia inicial, las cuales reflejan los movimientos de los inventarios. Además, se debe mencionar que se reportan otros flujos que no aparecen en esta gráfica, pero cuyos valores son cercanos a 0.

<sup>36</sup> Ver Ecuación 4 donde se explica la relación entre las entradas, salidas, flujos intermedios y emisiones.

En la Figura 3-6 se presentan los valores de emisión mensual de arsénico, así como su comparación con el promedio mensual de cada año, para el período 2017 a 2020. Se selecciona este periodo por representar el periodo en que se cuenta con mayores detalles de la estimación del balance de masa en las diferentes fundiciones, facilitando la comparación entre ellas.



**Figura 3-6 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual**

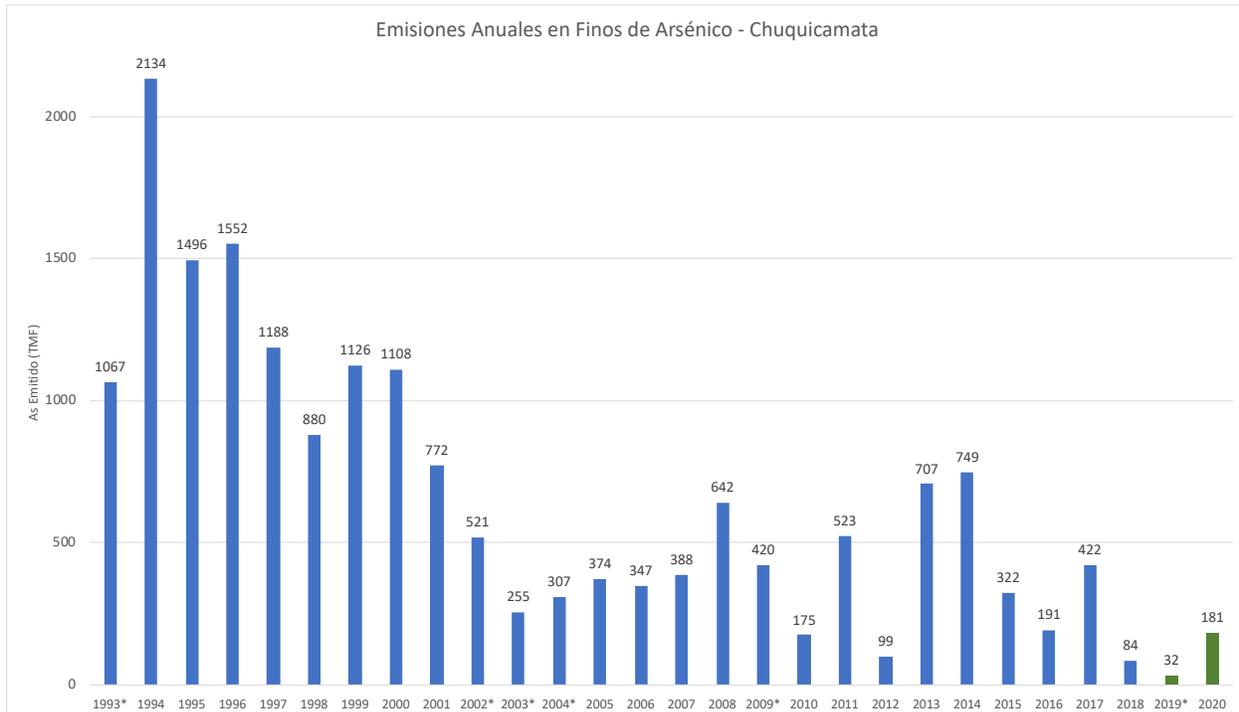
Fuente: Elaboración propia en base a datos de reportes mensuales

Se observa una variación intermensual relevante, con emisiones de arsénico mensuales que van desde valores cercanos a 0 [TMF/mes] hasta aproximadamente 30 [TMF/mes]. En particular se destacan la paralización de la actividad de la fundición durante los primeros meses de 2019, que responden a los ajustes operacionales de la Fundición para dar cumplimiento a los límites de emisión establecidos en la norma de emisión y en julio/2020 que responde a una paralización en el marco de la pandemia de Covid-19. A nivel anual, se observa una operación bastante estable para el periodo 2018-2020, con una gran baja en comparación al año 2017. Los promedios anuales resultantes de los balances de masa van desde las 9.7 [TMF/mes] en el año 2018 a 41,6 [TMF/año] en el año 2017.

Lo anterior contrasta con las emisiones anuales que se observan en la Figura 3-7. Cabe notar que existe una diferencia relevante al hacer la comparación con las emisiones mensuales, pues de acuerdo a la metodología de balance de emisión, a diferencia de las emisiones mensuales, las

emisiones anuales deben considerar la reducción por el arsénico contenido en el material de limpieza (ver Ecuación 4 en la Sección 4.1.1).

Es destacable que los resultados de emisiones de arsénico, desde el año 2015 cumplen con los límites de emisión establecidos en el artículo 3° de la norma de emisión (MMA, 2013a), donde para la fundición Chuquicamata se establece un límite de 476 ton/año de emisión.



\* años en que al menos un mes la fundición no determinó valores de emisión mensual mediante balances de masa. Para el año 1993, se tienen datos entre agosto-diciembre. Luego, cabe destacar, que para el periodo 2002-2004, los valores negativos no fueron contabilizados como tales, sino que como emisión cero. Luego, para el año 2009, si se reporta emisiones con valores negativos.

**Figura 3-7 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Chuquicamata, 1993-2020**

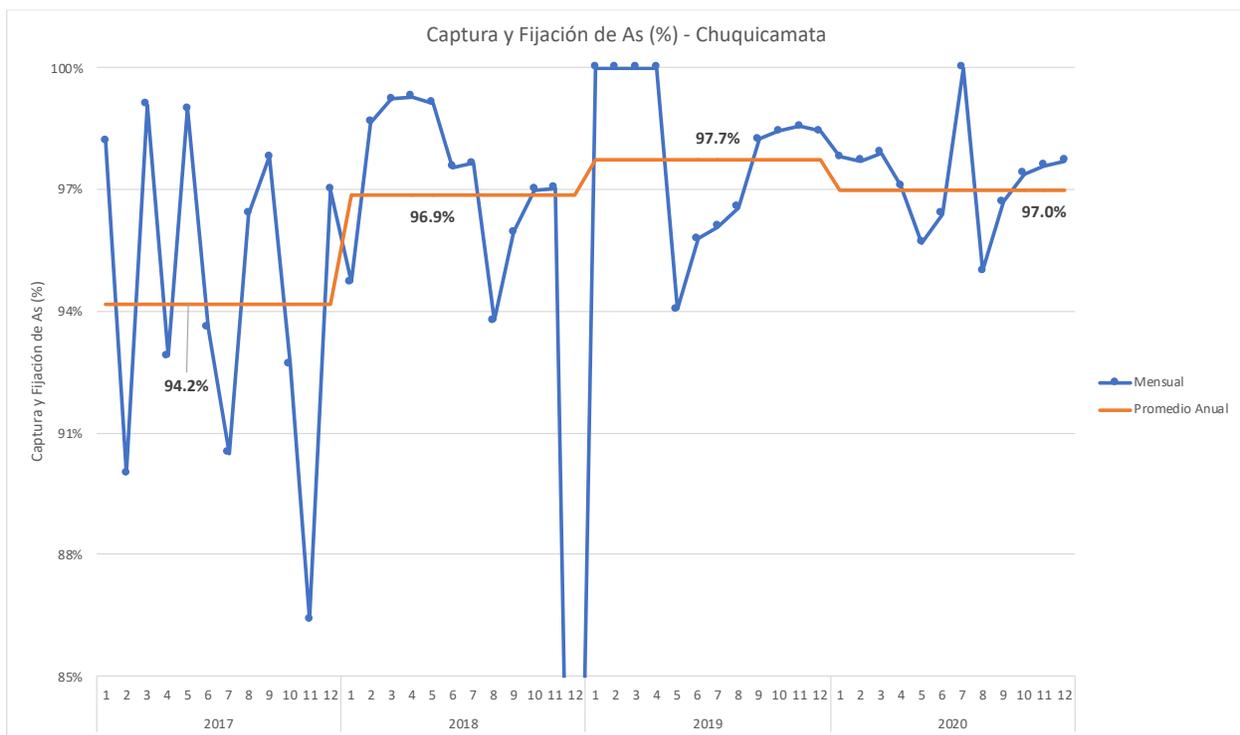
Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos y datos compilados por la SEREMI de Antofagasta.

Respecto a la información disponible para años previos a la aplicación del protocolo, se presentan las emisiones anuales reportadas por la fundición para los periodos 1993-2010<sup>37</sup>, y luego para 2014-2020. Dada la amplia extensión del periodo, se encuentran algunas particularidades y diferencias en la forma de registro. En ese sentido, el periodo de 2002-2004, los valores que arrojaron una emisión negativa eran informados como nulos (0 [TMF/mes]), lo cual es una diferencia con la metodología aplicada por la norma, la cual los incluye en el balance de emisión anual. En relación a lo anterior, para los años 2009 y 2010 esto se corrigió, incluyendo los valores

<sup>37</sup> Los datos son obtenidos de una compilación realizada por la SEREMI de Antofagasta (Emisiones Arsénico\_Codelco.xls), la cual solo contiene datos de emisiones de arsénico mensuales, sin informe de metodología asociado.

negativos como tal. Además, por otro lado, cabe destacar que los años 1993, 2010 y 2019 no cuentan con los datos de todos los meses del año. En específico, para el año 2019, la fundición Chuquicamata se encontró detenida durante los meses entre enero y abril, de ahí su baja tasa de emisión.

De forma complementaria, en la Figura 3-8 se presenta los valores reportados de captura y fijación de arsénico en la fundición Chuquicamata. La estimación considera la proporción entre la masa de arsénico que ingresa a la fundición y la masa que resulta del balance de masa como emisión. Al respecto, la norma en su Artículo 3° establece que la captura y fijación de arsénico debe ser al menos un 95%. Se observa que desde 2018 habría superado dicha tasa de captura y fijación, manteniendo una tasa de captura anual superior a los 94,2% de 2017, oscilando entre 96,9% y 97,7%. Desde el punto de vista numérico, se puede observar una notoria variabilidad del índice mensual entre los años 2017 y 2018, y que tras los ajustes ocurridos durante los primeros meses del 2019 se presentan valores mensuales más estables.



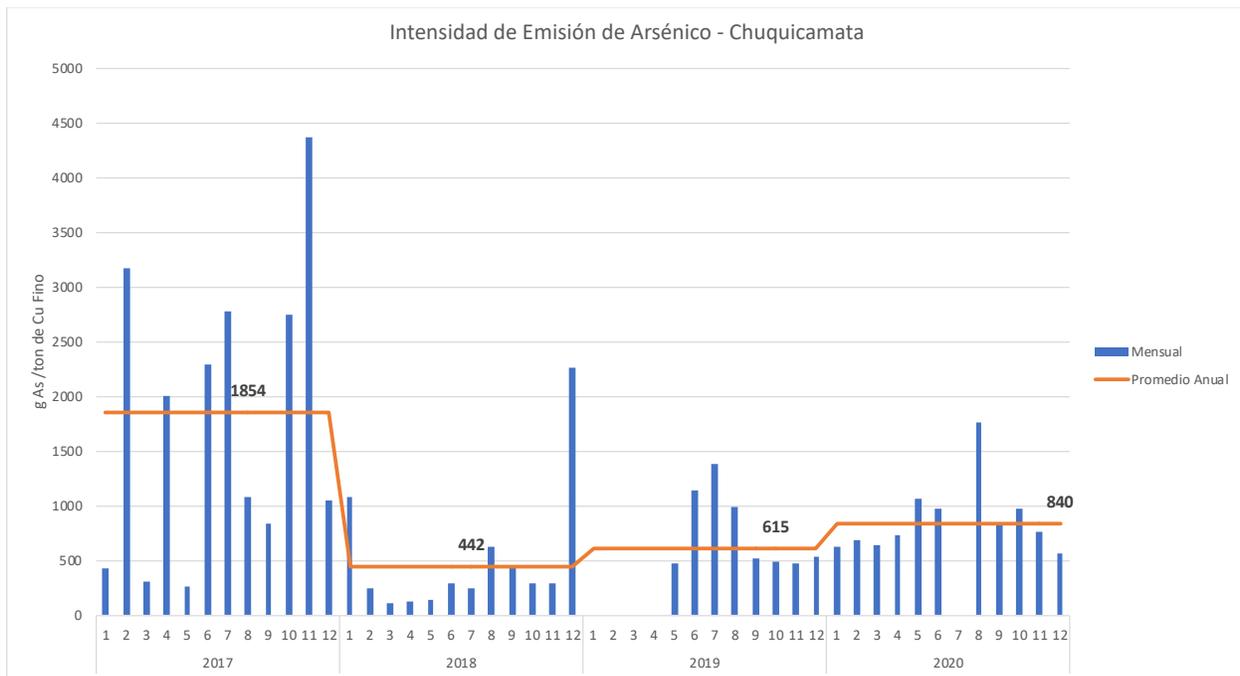
Nota: Cabe mencionar, que el eje de las abscisas se fija entre 85% y 100% para la comparación entre las fundiciones. Se excluye de la visualización el valor 70.7%, correspondiente a diciembre/2018.

**Figura 3-8 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Chuquicamata, 2017-2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

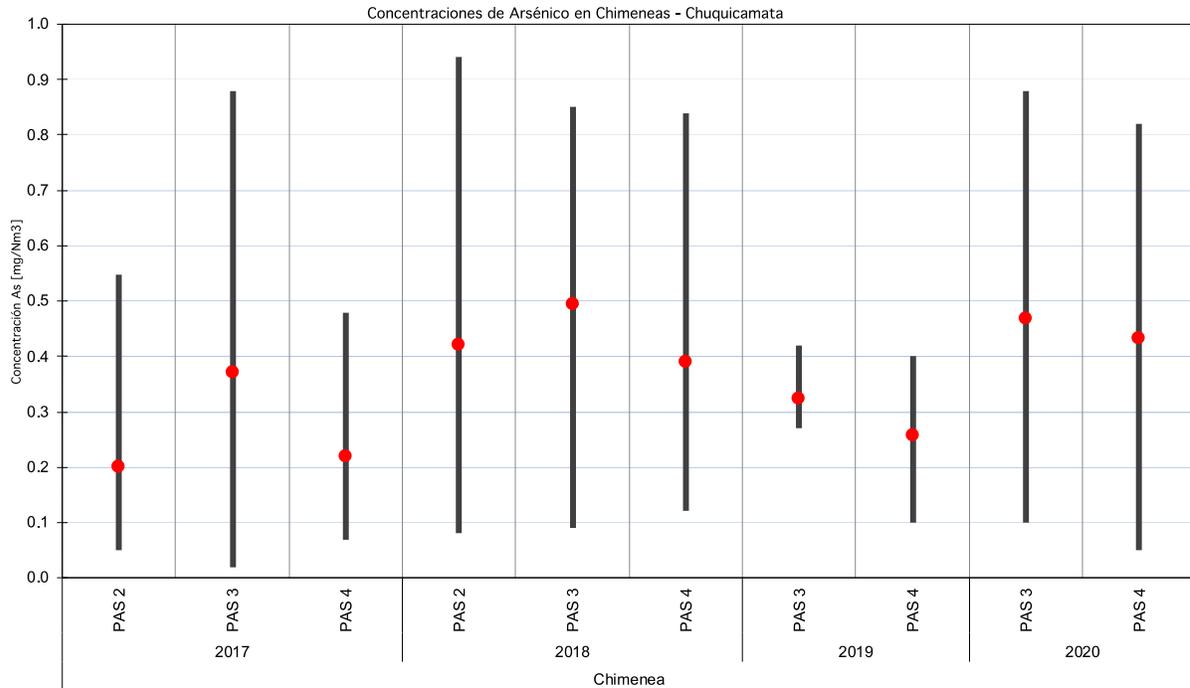
Por último, la Figura 3-9 presenta los valores del indicador de intensidad de emisión de arsénico, el cual refleja la proporción de la estimación de emisiones de arsénico resultante del balance de masa respecto de la producción de finos de cobre. Este indicador, complementario a los

anteriormente presentados, permite observar un nivel de eficiencia en términos de cuanto emisión se alcanza por unidad producida. A diferencia del indicador de emisiones totales, este indicador controla por el efecto de la producción, funcionando como una métrica que permite resumir el desempeño ambiental en término de emisiones por nivel de actividad. Más allá de las variaciones mensuales se nota una disminución en intensidad desde el 2018, la cual se ha mantenido baja con leve tendencia al aumento desde entonces. Lo anterior permite, por ejemplo, concluir que la diferencia entre las emisiones anuales entre los años 2019 y 2020 que aumentaron en un 165% se debió principalmente al aumento del nivel de actividad, el cual se vio afectado por la paralización de la fundición durante los primeros cuatro meses del año 2019. Lo anterior toda vez que la tasa de emisión unitaria aumento sólo un 37%.



**Figura 3-9 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Chuquicamata, periodo 2017-2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

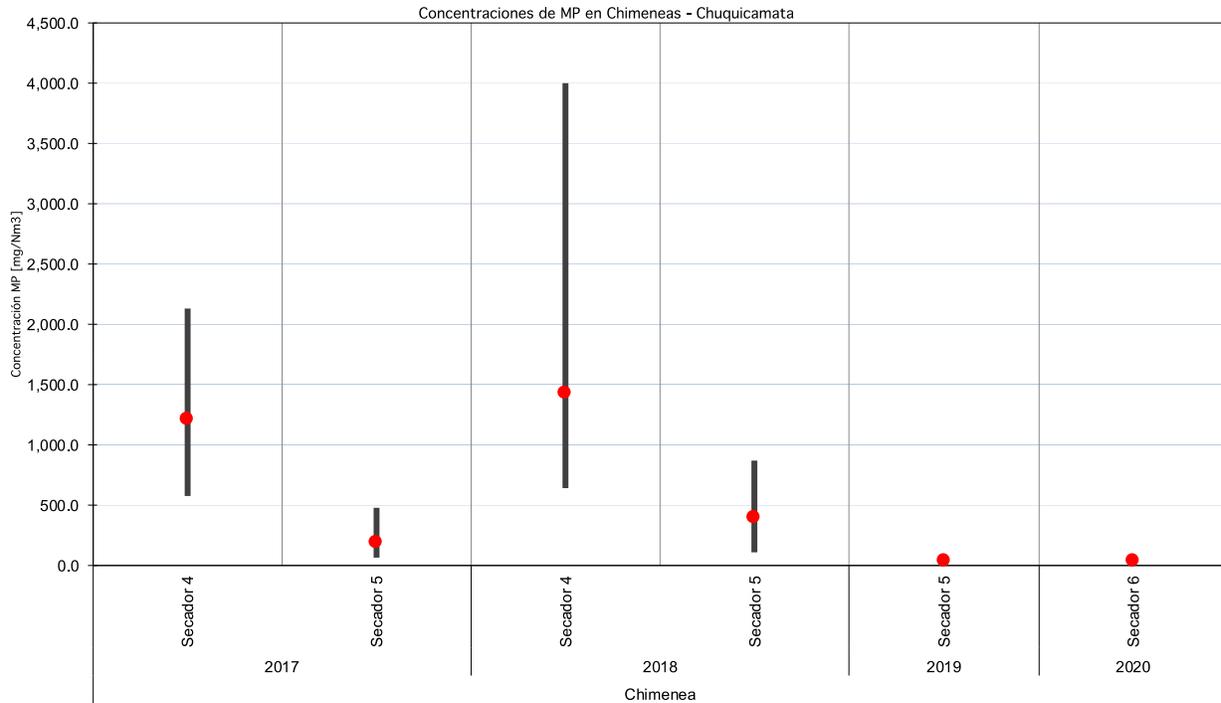


Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

### Figura 3-10 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Chuquicamata 2017-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-10 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de arsénico medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Chuquicamata presenta datos para tres plantas de ácido sulfúrico en los años 2017 y 2018, y para dos plantas en los años 2019 y 2020. Se puede observar que no se ha superado el límite de emisión de 1 [mg/Nm<sup>3</sup>] de As en ni una de las mediciones efectuadas, donde se ha superado el umbral de los 0,9 [mg/Nm<sup>3</sup>] de As en una ocasión. Además, se han registrado mínimos de 0,012 [mg/Nm<sup>3</sup>] de As.



Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

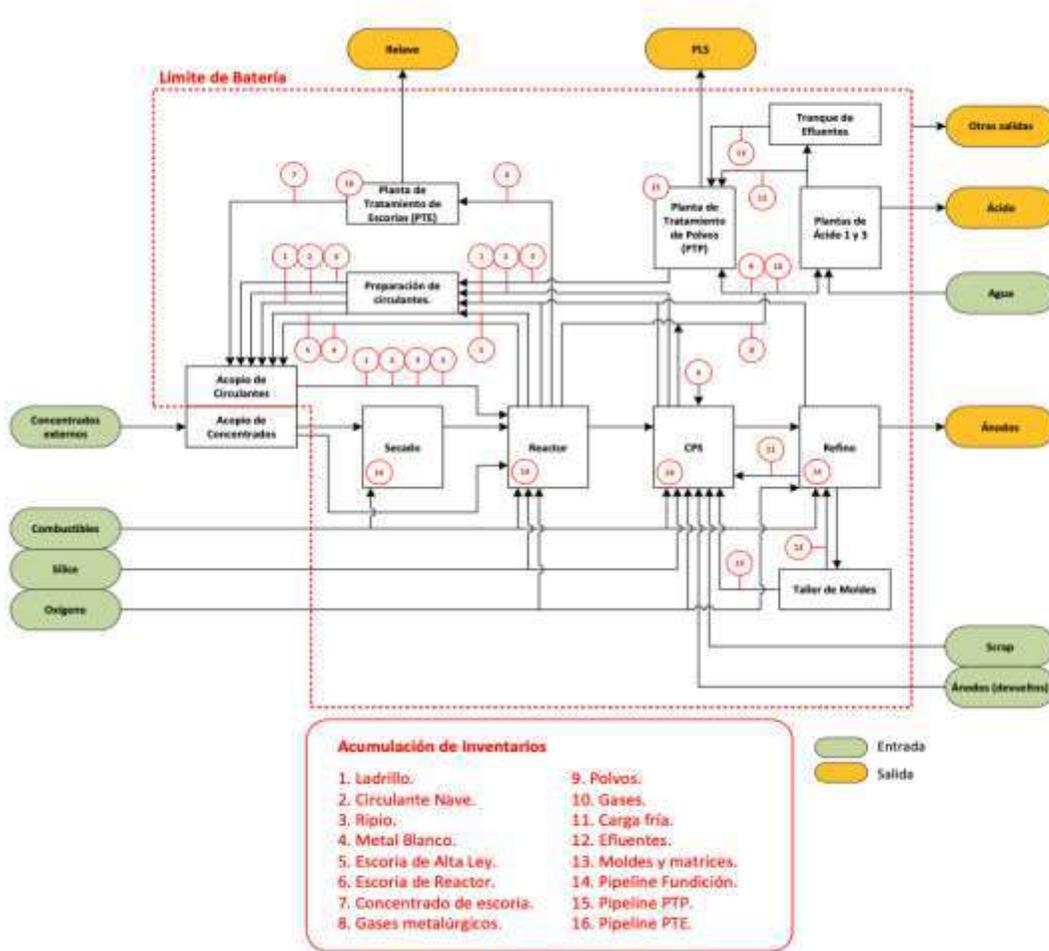
**Figura 3-11 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Chuquicamata 2017-2020.**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-11 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de material particulado medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Chuquicamata presenta datos para dos chimeneas de secadores en los años 2017 y 2018, y para el Secador 5 en los años 2019 y 2020. Se puede observar que hay alta variabilidad de datos, con un máximo de 4000 [mg/Nm<sup>3</sup>] de concentración de material particulado, correspondiente a mediciones en el Secador 4 en septiembre/2018. En los años 2019 y 2020, los valores cumplieron con las exigencias.

### 3.3.2 Fundiciones Altonorte

La fundición Altonorte, se compone de una serie de procesos unitarios interconectados de forma compleja según se presenta en la Figura 3-12. En dicha Figura, se observa que las diferentes entradas y salidas del sistema se relacionan con diferentes procesos y, por lo tanto, la relación entre ellos es compleja al ser mediada por los procesos unitarios propios de la fundición.



**Figura 3-12 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Altonorte**

Fuente: Auditoría a Metodología de Balance de Arsénico Enero/2021 (Res. Ex 92/2021 SMA)

La fundición Altonorte cuenta con varios equipos y unidades relevantes para los puntos de muestreo y para elaborar el balance de masa. Los principales equipos e instalaciones se presentan en la Tabla 3-10. Se destaca que, como primer proceso de fundición, la fundición utiliza un reactor tipo Noranda, posteriormente cuenta con 4 Convertidores, 4 hornos de refino.

**Tabla 3-10 Equipos e instalaciones principales de fundición Altonorte**

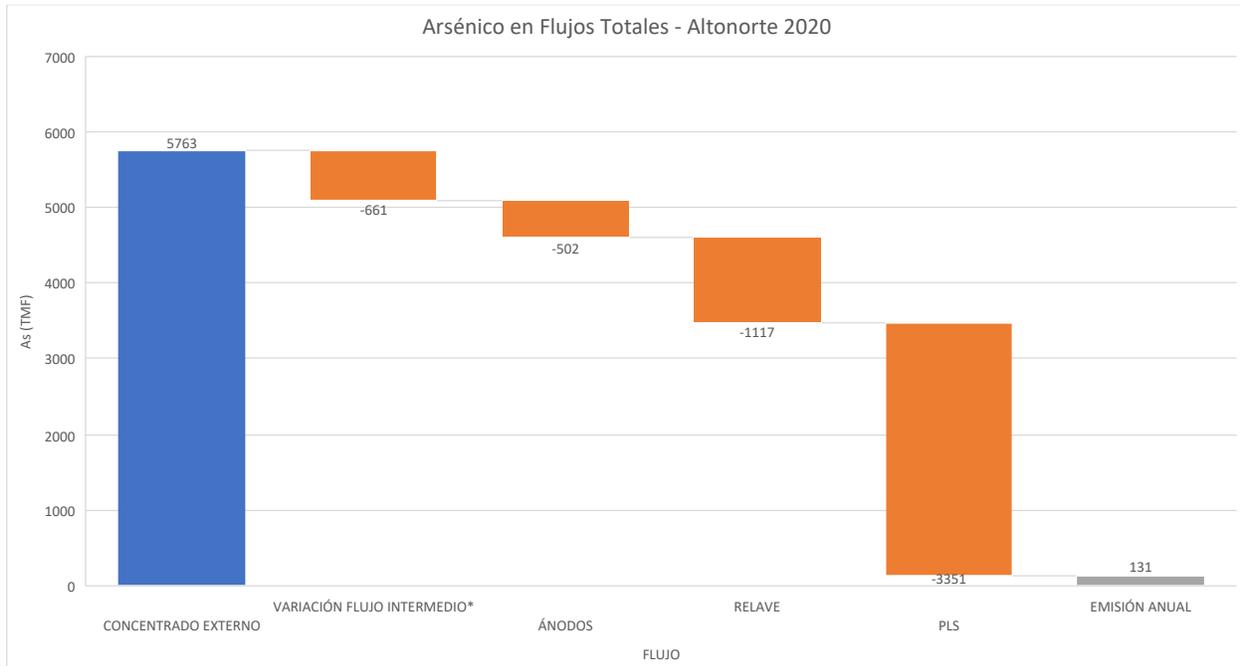
Equipo/Instalación	Cantidad	Capacidad
Secador	1	190 [t/h]
Reactor	1	1.160.000 [t/a]
CPS N°1	1	2000 [t/día]
CPS N°2 y 3	2	
CPS N°4	1	
Refino 1	3	1200 [t/día]
Refino 2		
Refino 3		
Ruedas Moldeo 1	2	55 [t/h] c/u
Ruedas Moldeo 2		
Planta Ácido 1	2	2.240 [t/día] ácido c/u
Planta Ácido 3		
Planta Tratamiento de Polvos (PTP)	1	100 [t/día] polvo
Planta Tratamiento de Escoria (PTE)	1	120 [t/h]

Fuente: Elaboración propia en base a metodología de Enero/2021 aprobada por la SMA  
(Res. Ex 92/2021 SMA)

A nivel operacional, la Figura 3-13 representa el balance de emisiones de arsénico del año 2020. En ella las barras de color azul representan las “entradas”<sup>38</sup> de arsénico en el balance, las barras naranjas representan las “salidas”, por su parte, la “variación flujo intermedio” representa el cambio interanual de las existencias de arsénico en los flujos intermedios. Cabe destacar, que la variación interanual de las existencias impacta al balance de masa según lo descrito en la Ecuación 4, descrita en la Sección 3.1.1. En el caso puntual representado en la Figura 3-13, las existencias interanuales aumentaron, lo que se refleja en que cerca de un 11,5% del arsénico de entrada se agrega al inventario de existencias.

---

<sup>38</sup> Ver Ecuación 4 donde se explica la relación entre las entradas, salidas, flujos intermedios y emisiones.

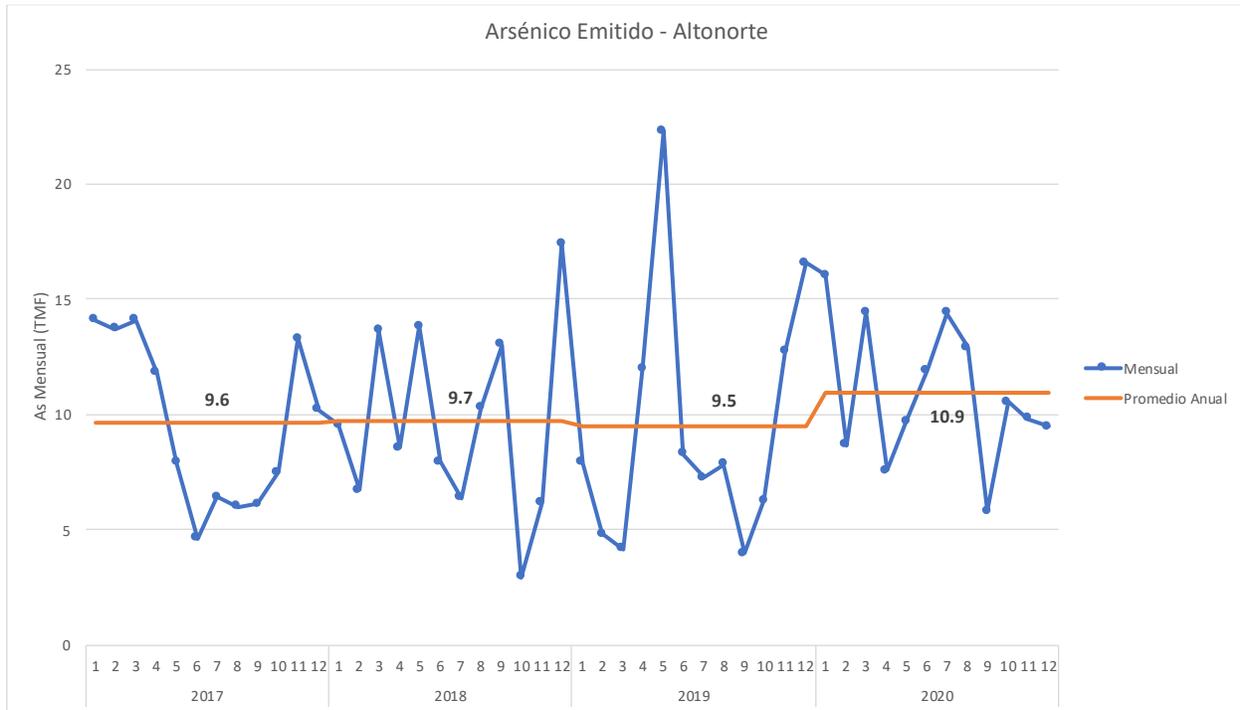


**Figura 3-13 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Altonorte 2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-13 se puede ver que en la fundición Altonorte, el año 2020 la única entrada relevante es la recepción de concentrado externo. La fundición Altonorte recibe cotidianamente alrededor de 10 concentrados diferentes, con niveles variables de elementos químicos. Por el otro lado, las salidas tienen una distribución en más corrientes, la de ánodos, que corresponde al producto metálico, relave, proveniente de la planta de tratamiento de escorias y PLS, corriente líquida proveniente de la planta de tratamiento de polvos. Esta última es la que genera mayores flujos de salida en términos de contenido de finos de arsénico, representando un 67% de las salidas totales.

Cabe mencionar, que la variación de flujo intermedio se calcula a través de la diferencia entre la existencia final y la existencia inicial, las cuales reflejan los movimientos de los inventarios. Además, se debe mencionar que los flujos que no aparecen en esta gráfica tienen valores cercanos al nulo, estos son para las entradas: Cátodos Rechazados, ENAP 6, Fundentes, Agua, Oxígeno, Carbón. Luego, para las salidas, solamente el flujo de Ácido Sulfúrico tendrá estas características.



**Figura 3-14 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual**

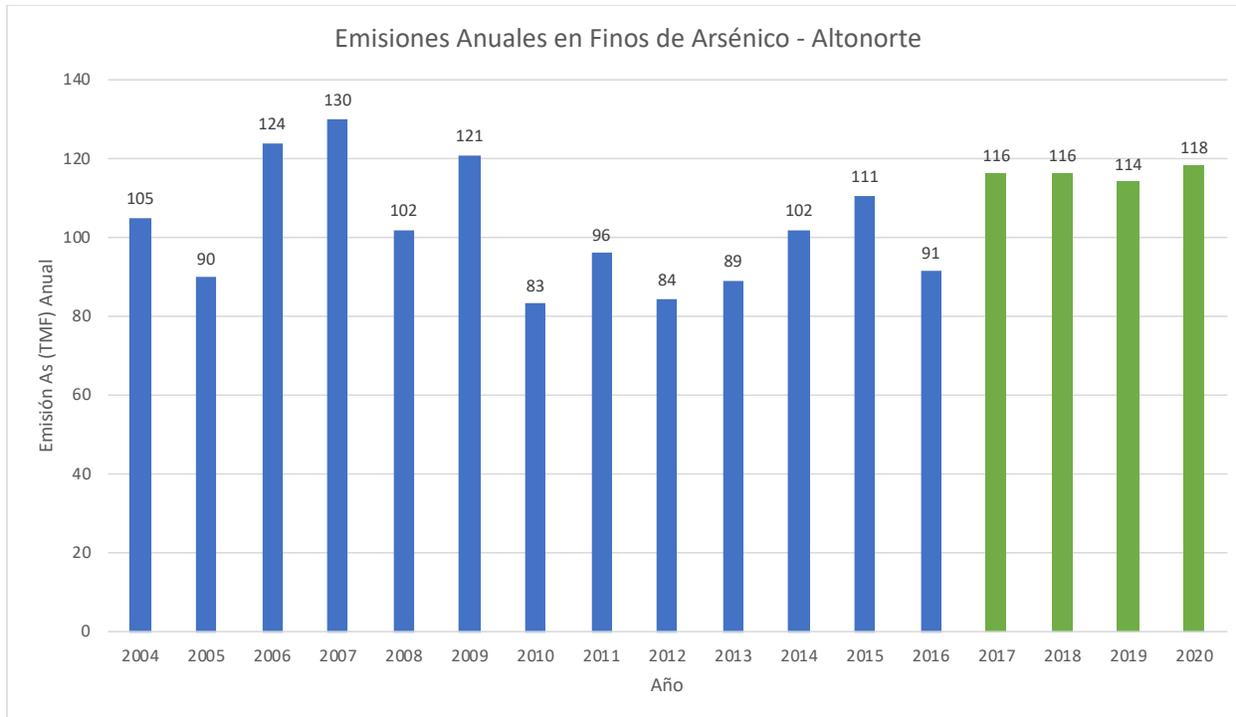
Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-14 se presentan los valores de emisión mensual de arsénico, así como su comparación con el promedio mensual de cada año, para el período 2017 a 2020. Se selecciona este periodo por representar el periodo en que se cuenta con mayores detalles de la estimación del balance de masa en las diferentes fundiciones, facilitando la comparación entre ellas.

Se observa una variación intermensual relevante, con emisiones de arsénico mensuales que van desde aproximadamente 3 [TMF/mes] hasta 22 [TMF/mes], sin embargo, a nivel anual se observa una operación estable. Los promedios anuales resultantes de los balances de masa van desde las 9,5 [TMF/mes] en el año 2019 a 10,9 [TMF/año] del año 2020. Lo anterior, da cuenta de que, dentro de un mismo año, los meses con emisiones excepcionalmente altas se tienden a compensar con otros meses con emisiones especialmente bajas, resultando en emisiones promedios bastante estables.

Lo anterior resulta en la estabilidad de las emisiones anuales que se observa en la Figura 3-15. Cabe notar que existe una diferencia relevante al hacer la comparación con las emisiones mensuales, pues de acuerdo a la metodología de balance de emisión, a diferencia de las emisiones mensuales, las emisiones anuales deben considerar la reducción por el arsénico contenido en el material de limpieza (ver Ecuación 4 en la Sección 4.1.1).

Es destacable que los resultados de emisiones de arsénico, desde el año 2017 cumplen con los límites de emisión establecidos en el artículo 3° de la norma de emisión (MMA, 2013a), donde para la fundición Altonorte se establece un límite de 126 [ton/año] de emisión.

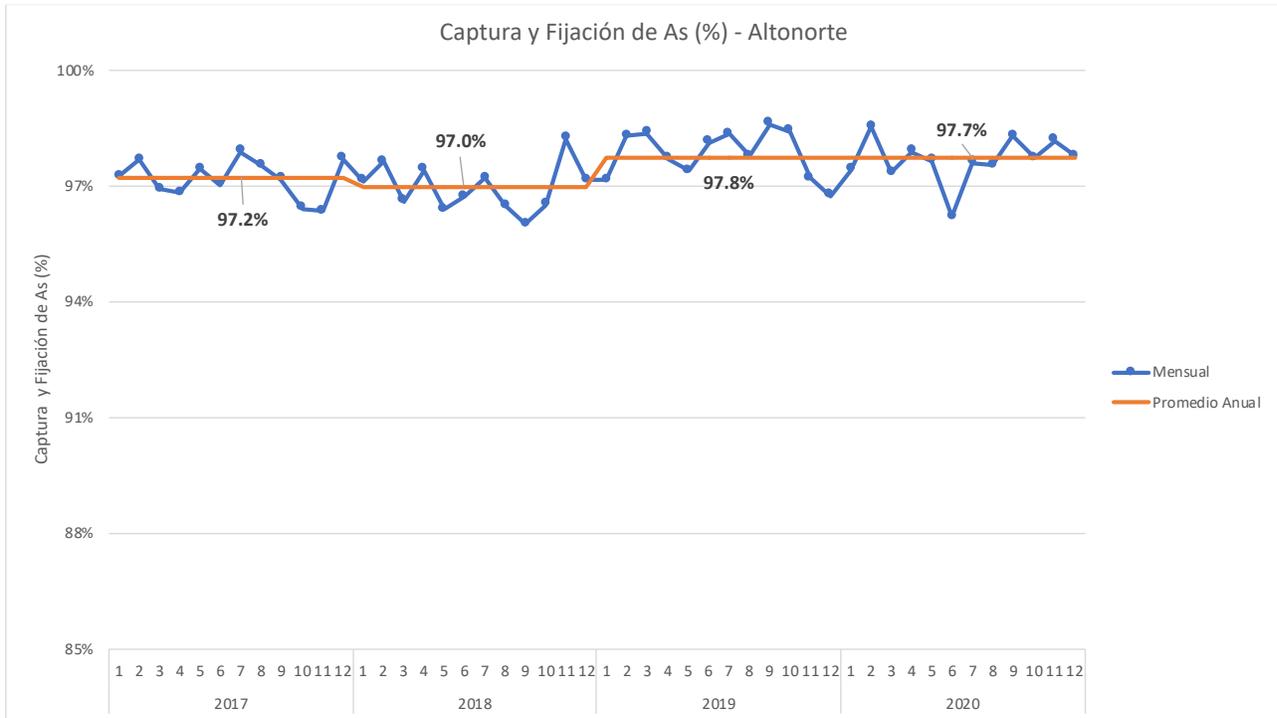


Nota: año 2013 no incluye en su estimación los meses de noviembre y diciembre.

### Figura 3-15 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Altonorte, 2004-2020

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos y datos compilados por la SEREMI de Antofagasta.

De forma complementaria, en la Figura 3-16 se presenta los valores reportados de captura y fijación de arsénico en la fundición Altonorte. La estimación considera el ratio entre la masa de arsénico que ingresa a la fundición y la masa que resulta del balance de masa como emisión. Al respecto la norma en su Artículo 3° establece que la captura y fijación de arsénico debe ser al menos un 95%. Se observa que durante todo el horizonte 2017-2020 la fundición de Altonorte habría superado dicha tasa de captura y fijación, manteniendo una tasa de captura anual bastante estable entre 97,2-97,8%.

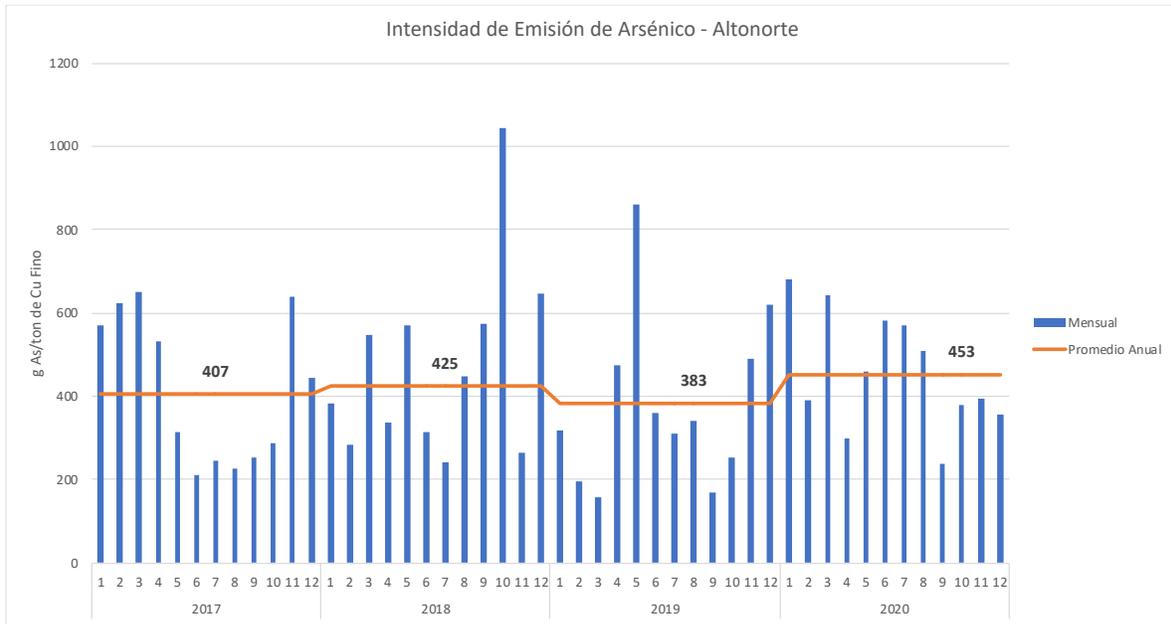


Nota: Cabe mencionar, que el eje de las abscisas se fija entre 85% y 100% para la comparación entre las fundiciones

**Figura 3-16 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Altonorte, 2017-2020**

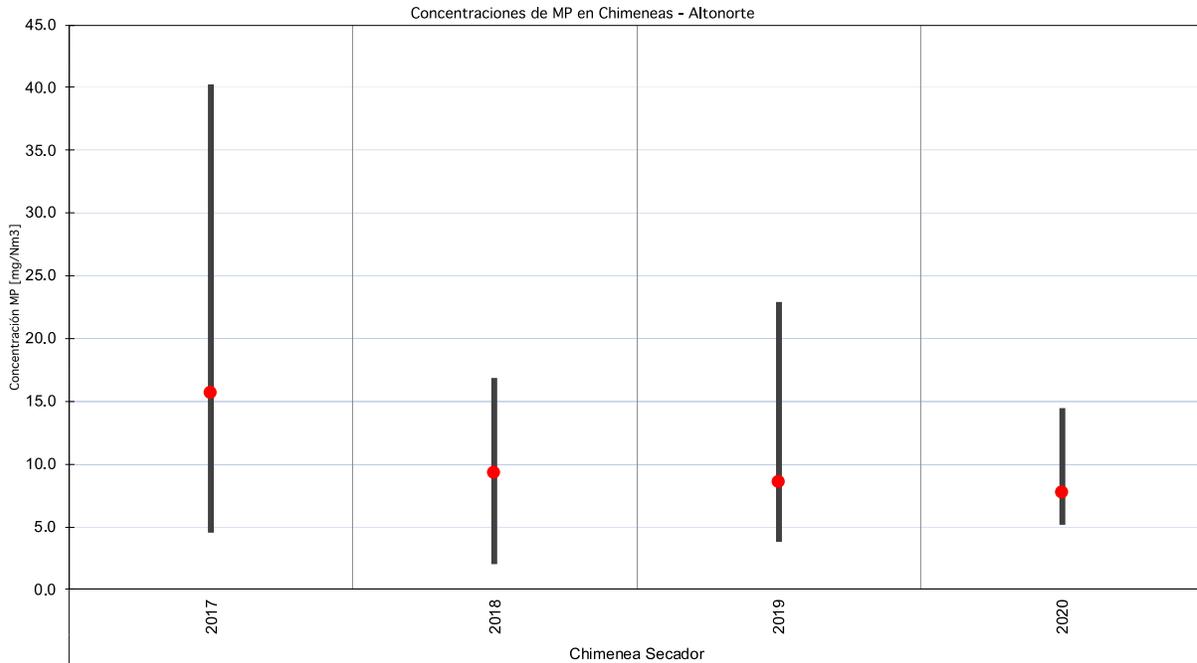
Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Por último, la Figura 3-17 presenta los valores del indicador de intensidad de emisión de arsénico, el cual refleja la proporción de la estimación de emisiones de arsénico resultante del balance de masa respecto de la producción de finos de cobre. Este indicador, complementario a los anteriormente presentados, permite observar un nivel de eficiencia en términos de cuanto emisión se alcanza por unidad producida. A diferencia del indicador de emisiones totales, este indicador controla por el efecto de la producción, funcionando como una métrica que permite resumir el desempeño ambiental en término de emisiones por nivel de actividad. Se observa que si bien, mensualmente existen variaciones relevantes a nivel anual el indicador se ha mantenido bastante estable dando cuenta de que Altonorte ha mantenido su desempeño ambiental histórico, respondiendo a los límites de emisión que rigen desde el 12/12/2016.



**Figura 3-17 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Altonorte, periodo 2017-2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

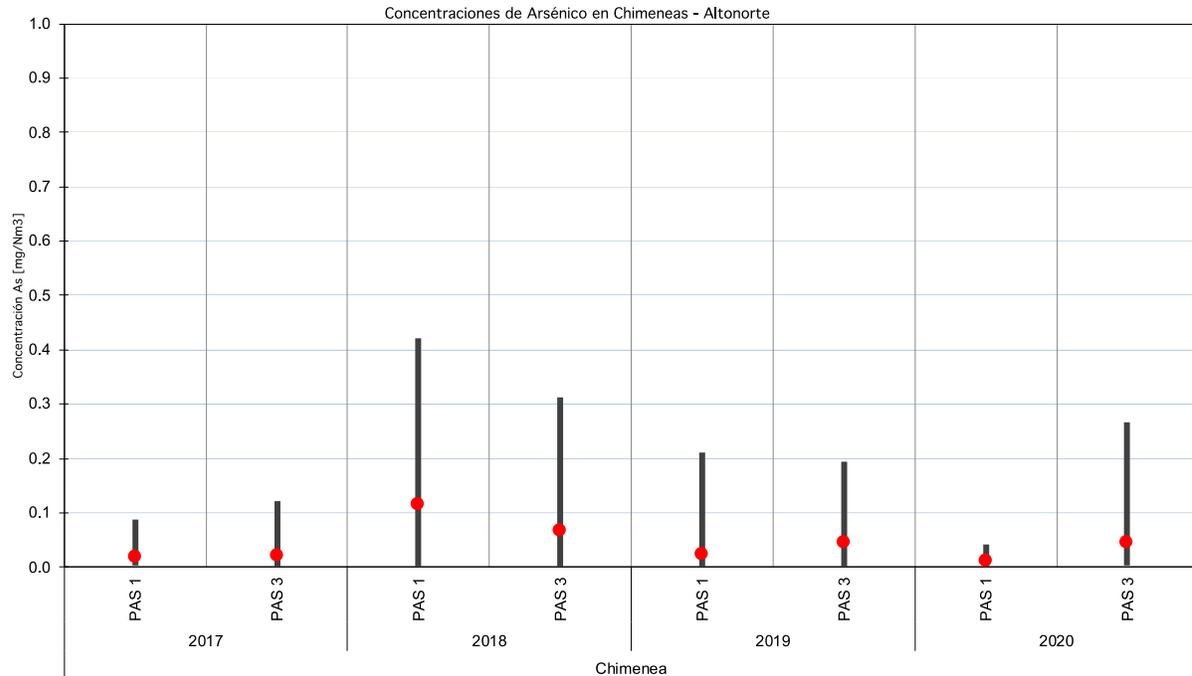


Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

**Figura 3-18 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Altonorte 2017-2020.**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-18 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de material particulado medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Altonorte presenta datos una única chimenea asociada al secador, para el periodo 2017-2020. Se puede observar que hay un cumplimiento en todos los años analizados, con un máximo de 40 [mg/Nm<sup>3</sup>] de concentración de material particulado, correspondiente a mediciones en junio/2017. En el periodo de 2018-2020, las medias calculadas se encuentran bajo los 10 [mg/Nm<sup>3</sup>].



Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

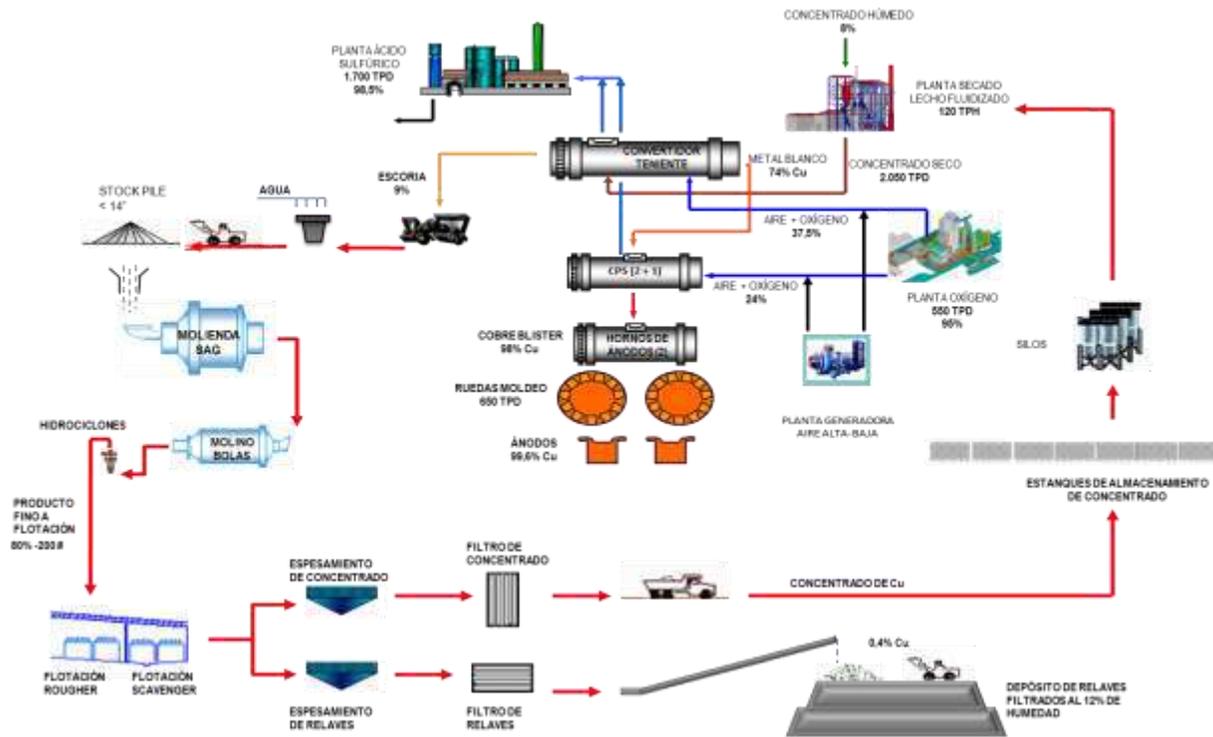
**Figura 3-19 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Altonorte 2017-2020.**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-19 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de arsénico medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Altonorte presenta datos para dos plantas de ácido sulfúrico en el periodo 2017-2020. Se puede observar que no se ha superado el límite de emisión de 1 [mg/Nm3] de As en ni una de las mediciones efectuadas, donde se ha superado el umbral de los 0,4 [mg/Nm3] de As en una ocasión. Además. Se han registrado mínimos de 0,0017 [mg/Nm3] de As.

### 3.3.3 Fundición Potrerillos

La Figura 3-20 presenta el diagrama de la fundición de Potrerillos, la cual incluye etapas propias de la faena minera, tales como la concentración del material. Justamente el mineral concentrado es la principal corriente de entrada de arsénico, la cual ingresa a la planta de secado. Desde este punto el material seco es llevado al convertidor teniente para su fundición donde se separa la escoria, metal blanco y gases de salida. Cada una de estas corrientes interna tiene un destino diferente.



**Figura 3-20 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Potrerillos**

Fuente: Planillas Reporte técnicos año 2020, letra m)

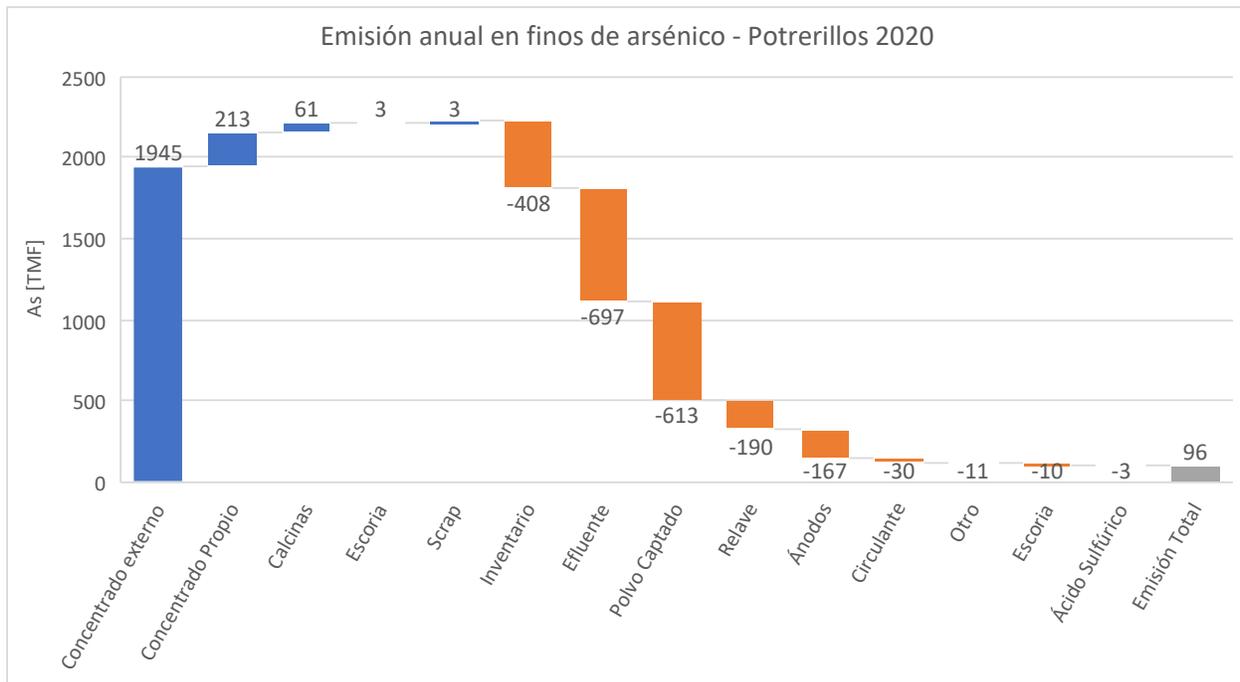
La fundición Potrerillos cuenta con varios equipos y unidades relevantes para los puntos de muestreo y para la elaboración del balance de masa. La información de cantidad de equipos y su capacidad se encuentra en la Tabla 3-11.

**Tabla 3-11 Equipos e instalaciones principales de fundición Potrerillos**

Equipo/Instalación	Cantidad	Capacidad
Planta de Secado	1	Diseño: 120 [t/h] Nominal: 83,3 [t/h]
Convertidor Teniente	1	2.105 [t/día]
Convertidores Pierce Smith	3	700 [pie <sup>3</sup> ]
Hornos de Ánodos	2	220 [ton/ciclo]
Rueda de moldeo	2	Nominal: 66 [t/h] para ánodos de 224 kg
Planta de Ácido	1	200.000 [Nm <sup>3</sup> /h]
Planta de Flotación de Escoria	1	Diseño: 1700 [t/día]

Fuente: Elaboración propia en base a propuesta metodológica de balance 2019

A nivel operacional, la Figura 3-21 representa el balance de emisiones de arsénico del año 2020. En ella las barras de color azul representan las “entradas”<sup>39</sup> de arsénico en el balance, las barras naranjas representan las “salidas”, por su parte, la “variación flujo intermedio” representa el cambio interanual de las existencias de arsénico en los flujos intermedios. Cabe destacar, que la variación interanual de las existencias impacta al balance de masa según lo descrito en la Ecuación 4, descrita en la Sección 3.1.1.



**Figura 3-21 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Potrerillos 2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos mensuales

En la Figura 3-21 se puede ver que en la fundición Potrerillos, el año 2020 posee dos entradas relevantes asociadas al concentrado externo y propio, donde domina el concentrado de terceros. Por el otro lado, las salidas tienen una distribución en más corrientes donde resaltan el Efluente, Polvo captado, Relave y Ánodos. En esta fundición la Variación de Flujo Intermedio posee un rol por su gran magnitud negativa.

Cabe mencionar, que la variación de flujo intermedio se calcula a través de la diferencia de la existencia final y la existencia inicial, las cuales reflejan los movimientos de los inventarios. En ese sentido, la mayor cantidad de variación la tiene el inventario de Circulante (ver Tabla 3-12).

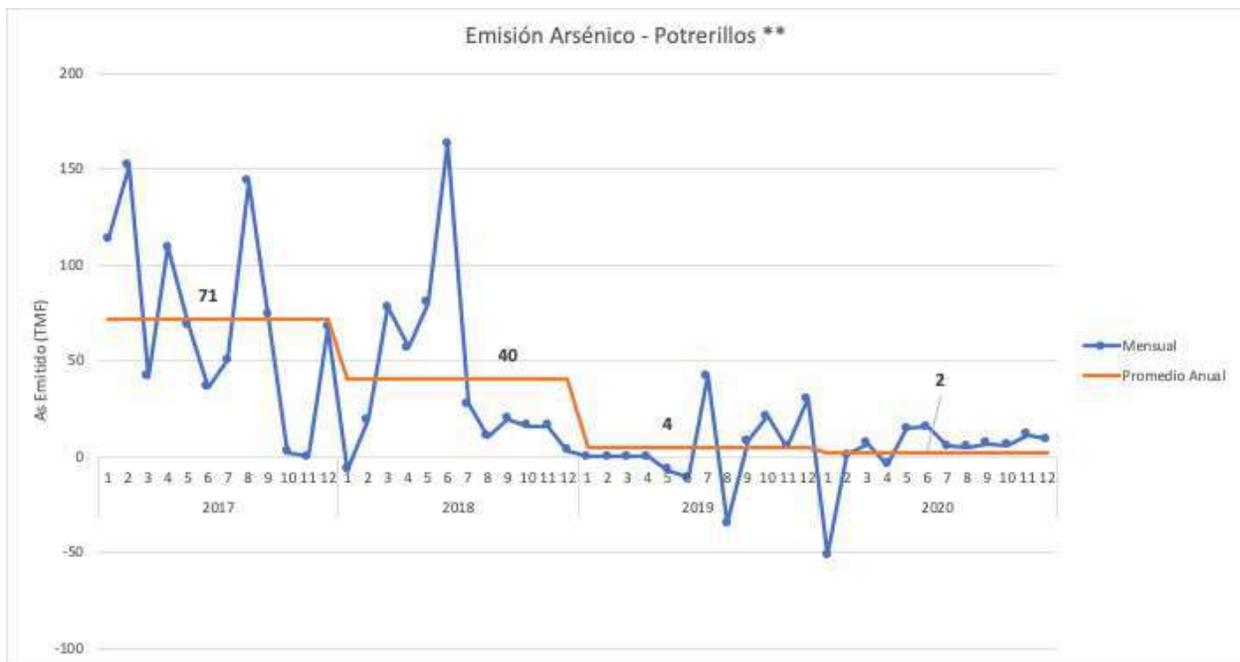
<sup>39</sup> Ver Ecuación 4 donde se explica la relación entre las entradas, salidas, flujos intermedios y emisiones.

**Tabla 3-12 Variación de flujos de inventario, Potrerillos 2020**

Flujo de Inventario Anual - Potrerillos 2020	Inicial (TMF)	Final (TMF)	Variación As (TMF)
<b>CIRCULANTE</b>	8471,7	-8888,4	-416,8
<b>CONCENTRADO PLANTA DE FLOTACIÓN DE ESCORIAS</b>	356,1	-345,6	10,5
<b>CARGA FRÍA</b>	23,3	-27,0	-3,7
<b>CARGA LÍQUIDA</b>	138,5	-136,9	1,6
<b>TOTAL</b>			<b>-408,4</b>

Fuente: Elaboración propia en base a planillas de reportes técnicos

En la Figura 3-22 se presentan los valores de emisiones mensuales de arsénico para el periodo 2017-2020. Se selecciona este periodo por representar el periodo en que se cuenta con mayores detalles de la estimación del balance de masa en las diferentes fundiciones, facilitando la comparación entre ellas.


**Figura 3-22 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

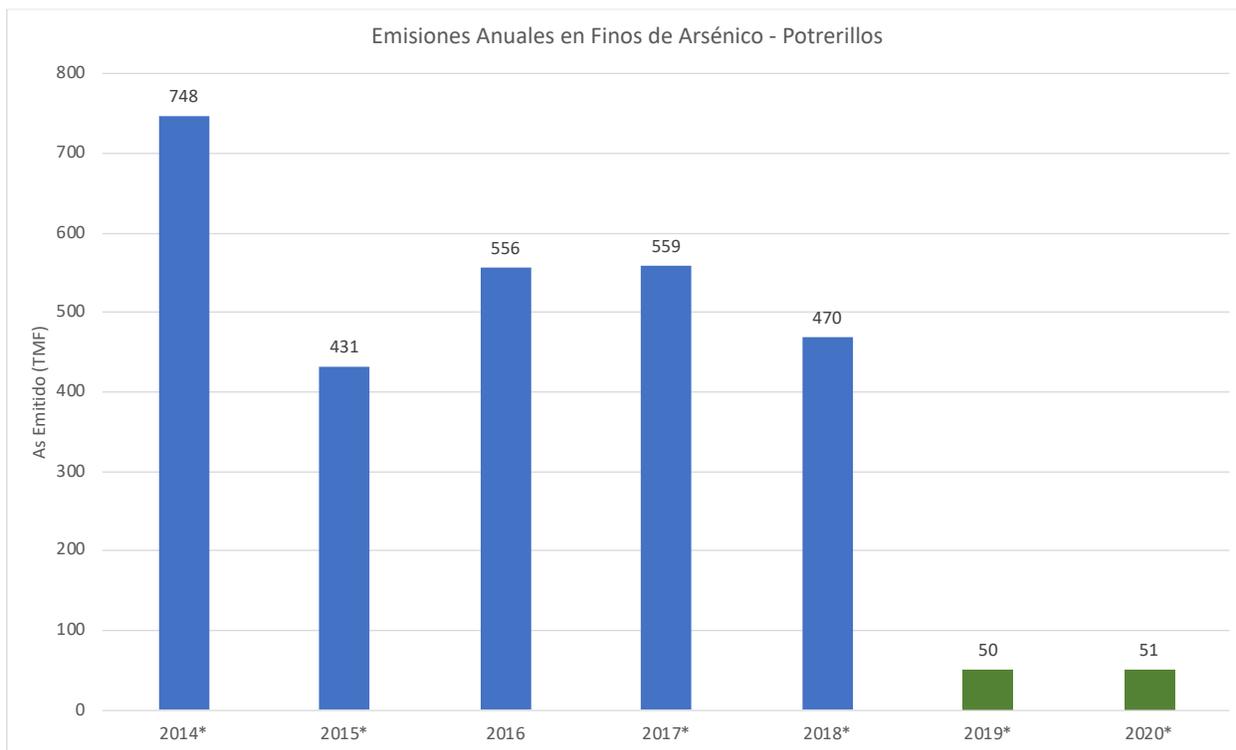
Se observa una variación intermensual relevante, con emisiones de arsénico mensuales que van desde valores cercanos a -50 [TMF/mes] hasta 150 [TMF/mes]. A nivel anual se observa una operación relativamente estable, recién desde el año 2019, observándose que las emisiones promedio se han estabilizado entre 2 y 4 [TMF/mes]. Estos valores son significativamente menores a las emisiones observadas en el año 2017 (71 TMF) y 2018 (40 TMF).

En la Figura 3-23 se pueden observar las emisiones anuales de la fundición Potrerillos. Cabe señalar que existe una diferencia relevante al hacer la comparación con las emisiones mensuales, pues de acuerdo a la metodología de balance de emisión, a diferencia de las emisiones

mensuales, las emisiones anuales deben considerar la reducción por el arsénico contenido en el material de limpieza.

Vale la pena resaltar que, los años 2019 y 2020, según la información de los reportes publicados, se cumple con los límites de emisión establecidos en el artículo 3° de la norma de emisión (DS 28 MMA, 2013b), donde para la fundición Potrerillos se establece un límite de 157 [ton/año] de emisión. No obstante, es relevante destacar que esto considera la suma aritmética que incluye algunos meses con valores negativos, por ejemplo, para el año 2020 de no considerarse estos meses la estimación de emisiones alcanza las 107 ton/año, valor que tampoco excede el límite de emisión.

Aun así, es relevante mencionar la detención de la fundición que se efectuó desde el 11/Diciembre del año 2018, con el fin de iniciar una serie de mejoras asociadas al Proyecto de Mejoramiento Integral de la Captación y Procesamiento de Gases, además de mantenciones. Dentro de estas acciones, se sustituyó la planta de ácido con tecnología de doble contacto.



\* años con al menos un valor mensual reportado negativo

**Figura 3-23 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Potrerillos, 2014-2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Ahora bien, respecto a la información disponible para años previos a la aplicación del protocolo, se presentan las emisiones anuales reportadas por la fundición para el periodo de 2014-2020. En los valores reportados, se encuentran algunas particularidades, tal como meses con emisiones

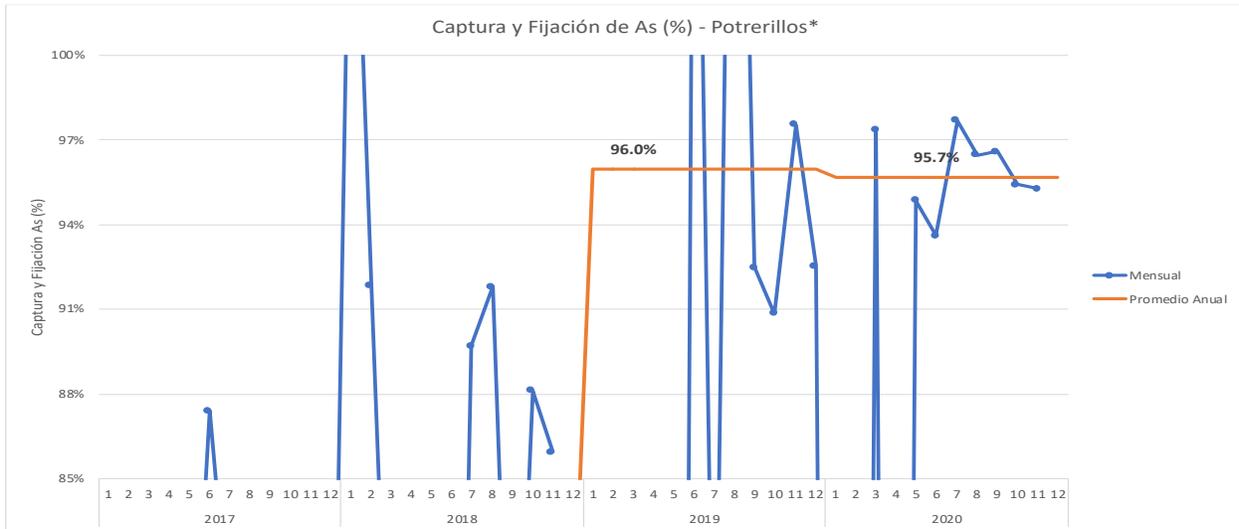
negativas y/o emisiones nulas. En efecto, el año 2014, y en el periodo 2018-2020, hay a lo menos un mes con valor de balance de emisión negativo. También, cabe destacar que los meses de julio y agosto del periodo 2015 informan valores nulos de finos de arsénico.

De forma complementaria, en la Figura 3-7 se presentan los valores reportados del porcentaje de captura y fijación de arsénico en la fundición Potrerillos. La estimación considera el ratio entre la masa de arsénico que ingresa a la fundición y la masa que resulta del balance de masa como emisión. Al respecto la norma en su Artículo 3° establece que la captura y fijación de arsénico debe ser al menos un 95%. Se observa que de acuerdo a lo reportado se estaría cumpliendo con el requisito de la norma.

De modo complementario, se incluye la Figura 3-25, donde se pueden observar los promedios anuales acumulados en el periodo reportado, a través del ajuste del eje. En este, se visualiza la transición al cumplimiento de la norma, donde se nota una alza significativa en la captura y fijación de arsénico, registrándose porcentajes de captura y fijación de 69,4% en el año 2017 y de 78,7% en el año 2018, luego con la entrada en vigencia de la norma de emisión para la fundición potrerillos el 12 de diciembre de 2018, es posible observar un aumento en el indicador del porcentaje de captura y fijación de As registrándose para los años 2019 y 2020 valor de 96% y 97,7% respectivamente. Es importante señalar, que los puntos que escapan en las ordenadas, corresponden a valores nulos<sup>40</sup> debido a detención de la actividades de la fundición (de enero/2019 a mayo/2019), así como a valores superiores a 100% los cuales no tienen sentido físico y se explican por las emisiones negativas obtenidas mediante el balance de masa de As. Así, tal como se puede apreciar en la Figura 3-22 y la Figura 3-25, se escrutan porcentajes de captura de bajo nivel en febrero/2017 y agosto/2017 (51,8 y 51,5%) y junio/2018 (54,3%). Es importante señalar que para el año 2019 hubo un proceso de rectificación, por lo cual los valores reportados corresponden a aquellos, incluyendo lo considerado en la RE SMA 1915/2020.

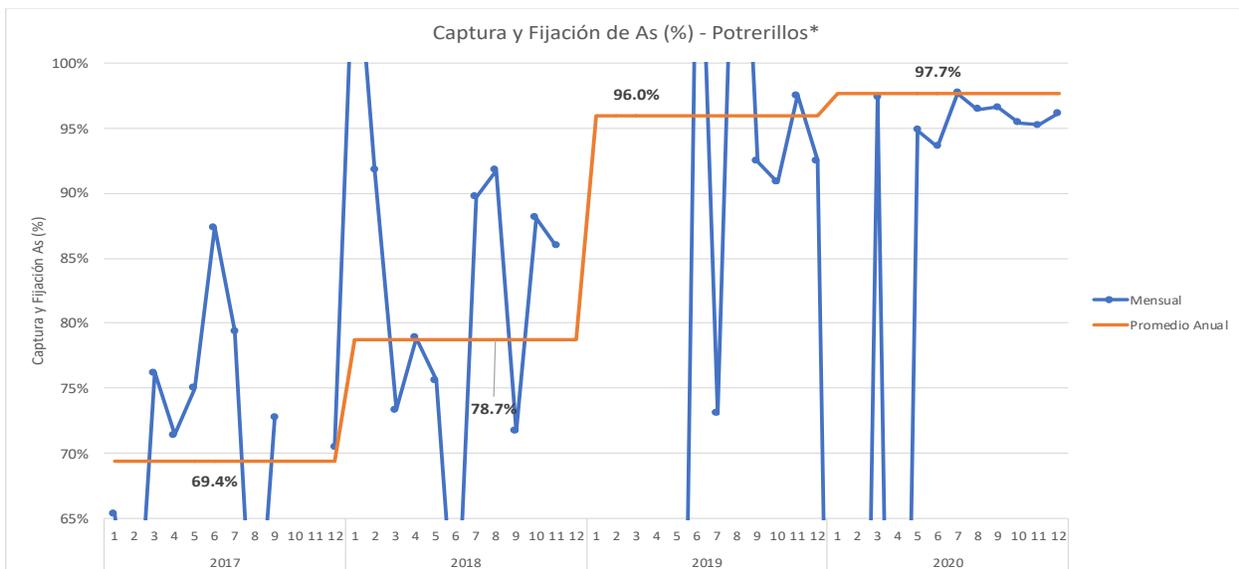
---

<sup>40</sup> Los valores de captura en el periodo de enero-abril/2019 se reportan como 0%, tal como se indica en DFZ-2020-3220-III-NE.



**Figura 3-24 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Potrerillos, 2017-2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos



**Figura 3-25 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Potrerillos, 2017-2020 (escala entre 65% y 100%)**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Por último, la Figura 3-26 presenta los valores del indicador de intensidad de emisión de arsénico, el cual refleja la proporción de la estimación de emisiones de arsénico resultante del balance de masa respecto de la producción de finos de cobre. Este indicador, complementario a los anteriormente presentados, permite observar un nivel de eficiencia en términos de cuanto emisión se alcanza por unidad producida. A diferencia del indicador de emisiones totales, este indicador controla por el efecto de la producción, funcionando como una métrica que permite

resumir el desempeño ambiental en término de emisiones por nivel de actividad. Además, el objetivo de este es analizar el comportamiento del desempeño de la fuente emisora, asociado a cambios tecnológicos implementados para el cumplimiento de la norma.

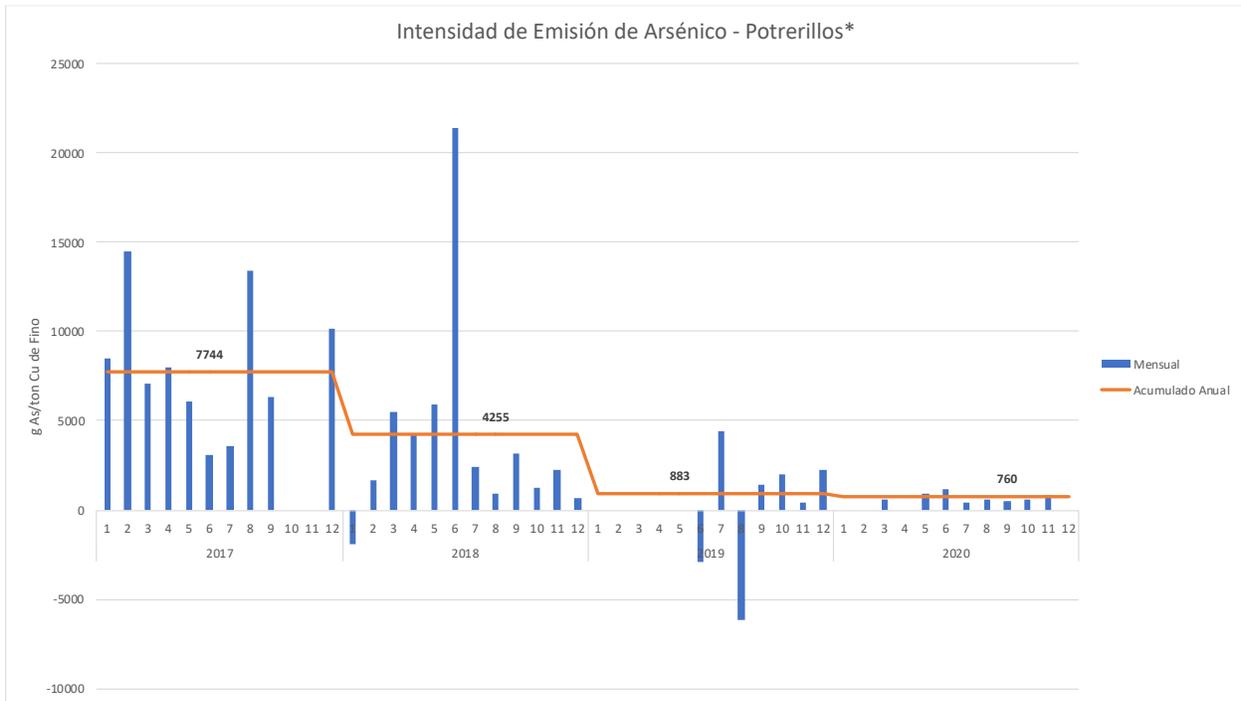
En el mismo sentido, se pueden observar altos valores de promedios anuales acumulados para los años 2017 y 2018, donde se superan los 10000 g de As/TMF de Cu fino en febrero, agosto y diciembre de 2017, así como también en junio/2018. Además, se notan valores negativos de este indicador para marzo/2018, junio/2019 y agosto/2019, los cuales tienen relación a emisiones negativas y, por tanto, capturas y fijación de arsénico sobre el 100%. Es destacable que en comparación con el periodo de entrada en vigencia de la norma DS 28 SMA/2013, específicamente para los años 2019 y 2020, el indicador de intensidad disminuye considerablemente, registrándose en dichos años valores mensuales menores a 5000 g de As/TMF y promedios anuales de 883 g de As/TMF y 760 g de As/TMS, por ejemplo, en el año 2019 la emisión de arsénico por TMF de cobre fino corresponde solo a un 11,4% respecto al indicador de intensidad del año 2017. Cabe mencionar que, aun así, se encuentran meses reportados sin validez, dadas las emisiones negativas de arsénico obtenidas a partir del balance de masa.

Cabe mencionar que mediante la auditoría externa correspondiente al año 2020 que se exige efectuar anualmente, se levantaron observaciones que permitieron detectar causas que originan errores en los resultados de los balances de masa y elaboró una serie de recomendaciones para solucionar los problemas en la estimación del balance de masa. En este sentido, no se realizan modificaciones a este indicador de desempeño ambiental con la rectificación mencionada anteriormente<sup>41</sup>, esto por las emisiones negativas correspondientes<sup>42</sup>. Eso sí, se incluye la metodología para la reconciliación del balance de Cobre para los flujos de entrada y salida, así como también inventarios y sub-inventarios, mediante la aplicación de factores de tolerancia, según confiabilidad de la fuente que los origina.

---

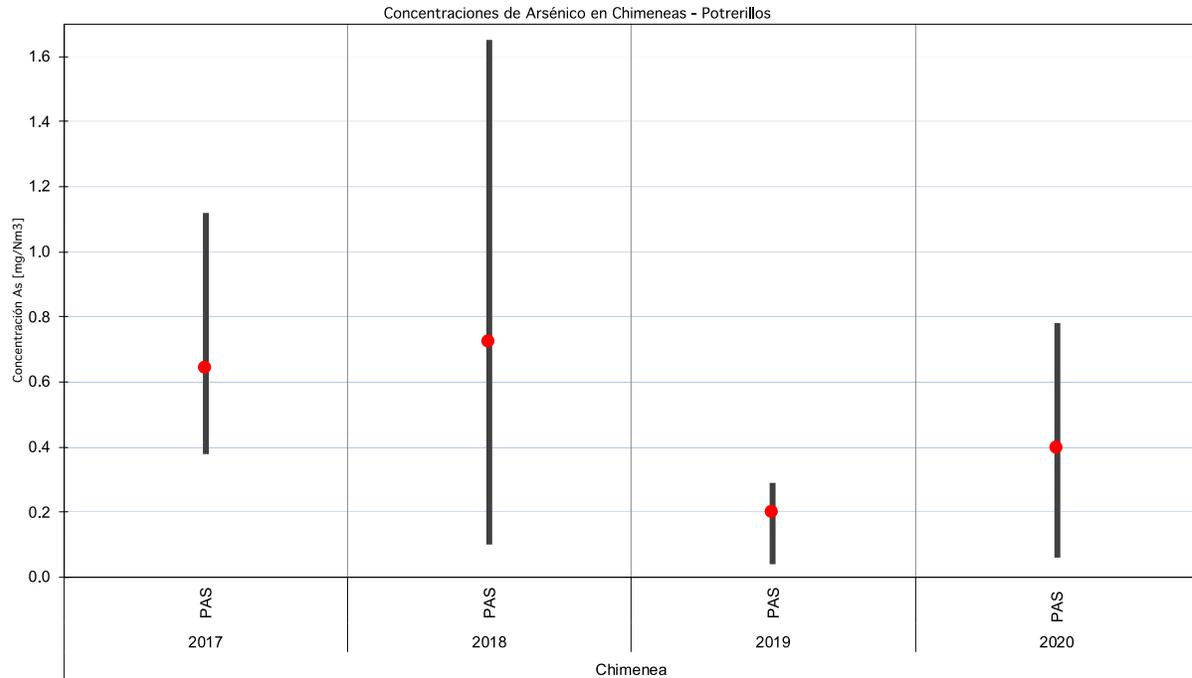
<sup>41</sup> IEC-17-2021 (Servicios Mineros SpA). No se encuentran modificaciones de indicadores de desempeño ambiental.

<sup>42</sup> Informe mensual enero/2020, DS28 SMA/2013, Potrerillos: "El indicador [g de As/ ton de Cu fino] no se calculó debido a la emisión negativa de As durante este periodo." (Pg [4])



**Figura 3-26 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Potrerillos, periodo 2017-2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

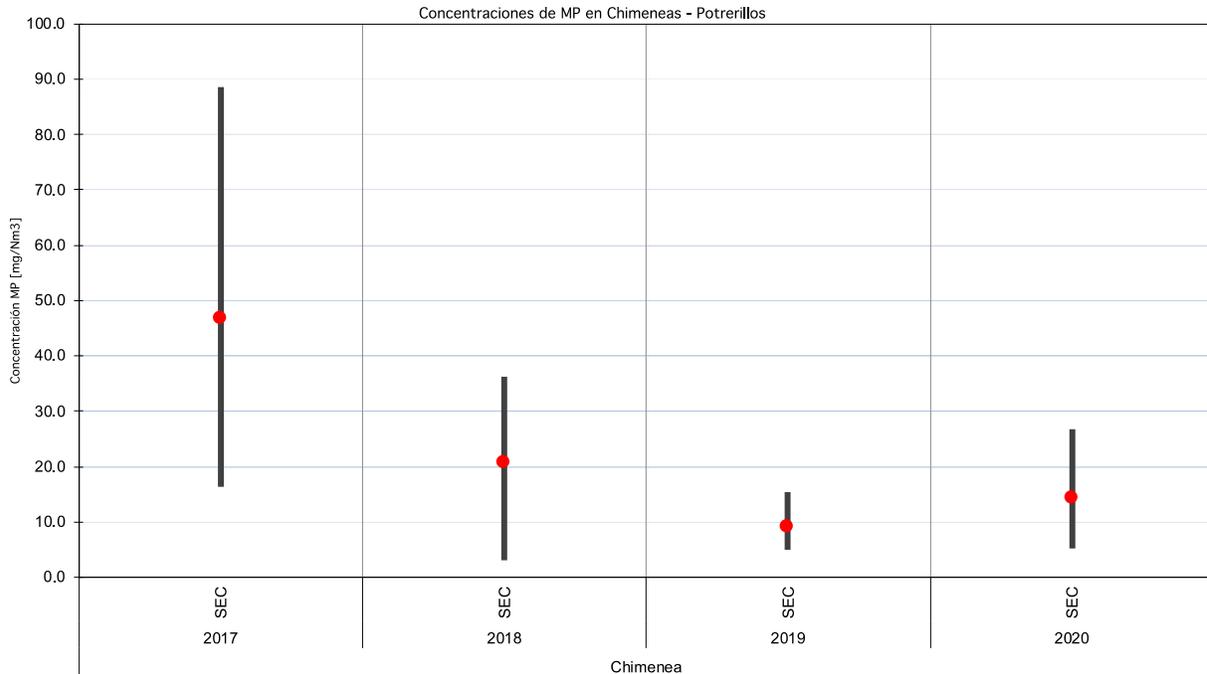


Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

**Figura 3-27 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Potrerillos 2017-2020.**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-27 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de arsénico medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Potrerillos presenta datos para la chimenea asociada a la planta de ácido sulfúrico en el periodo 2017-2020. Se puede observar que no se ha superado el límite de emisión de 1 [mg/Nm3] de As en ni una de las mediciones efectuadas en el periodo de entrada en vigencia. Además, se nota un comportamiento a la baja en el periodo 2019-2020, en comparación a años anteriores.



Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

**Figura 3-28 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Potrerillos 2017-2020.**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

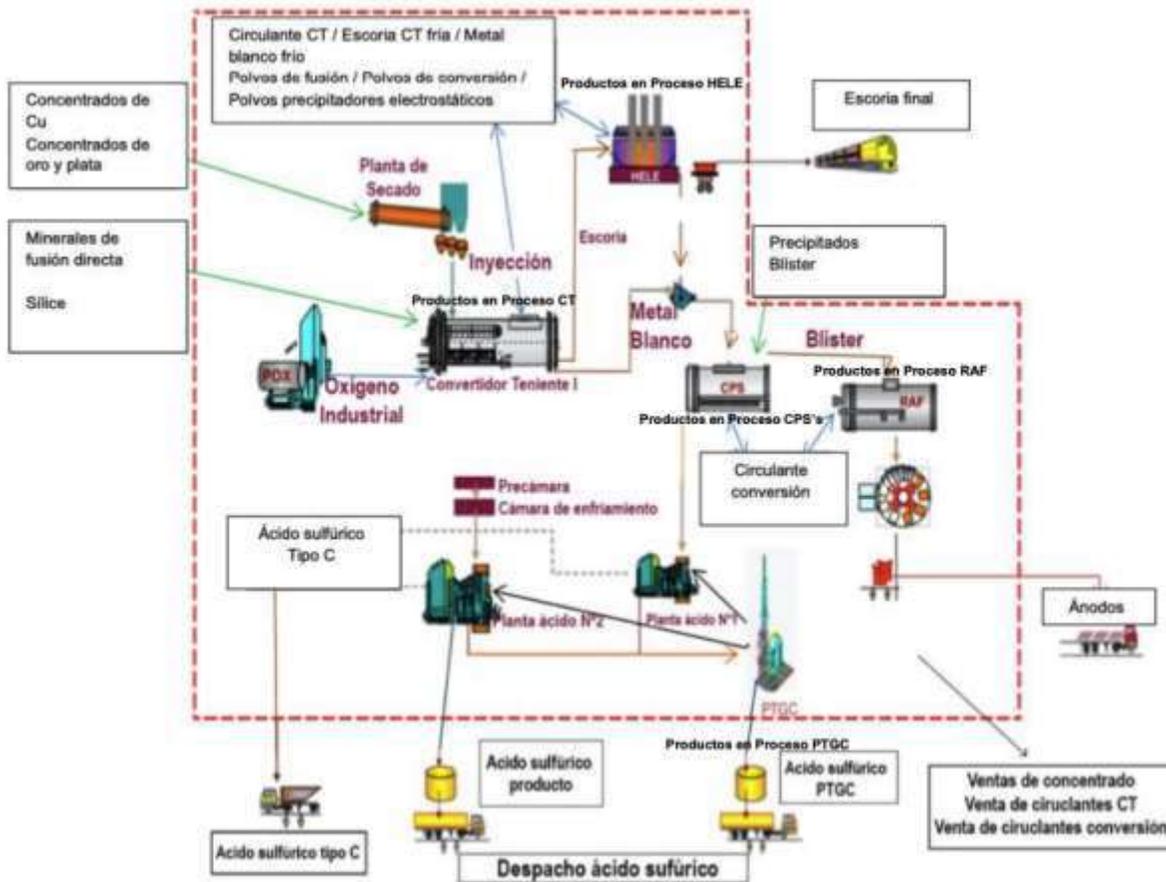
En la Figura 3-28 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de material particulado medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Potrerillos presenta datos una única chimenea asociada al secador, para el periodo 2017-2020. Se puede observar que hay un cumplimiento en los años 2019 y 2020, con un máximo inferior a 30 [mg/Nm<sup>3</sup>] de concentración de material particulado. En el periodo de 2017-2018, las medias calculadas se encuentran bajo los 50 [mg/Nm<sup>3</sup>], aunque con máximos superiores a este umbral para el año 2017.

### 3.3.4 Fundición Hernán Videla Lira

En la presente Sección se presentan los resultados del balance de masa de arsénico, reportados por la fundición Hernán Videla Lira. Cabe destacar que tal como se desarrolló en la Sección 3.1.3, las emisiones correspondientes a la Fundición HVL previo a septiembre 2020 no fueron obtenidas bajo la metodología de balances de masa aprobada mediante la Res. Ex. 1479/2021 de la SMA, por ende, dichas emisiones solo deben ser consideradas referenciales. De esta forma el análisis

presentado a continuación debe ser considerado como referencial, y se destaca que no coincide con la estimación final presentada en la Sección 4.2, la cual se estima a partir de la intensidad de emisiones (g As/ton Cu fino) reportadas en el periodo octubre 2020 a septiembre 2021.

En la Figura 3-29 se presenta el diagrama de la fundición HVL. Se observa que se identifican tres puntos de entrada de corrientes, a la planta de secado (concentrado de Cu, y concentrado de Au y Ag), directo al convertidor teniente (minerales de fusión directa y sílice) y a los CPS (precipitados blíster). Respecto a las salidas, se observa que existen diferentes corrientes asociadas a los productos, y coproductos de la operación de la fundición HVL.



**Figura 3-29 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Hernán Videla Lira**

Fuente: Reportes técnicos del año 2020, letra m)

La fundición Hernán Videla Lira cuenta con varios equipos y unidades relevantes para los puntos de muestreo y para la elaboración del balance de masa. La información de cantidad de equipos y su capacidad se encuentra en la Tabla 3-13. Se observa que la fundición sólo cuenta con dos CPS a diferencia del resto de las fundiciones con mayor capacidad productiva.

**Tabla 3-13 Equipos e instalaciones principales de fundición Hernán Videla Lira**

Equipo/instalación	Cantidad	Capacidad
Horno de Secado de concentrado	1	60 [t/h]
Convertidor Teniente	1	1000 [t/día]
CPS N°2	2	10 [ciclos/día]
CPS N°3		
Horno de Refino fuego	1	200 [t/ciclo]
Ruedas Moldeo	1	40 [t/h]
Horno Eléctrico de Limpieza de Escoria	1	700 [t/día]
Planta Ácido N°1	2	50.000 [Nm3/h]
Planta Ácido N°2		80.000 [Nm3/h]
Planta de tratamiento gases de cola (PTGC)	1	130.000 [Nm3/h]

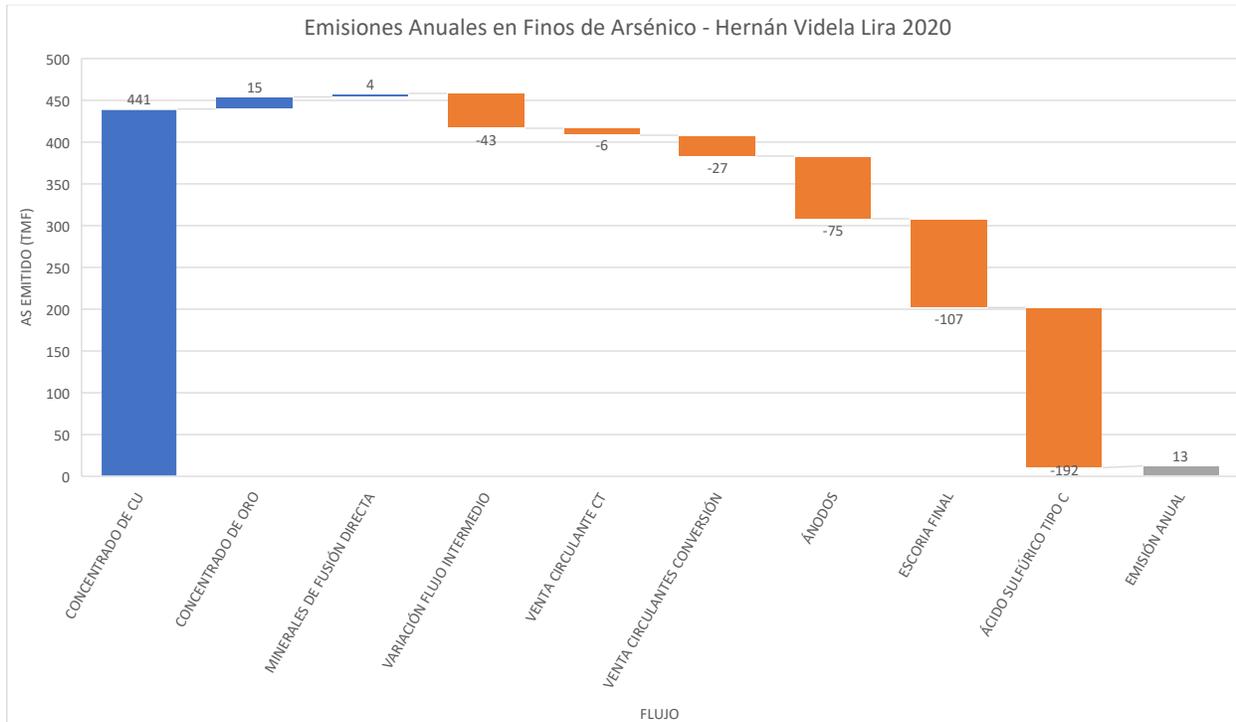
Fuente: Auditoría a Metodología de Balance de Arsénico 2021 (Res. Ex 1479/2021 SMA)

A nivel operacional, la Figura 3-30 representa el balance de emisiones de arsénico del año 2020. En ella las barras de color azul representan las “entradas”<sup>43</sup> de arsénico en el balance, las barras naranjas representan las “salidas”, por su parte, la “variación flujo intermedio” representa el cambio interanual de las existencias de arsénico en los flujos intermedios. Cabe destacar, que la variación interanual de las existencias impacta al balance de masa según lo descrito en la Ecuación 4, descrita en la Sección 3.1.1.

Es relevante en el siguiente análisis considerar que los números presentados se basan en los reportes de la fundición a la SMA. Estos números fueron cuestionados por su metodología de cálculo e implementación de la misma (ver Sección 4.1.3). De acuerdo a los antecedentes levantados es posible señalar que sólo a partir de septiembre 2020 el titular ENAMI señala que comienza a aplicar la metodología de balances de masa aprobada bajo la Resolución Exenta N°1479/2021 SMA, por ende, el valor de emisión anual declarado por el Titular para el año 2020 no se considera válido. A continuación, se presentan los valores reportados sólo a modo de referencia.

---

<sup>43</sup> Ver Ecuación 4 donde se explica la relación entre las entradas, salidas, flujos intermedios y emisiones.



**Figura 3-30 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Hernán Videla Lira 2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes mensuales

En la Figura 3-30 se puede ver que las entradas más relevantes son el concentrado de cobre, estos corresponden a varios proveedores, tales como Codelco, Matta, Carola, Kozan, entre otros. La fundición HVL recibe cotidianamente los concentrados señalados, cada uno con distintos valores de cantidad y de contenido químico. La suma de los concentrados de cobre como flujo representa más del 95% de las entradas en el límite del sistema. Por el otro lado, las salidas tienen una distribución entre varias corrientes. Principalmente, el Ácido Sulfúrico C, que representa el 58% de ellas. Luego, la Escoria Final y los Ánodos producidos, tienen proporciones de 26% y 18% de la corriente de salida, respectivamente. Finalmente, en este mismo sentido, las ventas de Circulante de Conversión y Circulante CT, comercializado en eventualidades a otras fundiciones y/o plantas de tratamiento, son contabilizados correspondientemente con 6,4 y 26 TMF de arsénico. Como resultado del balance, el año 2020 las emisiones estimadas fueron de 12,83 TMF, el cual no considera los meses con resultados negativos.

Cabe mencionar, que la variación de flujo intermedio se calcula a través de la diferencia entre la existencia final y la existencia inicial, las cuales reflejan los movimientos de los inventarios. En ese sentido, la mayor cantidad de variación la tiene el inventario de Escoria CT Fría, el cual forma parte del 90% del total de la variación de inventario (ver Tabla 3-14). Este cálculo se realiza con las planillas que cuentan con el detalle de las corrientes de inventario, ya que la rectificación solo incluye los valores final e inicial de la existencia.

**Tabla 3-14 Variación de flujos de inventario, HVL 2020**

Flujo de Inventario Anual	Inicial (TMF)	Final (TMF)	Variación As (TMF)
ESCORIA CT FRÍA	514	554	39,3
CIRCULANTE CT	122	125	2,5
POLVOS DE FUSIÓN	91	94	2,4
POLVOS PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS	32	33	1,3
PRODUCTOS EN PROCESO	378	379	1,0
CIRCULANTE CONVERSIÓN	60	60	0,3
METAL BLANCO FRÍO	24	23	-1,1
POLVOS DE CONVERSIÓN	20	17	-2,5
<b>TOTAL</b>			<b>43,27</b>

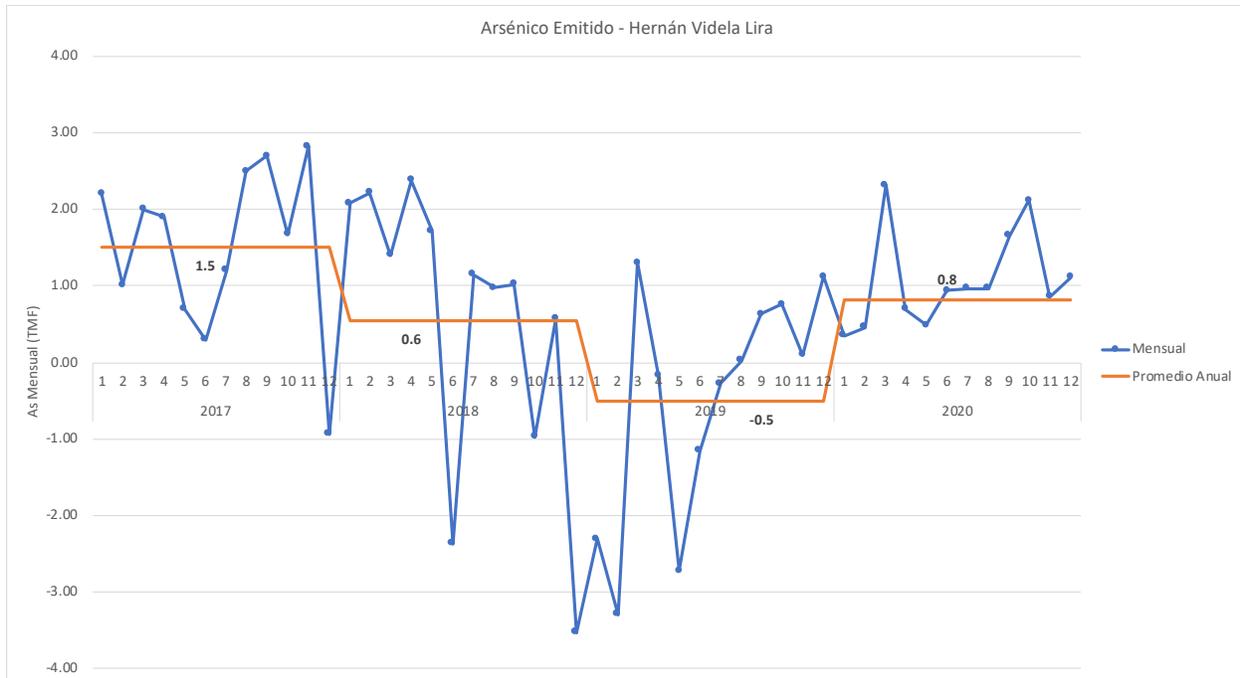
Nota: Los valores presentados en esta tabla no son válidos para evaluar cumplimiento normativo. Para efectos de este estudio, han tomado un carácter referencial.

Fuente: Elaboración propia en base a balances de masa rectificadas reportados para el año 2020

En la Figura 3-31 se presentan los valores de emisión mensual de arsénico, así como su comparación con el promedio mensual de cada año, para el período 2017 a 2020. Se selecciona este periodo por representar el periodo en que se cuenta con mayores detalles de la estimación del balance de masa en las diferentes fundiciones, facilitando la comparación entre ellas.

Se observa gran variación mensual que no logra estabilizarse a nivel anual, incluyendo la obtención de valores negativos reportados. En particular, en el año 2019 la Fundición HVL reportó un valor de balance de emisión anual de As correspondiente a -6 ton/año, dicho resultado es producto de una inadecuada formulación y aplicación de la metodología de balances de masas en la fundición (ver figura 4-25), donde se detectaron múltiples problemas en el muestreo, análisis químico, falta de información respecto la masa de la escoria de descarte, variación entre el inventario final e inventario inicial e inconsistencias en la declaración de flujos de entrada, salida e intermedios, por ende, tuvo como consecuencia la invalidez de los resultados obtenidos a través de la aplicación de la metodología de balances de masa, así como no permitir la evaluación de cumplimiento normativo de los límites máximo de emisión anual. Dado lo señalado anteriormente, la metodología de balances de masa de la fundición Hernán Videla Lira fue sometida a un proceso de revisión para su modificación y ajuste de las condiciones operacionales de la fundición (RE 1479 SMA/2021).

Sin perjuicio de lo anterior, se observa que desde septiembre/2020, se presentan valores de emisión de As similares a los observados durante el 2017 y primer semestre del 2018, siendo más altos que los valores del segundo semestre del 2018 y 2019, ya que dichos valores estuvieron sujetos a las falencias en la aplicación de la metodología de balances de masa.

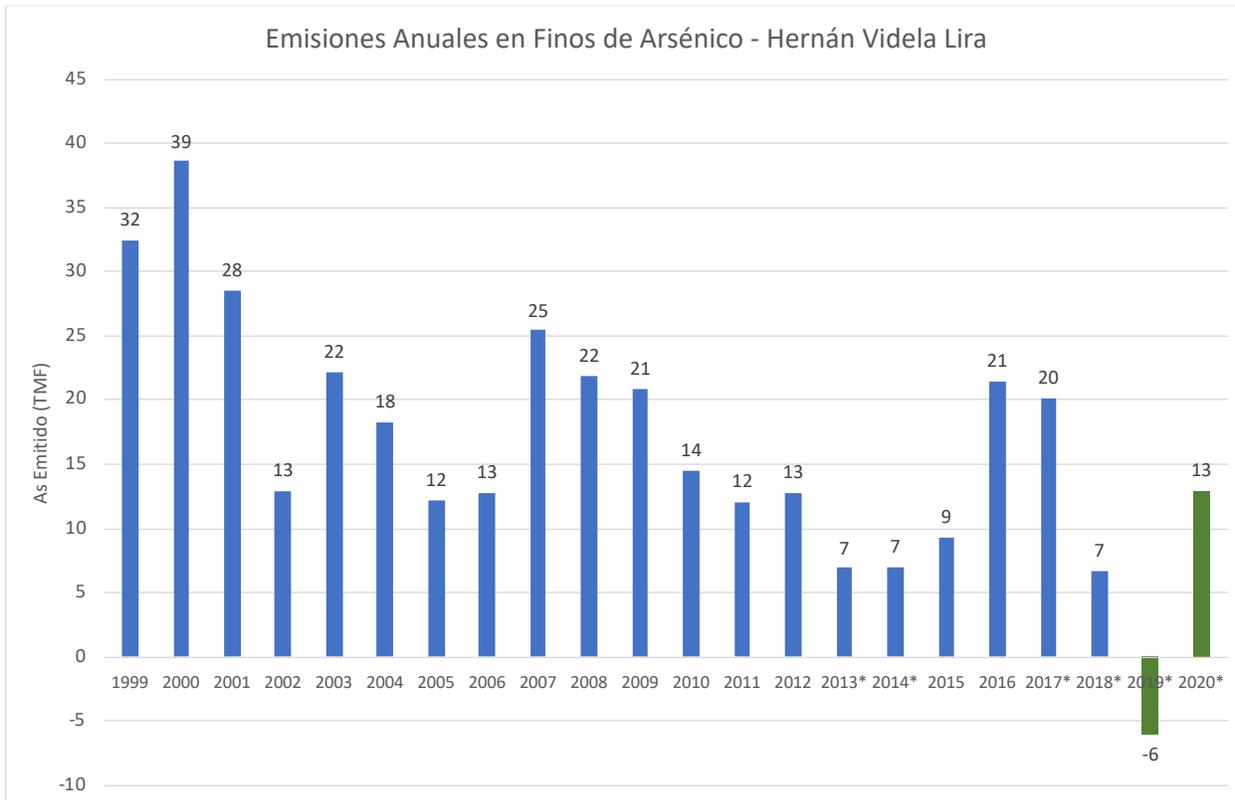


**Figura 3-31 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Lo anterior se sigue presentando en las emisiones anuales que se observan en la Figura 3-32. Cabe notar que existe una diferencia relevante al hacer la comparación con las emisiones mensuales, pues de acuerdo a la metodología de balance de emisión, a diferencia de las emisiones mensuales, las emisiones anuales deben considerar la reducción por el arsénico contenido en el material de limpieza. Esta diferencia, así como en el resto de las fundiciones, es atribuible al nivel de actividad mensual y las mantenciones programadas.

A partir de la Figura 3-32, es posible observar para el año 2020 que la emisión anual de As se encuentra bajo el límite de emisión establecido en el artículo 3° de la norma de emisión (D.S. 28 MMA, 2013b), donde para la fundición HVL de ENAMI se establece un límite de 17 ton/año de emisión. Sin embargo, la existencia de estimaciones anuales negativas (-6 ton/año) para el año 2019, genera dudas de la confiabilidad de las estimaciones, así como la obtención de resultados de balances con metodología aprobada sólo desde el mes de septiembre 2020, resulta en que estas estimaciones declaradas por el titular sólo tengan un carácter “referencial”.



\* años con al menos un valor mensual reportado negativo

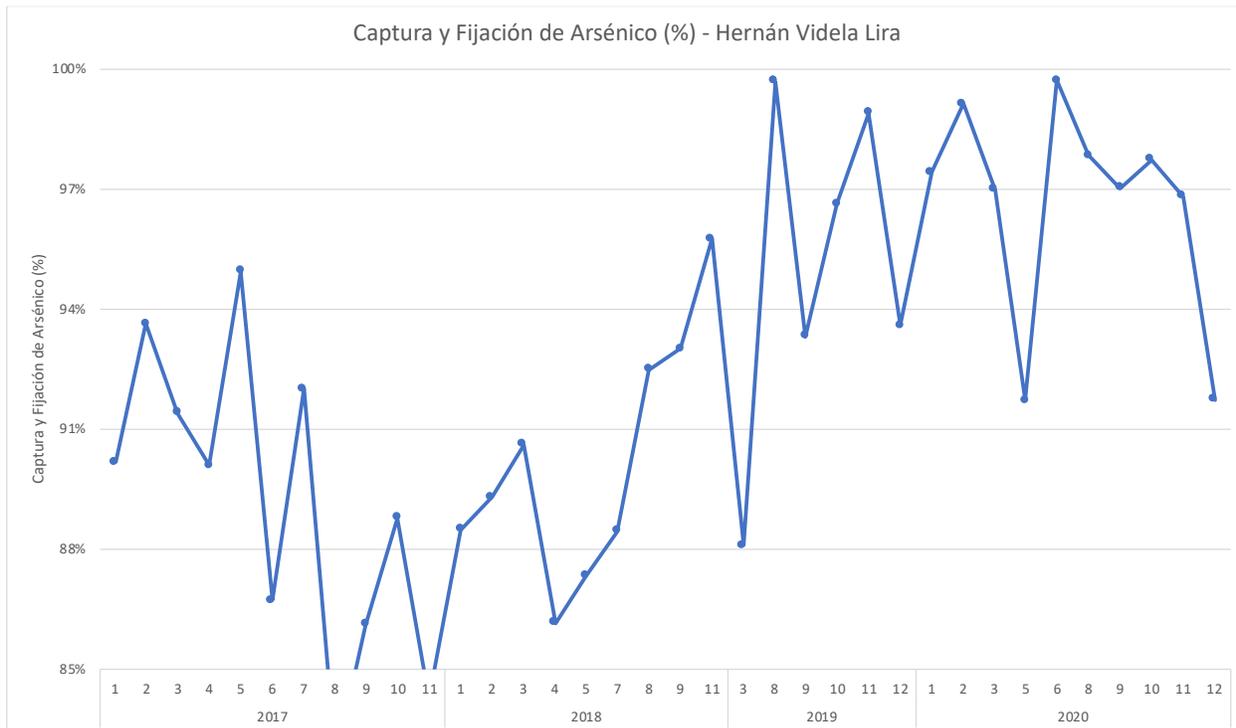
**Figura 3-32 Emisiones anuales [TMF] de arsénico Hernán Videla Lira, 1999-2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Ahora bien, respecto a la información disponible para años previos a la aplicación del protocolo, se presentan las emisiones anuales reportadas por la fundición para los periodos 1999-2013<sup>44</sup>, y luego para 2014-2020. Dada la amplia extensión del periodo, se encuentran algunas particularidades y diferencias en la forma de registro. En ese sentido, el periodo anterior al 2014 no presenta metodología ni informes asociados, aunque, tiene datos completos para todos los meses por año. También, se presentan emisiones negativas en al menos un mes para los periodos de 2013 y 2014, además de los años expuestos anteriormente, correspondientes al periodo 2017-2020.

De forma complementaria, en la Figura 3-33 se presentan los valores reportados de captura y fijación de arsénico en la fundición Hernán Videla Lira. La estimación considera el ratio entre la masa de arsénico que ingresa a la fundición y la masa que resulta del balance de masa como emisión. Al respecto la norma en su Artículo 3° establece que la captura y fijación de arsénico debe ser al menos un 95%. Sin perjuicio de lo anterior, dada la falta de confianza en los datos no se calcula un valor promedio de la tasa de captura y fijación.

<sup>44</sup> Publicados en el SNIFA (Resumen al 2014)



Nota: por la inconsistencia metodológica se excluyen de la gráfica aquellos meses con emisiones negativas, que resultaban en niveles de captura y fijación superior a 100%.

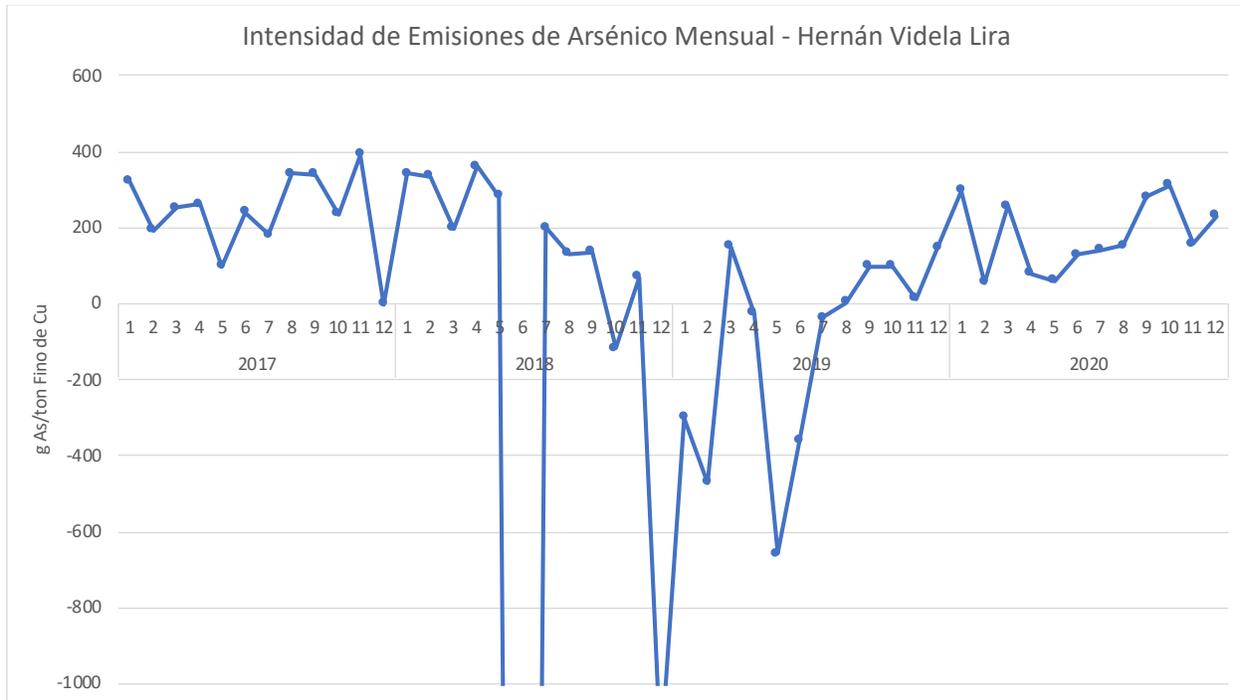
**Figura 3-33 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición HVL, 2017-2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Por último, la Figura 3-34 presenta los valores del indicador de intensidad de emisión de arsénico, el cual refleja la proporción de la estimación de emisiones de arsénico resultante del balance de masa respecto de la producción de finos de cobre. Este indicador, complementario a los anteriormente presentados, permite observar un nivel de eficiencia en términos de cuanto emisión se alcanza por unidad producida. A diferencia del indicador de emisiones totales, este indicador controla por el efecto de la producción, funcionando como una métrica que permite resumir el desempeño ambiental en término de emisiones por nivel de actividad. Además, dentro de los reportes técnicos publicados, se encuentra el indicador calculado, pero en vez de los finos de cobre, toneladas de CNU. Dado esto, es que los valores reportados no son comparables con otras fundiciones.

Es destacable que hasta mayo/2018 se observa cierta estabilidad en la intensidad de emisiones, a partir de entonces se observa una alta variabilidad del índice, con múltiples valores negativos que finalmente resultaron en la auditoría externa que realizó una serie de recomendaciones para solucionar los problemas en la estimación del balance de masa. Los promedios acumulados anuales son reportados en la comparación de fundiciones, donde el último año reportado presenta un promedio de 165 [g As/ton Cu fino] y tiene consistencia y sentido físico apropiado.

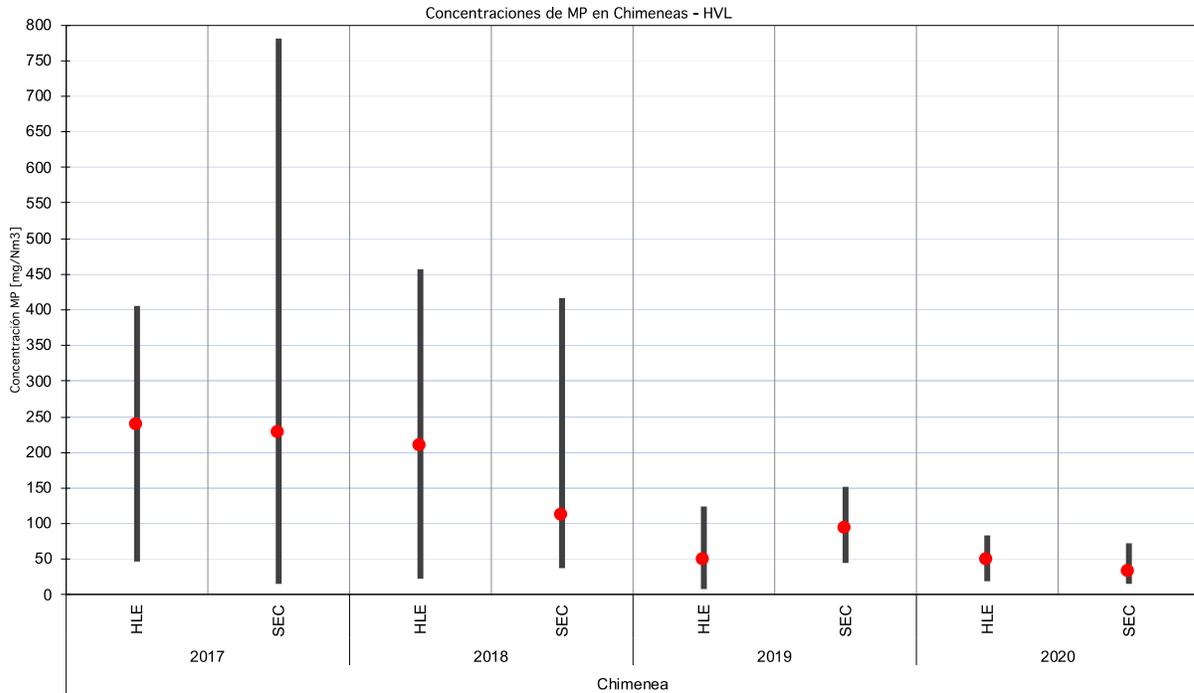
En particular, para los meses que reportan emisiones negativas, este indicador arroja valores de la misma naturaleza, los cuales son reportados y añadidos en la Figura 3-34.



Nota: Por cuestiones de visualización, se excluyen de la gráfica el valor -7,313 de junio/2018 y -1,186 correspondiente a diciembre/2018.

**Figura 3-34 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición HVL, periodo 2017-2019**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

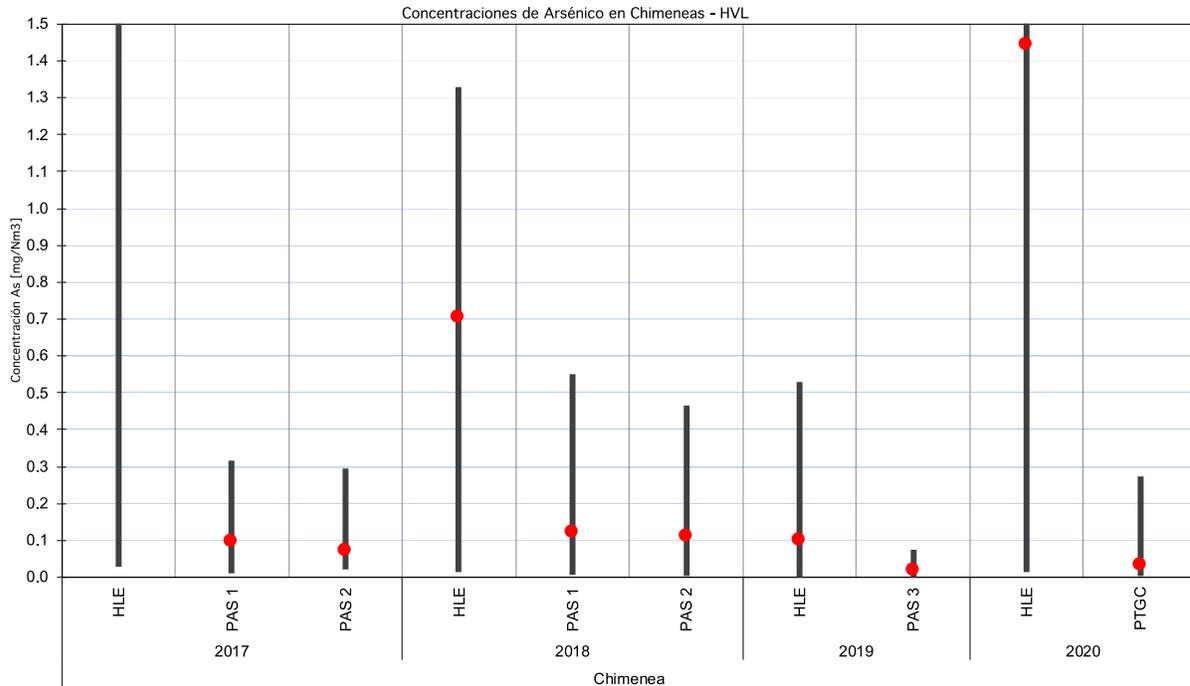


Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

**Figura 3-35 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Hernán Videla Lira 2017-2020.**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-35 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de material particulado medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, HVL presenta datos para las chimeneas del horno de limpieza de escoria y del proceso de secado en el periodo 2017-2020. En general, se puede observar un comportamiento de las medias a la baja en ambas chimeneas, pero con varios valores de medias y máximos superiores al umbral de 50 [mg/m<sup>3</sup>N]



Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

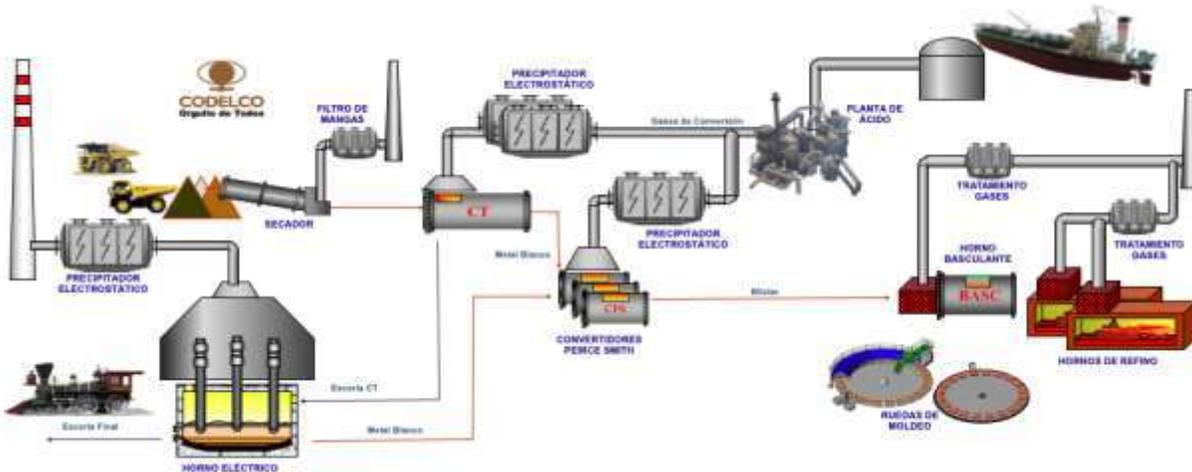
**Figura 3-36 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Hernán Videla Lira 2017-2020.**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-36 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de arsénico medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, HVL presenta datos para las chimeneas asociada al horno de limpieza de escoria y las plantas de ácido, además, desde el 2020 se presentan las mediciones de la PTGC. Para el año 2017, se halla un valor para el HLE altamente superior al resto, correspondiente a junio de aquel año, con 406.3 [mg/m<sup>3</sup>N], lo que resulta en una media de 41 [mg/m<sup>3</sup>N]. Luego, el año 2018 presenta valores máximos superiores al umbral de 1 [mg/m<sup>3</sup>N] en el HLE, al igual que en 2020, donde en este último se presentó un valor de 13,5 [mg/m<sup>3</sup>N] en el mes de marzo, el cual altera el promedio al alza, de no contabilizarse ese valor, la media tiene un valor de 0,35 [mg/m<sup>3</sup>N]. Las mediciones realizadas en las plantas de ácido se encuentran bajo la normativa y no superan el límite en concentraciones de As, al igual que las mediciones realizadas en las PTGC en el año 2020. Es relevante mencionar que las mediciones isocinéticas deben ser efectuadas en condiciones de operación normales, y que la metodología de muestreo cumpla con los requisitos establecidos.

### 3.3.5 Fundición Ventanas

En la Figura 3-37 se presenta el diagrama de la fundición de Ventanas. Se observa que la única entrada visible son los concentrados de material que alimentan al secador rotatorio.



**Figura 3-37 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Ventanas**

Fuente: Planilla reportes técnicos 2019, letra m) diagrama proceso

La fundición Ventanas cuenta con varios equipos y unidades relevantes para los puntos de muestreo y para elaborar el balance de masa. Los principales equipos e instalaciones se presentan en la Tabla 3-15.

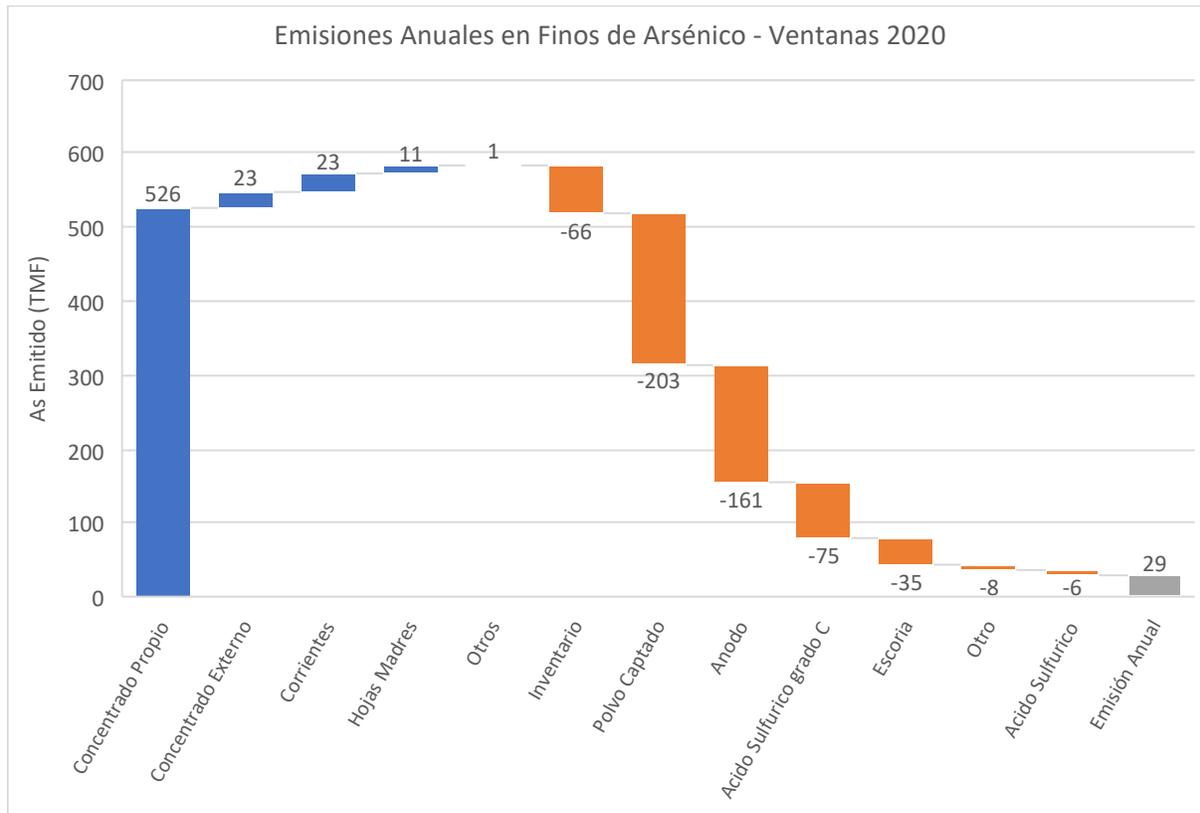
**Tabla 3-15 Equipos e instalaciones principales de fundición Ventanas**

Equipo/Instalación	Cantidad	Capacidad
Secador Rotatorio	1	60 [t/h]
Convertidor Teniente	1	300 [t]
CPS	3	60 [t/carga]
Horno Eléctrico Limpieza de Escoria	1	6 [MW]
Horno de Retención	1	120 [t]
Horno Basculante	1	200 [t]
Hornos de refinado	2	400 [t]
Ruedas moldeo ánodos	2	30 [t/h]
Planta de Ácido	1	140.000 [Nm <sup>3</sup> /h], 10,5% SO <sub>2</sub>
Planta Oxígeno	1	315 [t/día]

Fuente: Elaboración propia mediante metodología aprobada por Res. Ex. 1596/2018

SMA

A nivel operacional, la Figura 3-38 representa el balance de emisiones de arsénico del año 2020. En ella las barras de color azul representan las “entradas”<sup>45</sup> de arsénico en el balance, las barras naranjas representan las “salidas”, por su parte, la “variación flujo intermedio” representa el cambio interanual de las existencias de arsénico en los flujos intermedios. Cabe destacar, que la variación interanual de las existencias impacta al balance de masa según lo descrito en la Ecuación 4, descrita en la Sección 3.1.1.



**Figura 3-38 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Ventanas 2020**

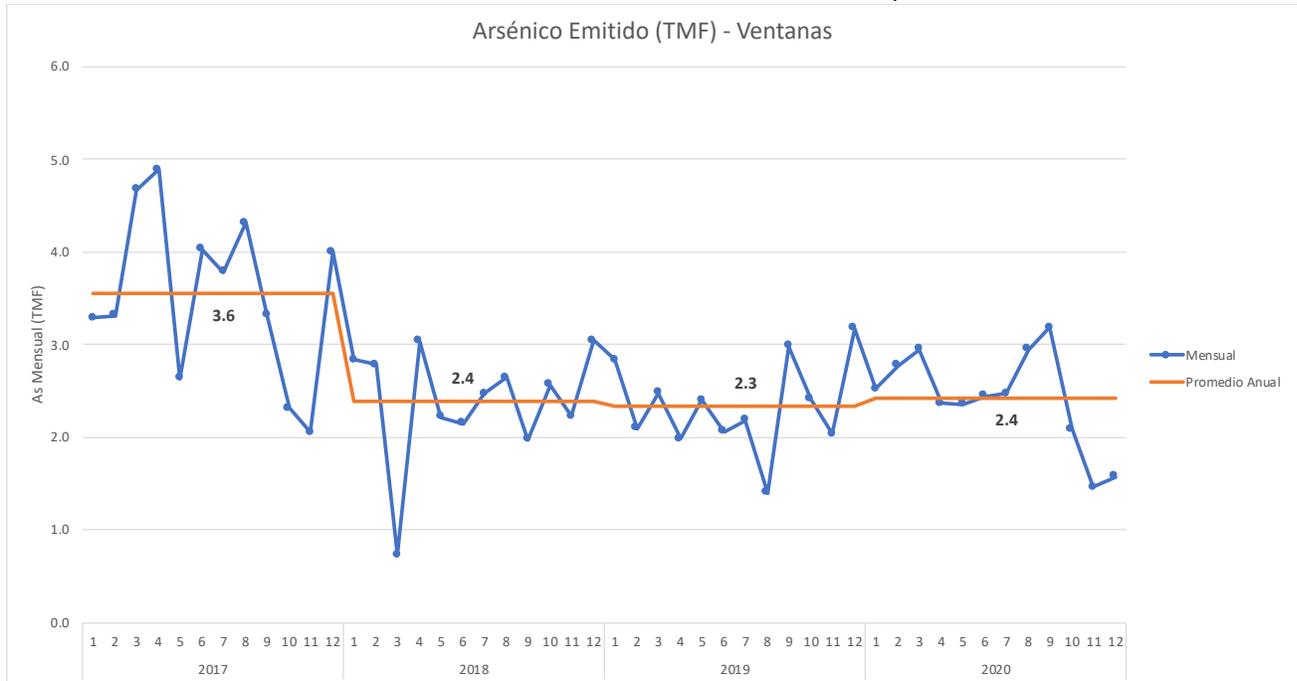
Fuente: Elaboración propia en base a reportes mensuales

En los reportes de balance de masa se puede ver que la principal entrada corresponde al concentrado propio (90% de las entradas), que junto al concentrado externo representan el 94% de las entradas. Por el otro lado, las salidas tienen una distribución entre varias corrientes. Principalmente, el polvo captado, los ánodos y el Ácido Sulfúrico C los cuales representan, respectivamente, un 35%, 28% y 13% de los contenidos de arsénico en los flujos de salida. Lo anterior resulta en una emisión estimada de arsénico de 26 TMF para el año correspondiente.

Cabe mencionar, que la variación de flujo intermedio se calcula a través de la diferencia de la existencia final y la existencia inicial, las cuales contienen los movimientos de los inventarios.

<sup>45</sup> Ver Ecuación 4 donde se explica la relación entre las entradas, salidas, flujos intermedios y emisiones.

En la Figura 3-39 se presentan los valores de emisión mensual de arsénico, así como su comparación con el promedio mensual de cada año, para el período 2017 a 2020. Se selecciona este periodo por representar el periodo en que se cuenta con mayores detalles de la estimación del balance de masa en las diferentes fundiciones, facilitando la comparación entre ellas.

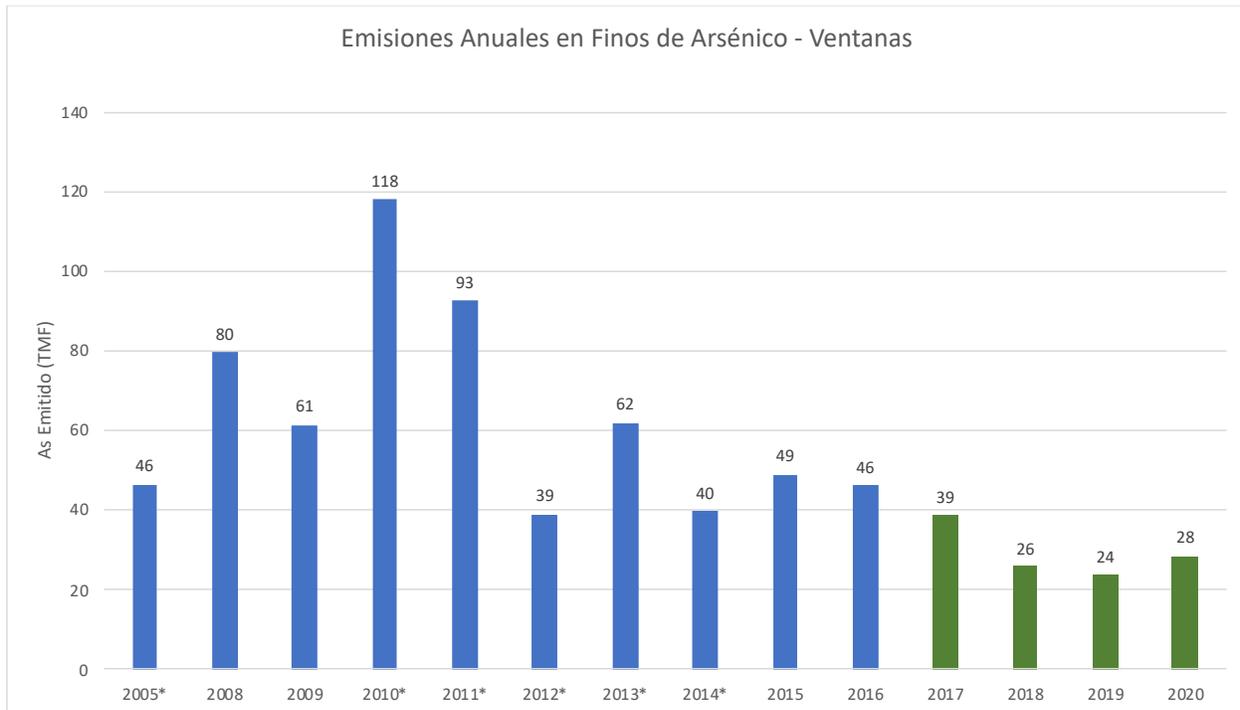


**Figura 3-39 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-40 se pueden observar las emisiones anuales de la fundición Ventanas. Cabe notar que existe una diferencia relevante al hacer la comparación con las emisiones mensuales, pues de acuerdo a la metodología de balance de emisión, a diferencia de las emisiones mensuales, las emisiones anuales deben considerar la reducción por el arsénico contenido en el material de limpieza.

Vale la pena resaltar que, desde el 2017 se cumple con los límites de emisión establecidos en el artículo 3° de la norma de emisión (MMA, 2013a), donde para la fundición Ventanas se establece un límite de 48 [ton/año] de emisión.

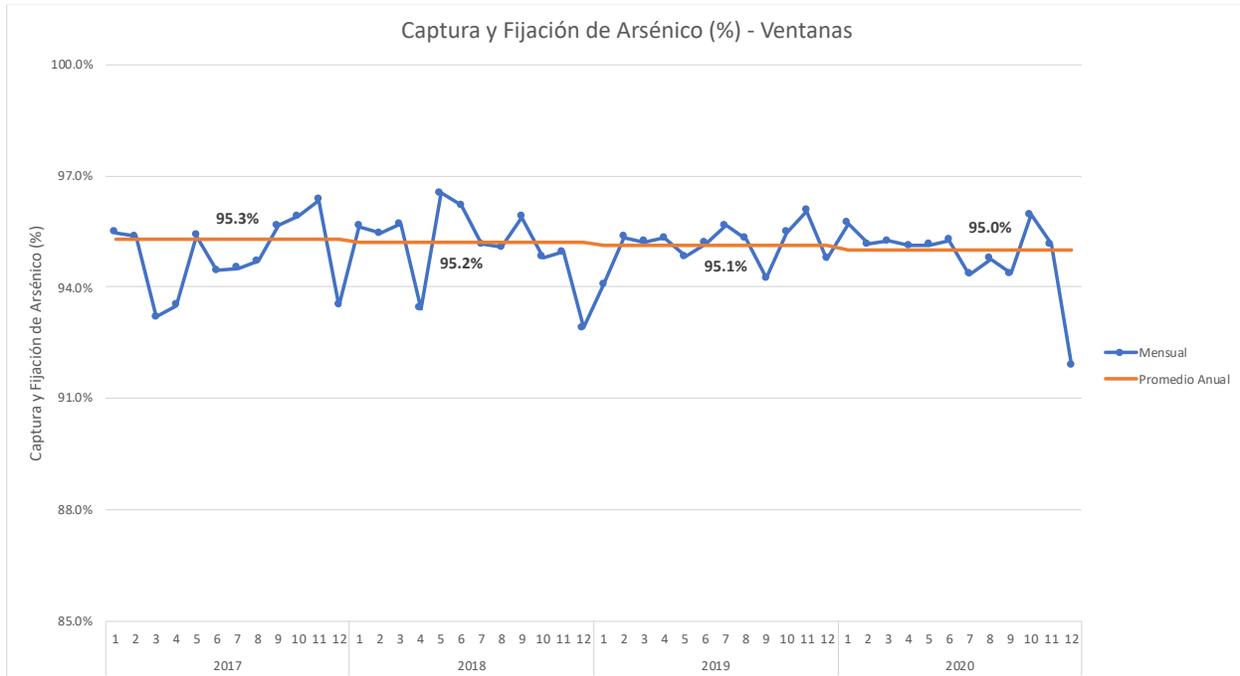


\* Años con información incompleta. Al menos un mes sin reporte

**Figura 3-40 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Ventanas, 2005-2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos y datos compilados por la SEREMI.

De forma complementaria, en la Figura 3-41 se presenta los valores reportados de captura y fijación de arsénico en la fundición Ventanas. La estimación considera el ratio entre la masa de arsénico que ingresa a la fundición y la masa que resulta del balance de masa como emisión. Al respecto, la norma en su Artículo 3° establece que la captura y fijación de arsénico debe ser al menos un 95%. Se observa que durante todo el horizonte 2017-2020 la fundición de Ventanas habría superado dicha tasa de captura, manteniendo una tasa de captura anual bastante estable entre 95,1-95,3%. Es destacable que también se observa bastante estabilidad en los valores mensuales, los cuales si bien no tienen requisitos legales es una métrica de desempeño interesante de seguir.

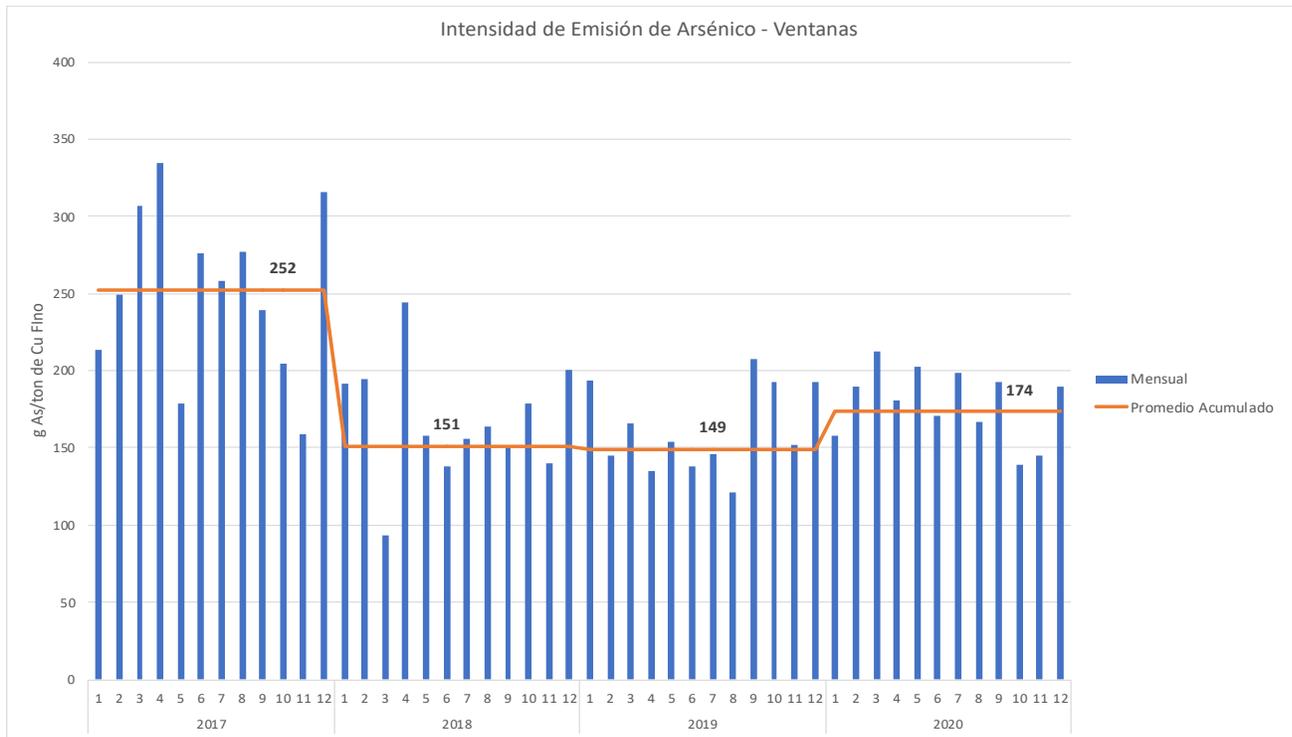


Nota: Eje de las abscisas se fija entre 85% y 100% para la comparación entre las fundiciones.

**Figura 3-41 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Ventanas, 2017-2020**

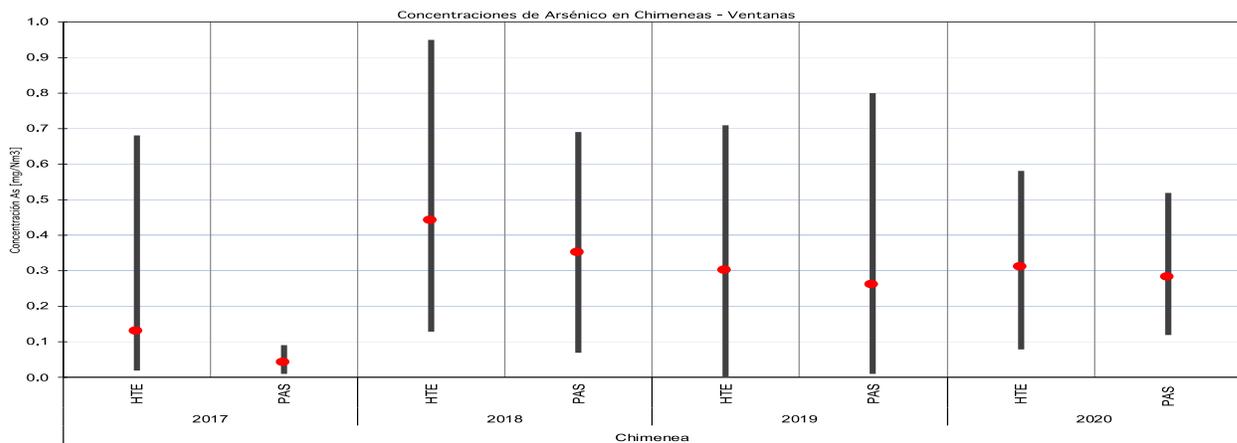
Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Por último, la Figura 3-42 presenta los valores del indicador de intensidad de emisión de arsénico, el cual refleja la proporción de la estimación de emisiones de arsénico resultante del balance de masa respecto de la producción de finos de cobre. Este indicador, complementario a los anteriormente presentados, permite observar un nivel de eficiencia en términos de cuanto emisión se alcanza por unidad producida. A diferencia del indicador de emisiones totales, este indicador controla por el efecto de la producción, funcionando como una métrica que permite resumir el desempeño ambiental en término de emisiones por nivel de actividad. Se observa una disminución considerable en el año 2018, para mantener luego una estabilidad en el desempeño ambiental el 2019, y luego aumentarla al último año reportado.



**Figura 3-42 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Ventanas, periodo 2017-2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

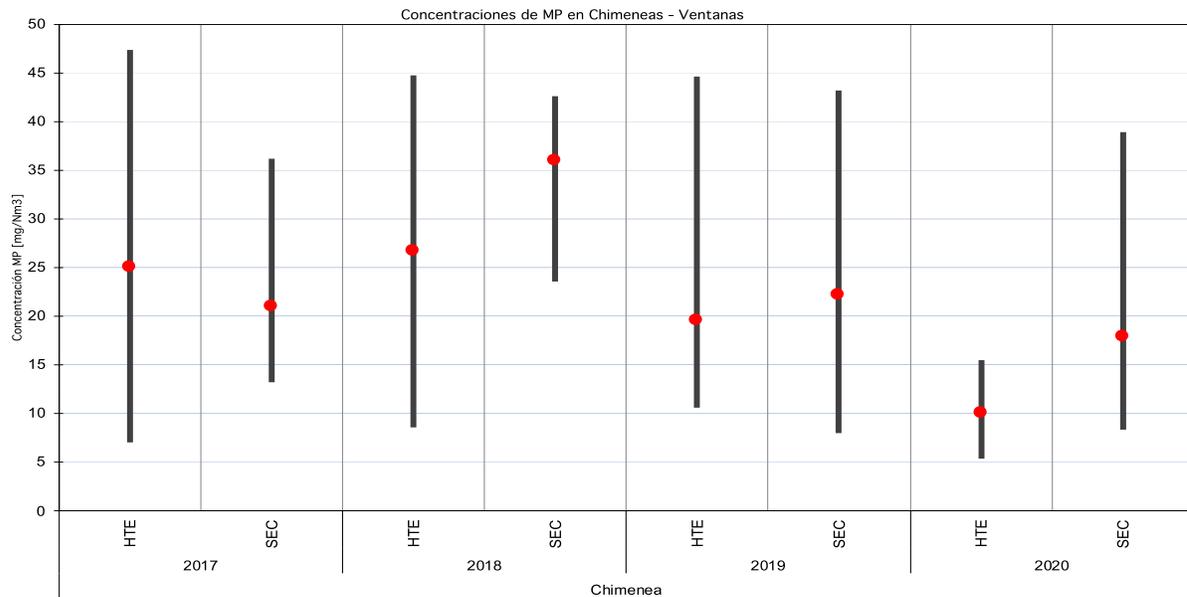


Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

**Figura 3-43 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Ventanas 2017-2020.**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-43 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de arsénico medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Ventanas presenta datos para las chimeneas asociada al horno de tratamiento de escoria y la planta de ácido. Se puede notar una disminución de las medias en el periodo 2018-2020, las cuales han estado cumpliendo la normativa. Las medias alcanzadas en el último año reportado son de 0,28 [mg/m<sup>3</sup>N] para las PAS, mientras que el HTE ronda los 0,3 [mg/m<sup>3</sup>N].



Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

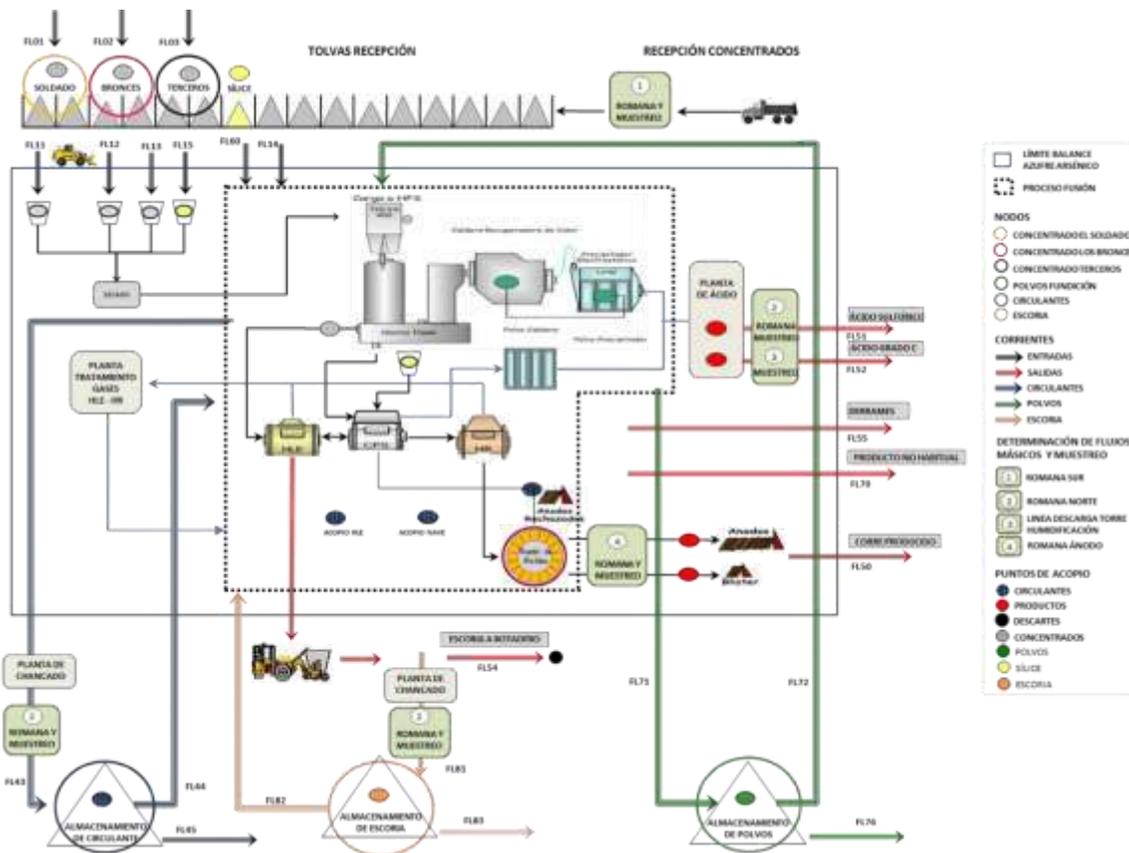
### Figura 3-44 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Ventanas 2017-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-44 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de material particulado medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Ventanas presenta datos para las chimeneas asociada al horno de tratamiento de escoria y el proceso de secado. En general, se puede ver un alza en los valores reportados entre el año 2017 y 2018 para ambos procesos, para luego tener un comportamiento de disminución en las medias de concentraciones de material particulado. De esta manera, la chimenea asociada al proceso de secado reporta concentraciones medias de 10 [mg/m<sup>3</sup>N] y 17 [mg/m<sup>3</sup>N] para el HTE y SEC en el año 2020, respectivamente.

### 3.3.6 Fundición Chagres

La Figura 3-45 presenta el diagrama de operación de la fundición Chagres. En el diagrama se observa como desde diferentes faenas mineras se recibe concentrado de cobre el cual ingresa a la fundición en el secador, el cual a su vez alimenta el Horno Flash. En este horno se produce la fusión del concentrado, teniendo diferentes salidas: gases que se dirigen hacia la planta de ácido circulando por sistemas de limpieza de gases; escoria que se dirige a hornos de limpieza de escoria; y eje que se dirige a los CPS. La fundición es un proceso complejo, donde los diferentes procesos unitarios interactúan entre ellos no linealmente existiendo, por ejemplo, retroalimentaciones entre procesos.



**Figura 3-45 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Chagres**

Fuente: Reportes técnicos 2019, letra m) diagrama proceso

La fundición Chagres cuenta con varios equipos y unidades relevantes para los puntos de muestreo y para la elaboración del balance de masa. La información de cantidad de equipos y su capacidad se encuentra en la Tabla 3-16. Se destaca que, a diferencias de otras fundiciones, Chagres cuenta con un horno flash utilizado para la fusión del concentrado.

**Tabla 3-16 Equipos e instalaciones principales de fundición Chagres**

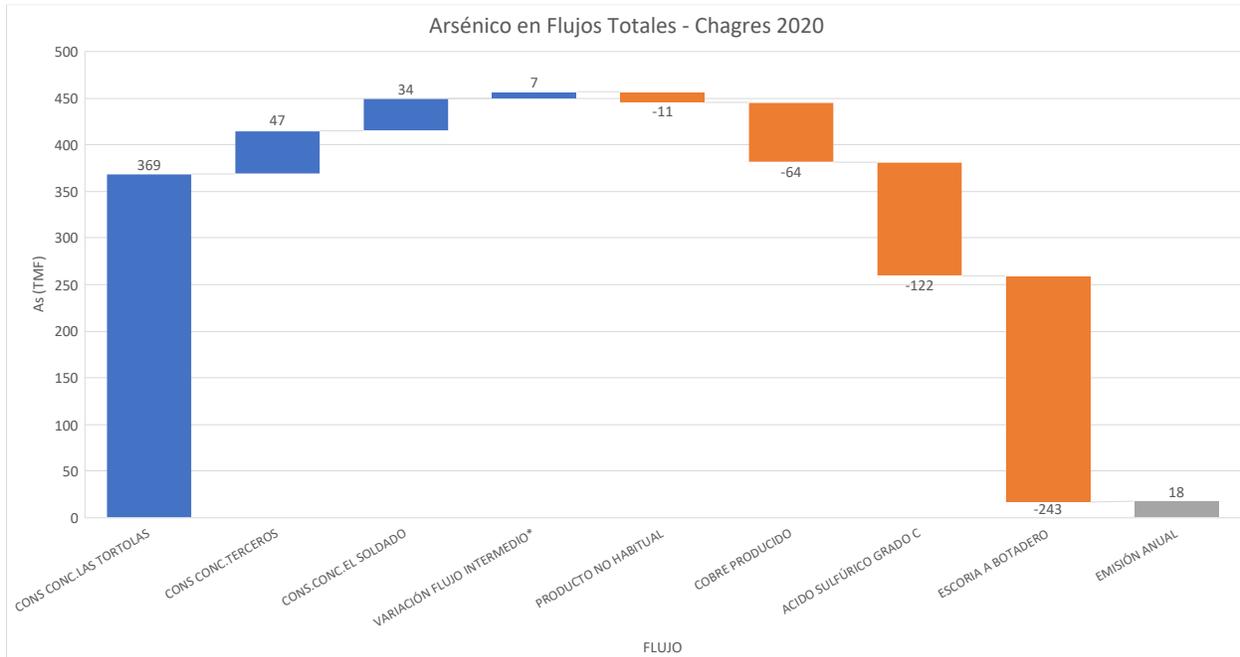
Equipo/Instalación	Cantidad	Capacidad
Secador	1	137,5 [t/h]
Horno Flash	1	1790 [t/día]
CPS	4	597 [t/día]
Hornos de Limpieza de Escoria	2	987 [t/día]
Hornos de Refino	2	544 [t/día]
Rueda de Moldeo	1	40 [t/h]
Planta Tratamiento de Gases HLE	1	-
Planta de Tratamiento de HR	1	-
Planta de Ácido	1	1800 [t/día]

Fuente: Elaboración propia en base a metodología de balances de masa 2018 aprobada por la SMA

A nivel operacional, la Figura 3-46 representa el balance de emisiones de arsénico del año 2020. En ella las barras de color azul representan las “entradas”<sup>46</sup> de arsénico en el balance, las barras naranjas representan las “salidas”, por su parte, la “variación flujo intermedio” representa el cambio interanual de las existencias de arsénico en los flujos intermedios. Cabe destacar, que la variación interanual de las existencias impacta al balance de masa según lo descrito en la Ecuación 4, descrita en la Sección 3.1.1.

---

<sup>46</sup> Ver Ecuación 4 donde se explica la relación entre las entradas, salidas, flujos intermedios y emisiones.



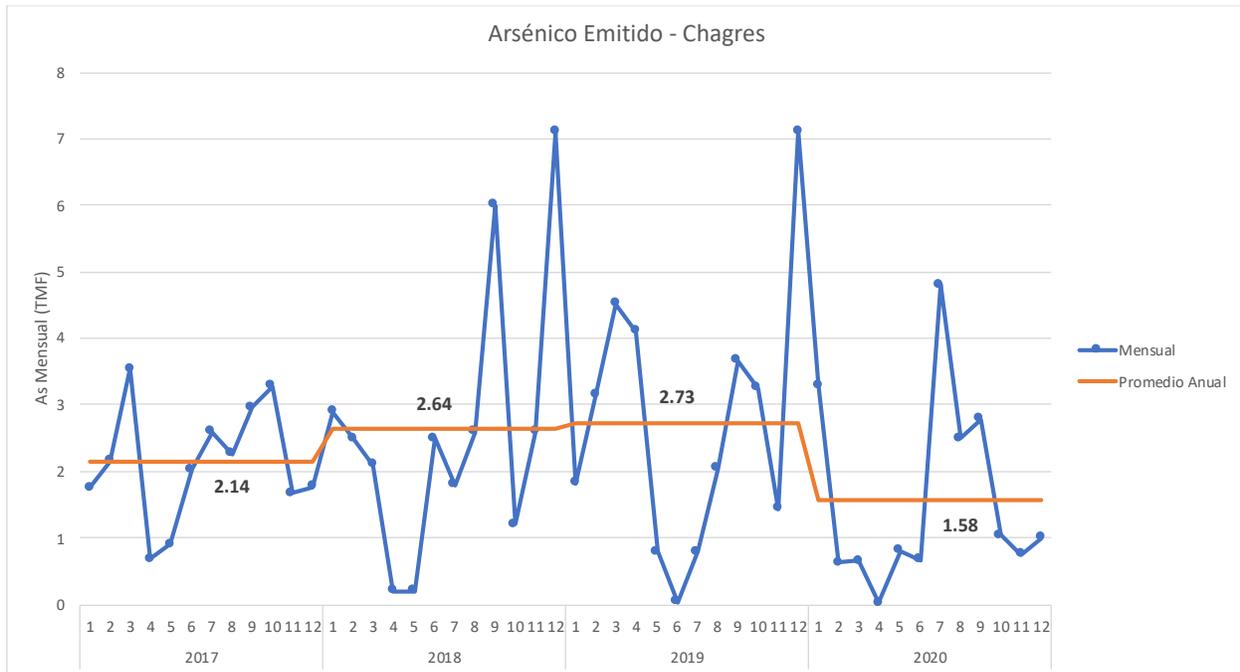
**Figura 3-46 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Chagres 2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos mensuales

En la Figura 3-46 se puede ver que las entradas relevantes son las recepciones de concentrado, estas corresponden a Las Tórtolas, de Terceros y de El Soldado. La fundición Chagres recibe cotidianamente los concentrados señalados, cada uno con distintos valores de contenido químico de arsénico. Se puede ver que las Tórtolas representa el 60% del arsénico en las entradas, mientras que el concentrado de terceros y de El Soldado, el 26% y 7,5%, respectivamente. Por el otro lado, las salidas tienen una distribución entre varias corrientes. Principalmente, la Escoria a Botadero, que constituye las pérdidas de la operación, representa el 55%. Luego, el Ácido Sulfúrico C y el Cobre Producido, provenientes de la planta tratamiento del ácido y horno de refinación, respectivamente, contribuyen un 27% y 15% de los contenidos de arsénico en los flujos de salida. Finalmente, en este mismo sentido, el denominado producto no habitual, comercializado en eventualidades a otras fundiciones y/o plantas de tratamiento, es contabilizado con 11 TMEF al año de arsénico. Lo anterior resulta en una emisión estimada de arsénico de 18 TMEF.

Cabe mencionar, que la variación de flujo intermedio se calcula a través de la diferencia de la existencia final y la existencia inicial, las cuales reflejan los movimientos de los inventarios. En ese sentido, los más relevantes son el circulante y escoria en el consumo (4,3 y 1,5 TMEF), además del circulante generado (4 TMEF). Además, se debe mencionar que los flujos que no aparecen en esta gráfica tienen valores cercanos al nulo, estos son para las entradas: Oxígeno, Sílice, Polvos, Insumos no Habituales. Luego, para las salidas, se encuentran estas características en el Ácido Sulfúrico.

Luego, en la Figura 3-47, se presentan los valores de emisiones mensuales de arsénico para el periodo 2017-2020. Se selecciona este periodo por representar el periodo en que se cuenta con mayores detalles de la estimación del balance de masa en las diferentes fundiciones, facilitando la comparación entre ellas.



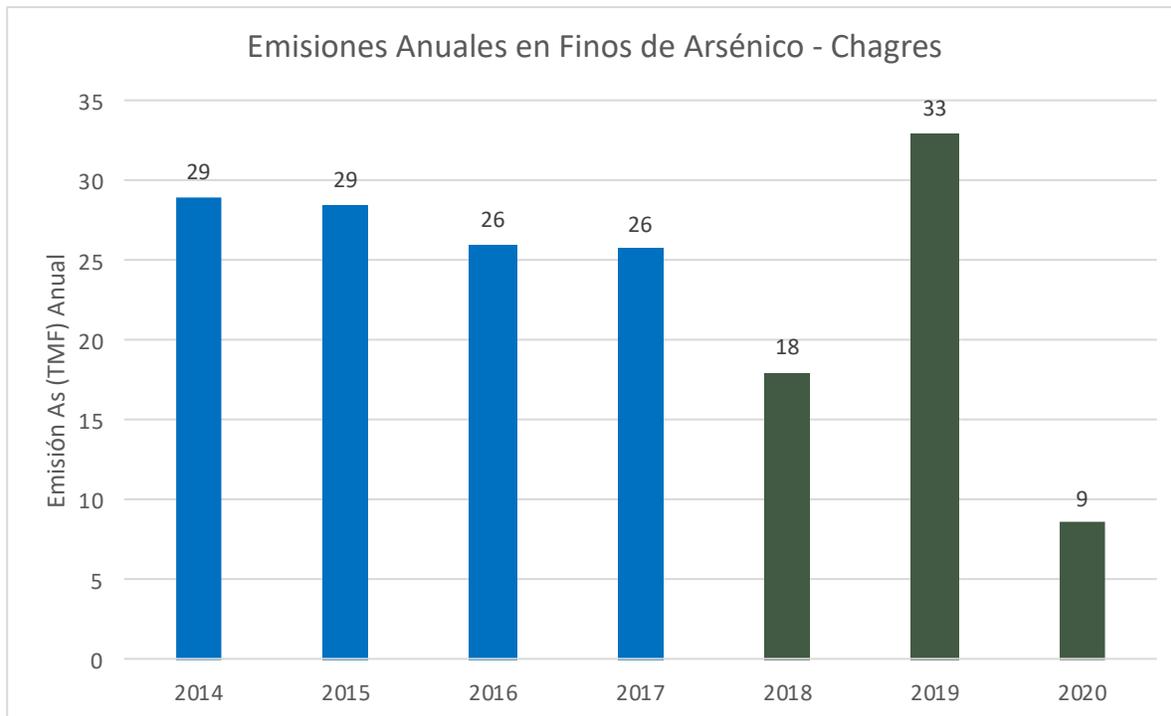
**Figura 3-47 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Se observa una variación intermensual relevante, con emisiones de arsénico mensuales que van desde valores cercanos a 0 [TMF/mes] hasta 7 [TMF/mes]. Sin embargo, a nivel anual se observa una operación relativamente estable. Los promedios anuales resultantes de los balances de masa van desde las 1,58 [TMF/mes] en el año 2020 a 2,73 [TMF/año] del año 2019. Lo anterior, da cuenta de que, dentro de un mismo año, los meses con emisiones excepcionalmente altas se tienden a compensar con otros meses con emisiones especialmente bajas, resultando en emisiones promedios relativamente estables.

Lo anterior es levemente distinto a lo que observa en la Figura 3-48, donde se ve una estabilidad histórica con cierta variabilidad en los últimos años. Cabe notar que existe una diferencia relevante al hacer la comparación con las emisiones mensuales, pues de acuerdo a la metodología de balance de emisión, a diferencia de las emisiones mensuales, las emisiones anuales deben considerar la reducción por el arsénico contenido en el material de limpieza.

Es destacable que los resultados de emisiones de arsénico cumplen con los límites de emisión establecidos en el artículo 3° de la norma de emisión (MMA, 2013a), donde para la fundición Chagres se establece un límite de 35 [ton/año] de emisión. Es importante destacar que, en el año 2019 el límite de emisión estuvo cerca de superarse llegando a emitir un 94% del límite de emisión máximo. En el mismo sentido, se debe señalar que la fundición no reportó material de limpieza para el periodo, por lo que la emisión anual será mayor a la de otros años. Esto se debe a que la fundición no realizó mantenciones de remoción de material en los equipos.



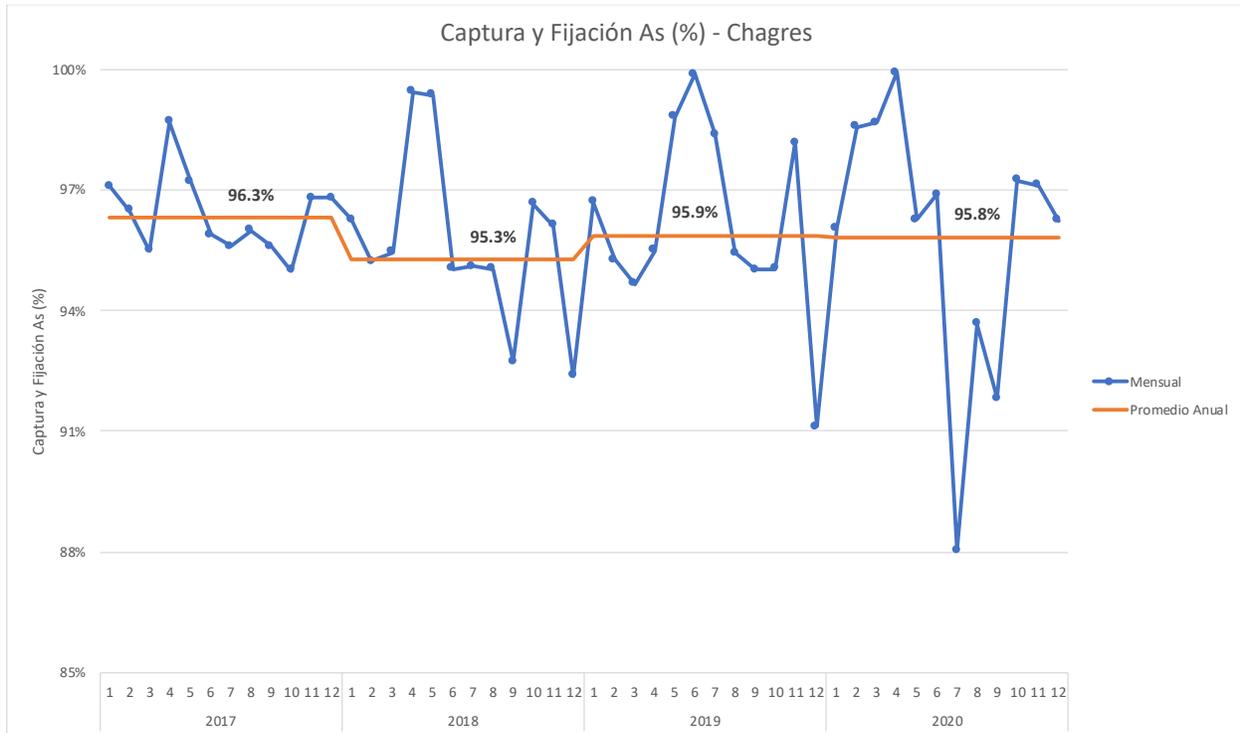
**Figura 3-48 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Chagres, 2014-2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos y datos compilados por la SEREMI.

Ahora bien, respecto a la información disponible e incluyendo años previos a la aplicación del protocolo, se presentan las emisiones anuales reportadas por la fundición para el periodo 2014-2020. Cabe mencionar, que para el año 2015, el mes de marzo presenta un balance de emisión negativa (-2,1 TMF). Por otra parte, se señala que el valor indicado en la presente tabla corresponde a lo informado en el informe de la auditoría externa 2017, cuyo objetivo es evaluar la aplicación de la metodología de balances de masa en el año 2016.

De forma complementaria, en la Figura 3-49 se presentan los valores reportados de la captura y fijación de arsénico en la fundición Chagres. La estimación considera la proporción entre la masa de arsénico que ingresa a la fundición y la masa que resulta del balance de masa como emisión. Al respecto, la norma en su Artículo 3° establece que la captura y fijación de arsénico debe ser igual o mayor a un 95%. Se observa que durante todo el horizonte 2017-2020 la fundición de

Chagres habría superado dicha tasa de captura y fijación, manteniendo una tasa de captura y fijación anual bastante estable entre 95,3-96,3%. Cabe destacar que a pesar de tener un máximo de emisión anual para el año 2019, no se superó el límite de captura y fijación de arsénico porcentual.



Nota: Cabe mencionar, que el eje de las abscisas se fija entre 85% y 100% para la comparación entre las fundiciones

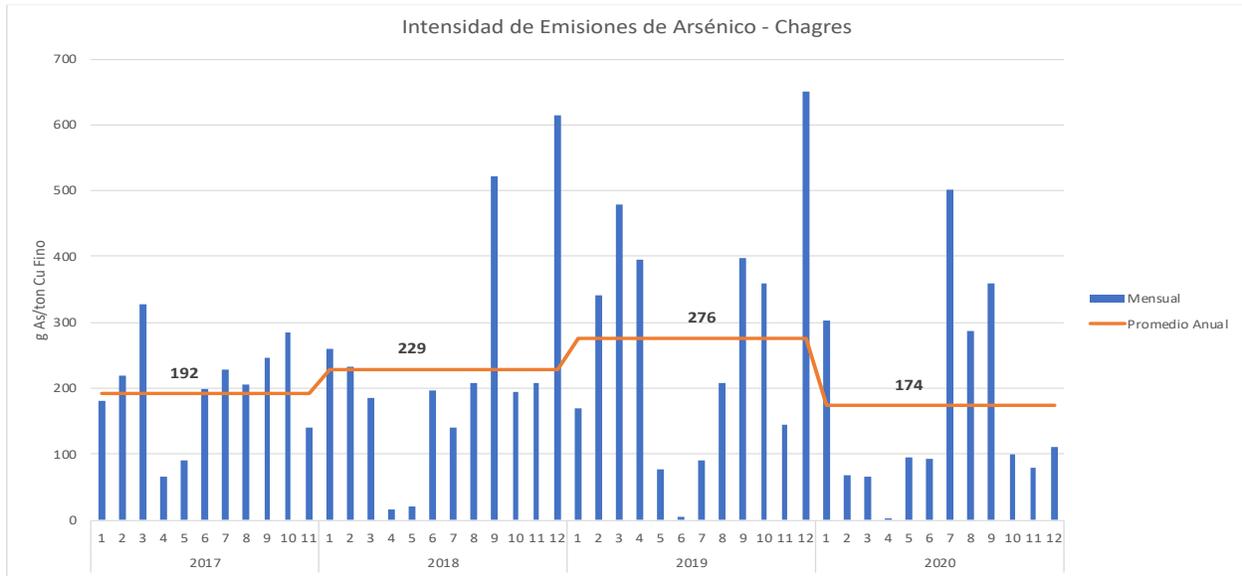
**Figura 3-49 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Chagres, 2017-2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Por último, la Figura 3-50 presenta los valores del indicador de intensidad de emisión de arsénico, el cual refleja la proporción de la estimación de emisiones de arsénico resultante del balance de masa respecto de la producción de finos de cobre. Este indicador, complementario a los anteriormente presentados, permite observar un nivel de eficiencia en términos de cuanto emisión se alcanza por unidad producida. A diferencia del indicador de emisiones totales, este indicador controla por el efecto de la producción, funcionando como una métrica que permite resumir el desempeño ambiental en término de emisiones por nivel de actividad.

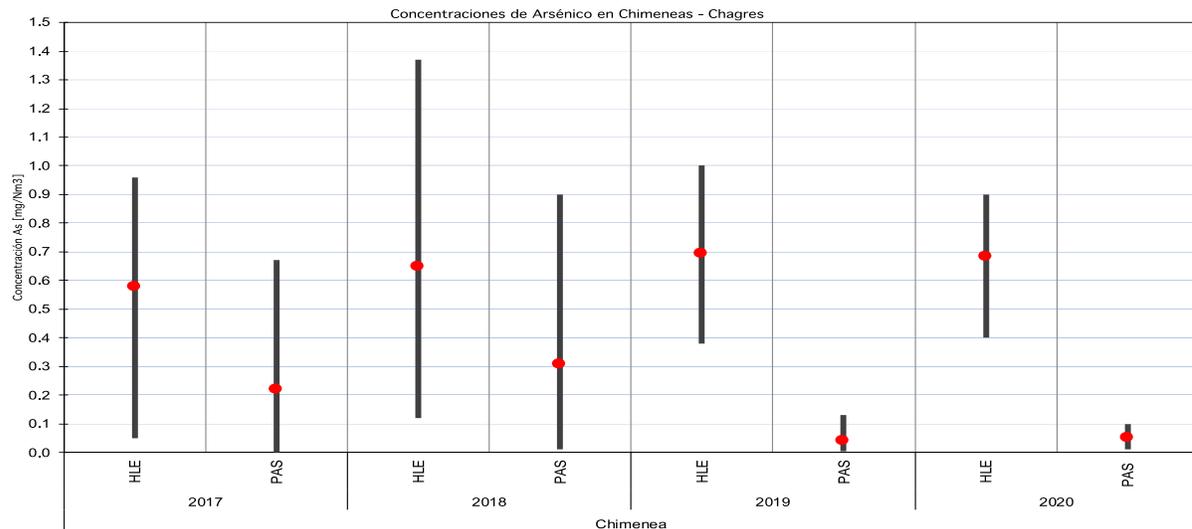
Se observa que si bien, mensualmente existen variaciones relevantes a nivel anual el indicador se ha mantenido variable en torno a 220-230 [g As/ton Cu fino]. Se observa que el año con indicador mayor (2019) represento un aumento de 20% respecto del año anterior. Considerado que las emisiones anuales aumentaron cerca de un 85% (ver Figura 3-50), se observa que dicho aumento es explicado sólo parcialmente por el aumento de las emisiones unitarias, mientras que el resto de la diferencia se explicaría por qué no hubo material de limpieza. Al año 2020, se logra una reducción de 24% de la intensidad de emisiones respecto del año 2018, mientras que sus

emisiones totales cayeron cerca de 50%, lo cual induce a pensar que la diferencia restante es atribuible a una reducción del nivel de actividad.



**Figura 3-50 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Chagres, periodo 2017-2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

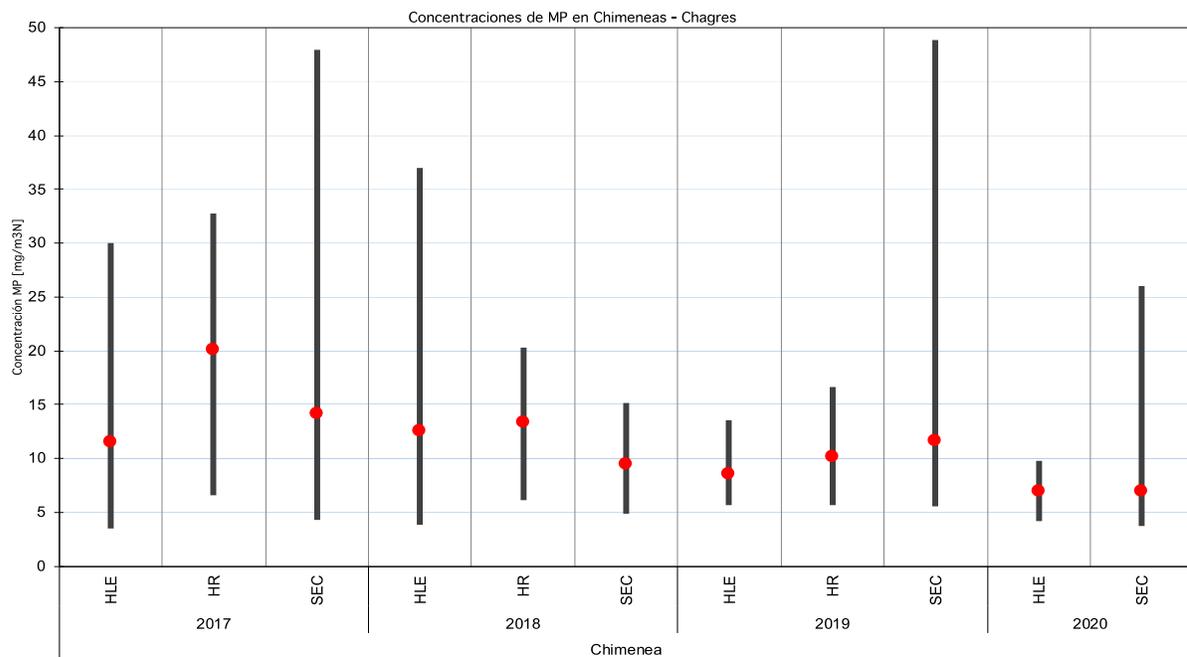


Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

**Figura 3-51 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Chagres 2017-2020.**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-51 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de arsénico medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Chagres presenta datos para las chimeneas asociadas al horno de limpieza de escoria y planta de ácido. En general, se pueden ver máximos que superan o son iguales a el umbral del 1 [mg/m3N] de As, ocurridos en enero/2018 y agosto/2019, con 1,37 [mg/m3N] y 1 [mg/m3N] respectivamente. Respecto a los valores asociados a la PAS, se observa que hay un comportamiento estable en los últimos dos años, con valores de medias de 0,04 [mg/m3N] y 0,05 [mg/m3N] para el 2019 y 2020, respectivamente, inferiores a la media de concentración de As del periodo anterior.



Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

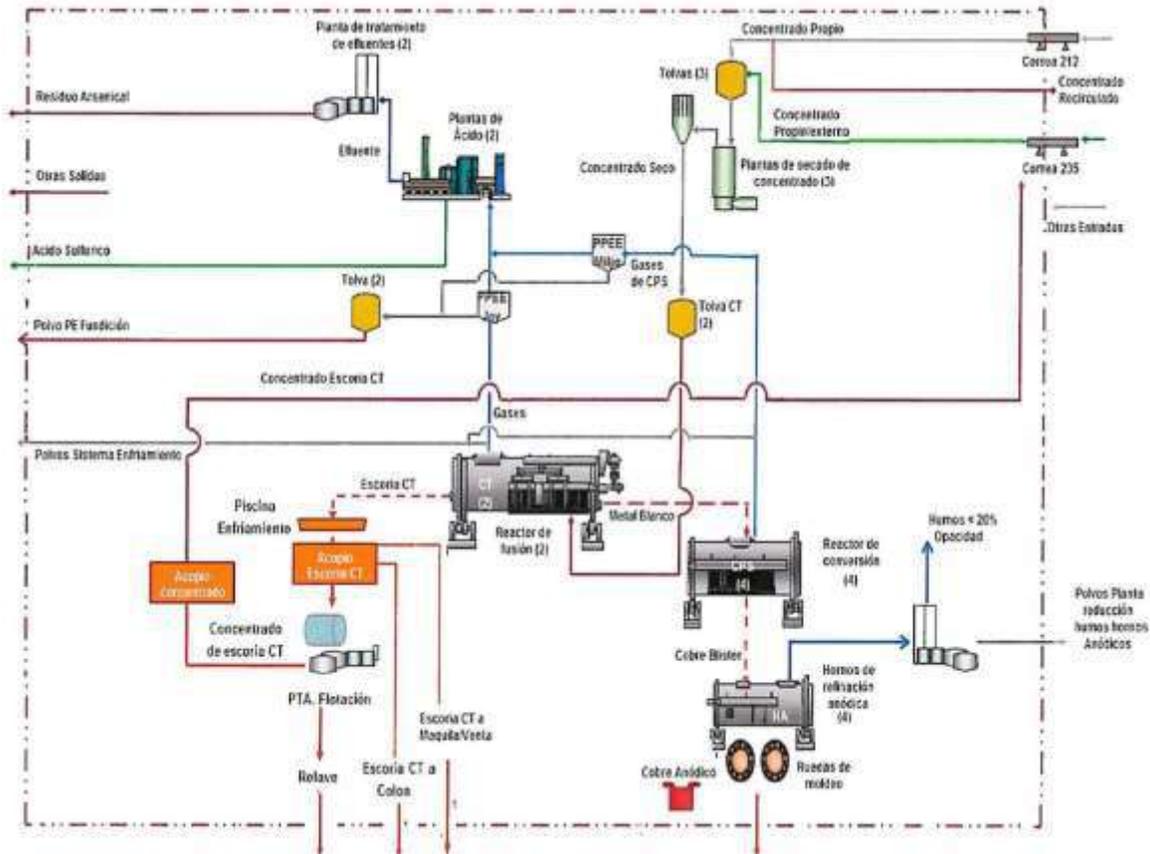
**Figura 3-52 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Chagres 2017-2020.**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-52 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de material particulado medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Chagres presenta datos para las chimeneas asociadas al horno de limpieza de escoria, horno de refinado anódico y el proceso de secado. En general, se puede ver un cumplimiento absoluto en las mediciones de material particulado, ya que ni una verificación mensual supera el límite de 50 [mg/m3N] de concentración para ni uno de los procesos.

### 3.3.7 Fundición Caletones

En la Figura 3-53 se presenta un diagrama esquemático de la fundición Caletones, donde se observa que el proceso principal comienza con la alimentación mediante las correas 212 y 235 de la planta de secado de concentrado, el cual alimenta al reactor de fusión. Desde este punto se complejiza el flujo, teniendo flujos separados para los gases, metal blanco y escoria, cada uno teniendo procesos diferentes, los cuales incluso cuentan con retroalimentaciones.



**Figura 3-53 Diagrama de entradas/salida y proceso de fundición Caletones**

Fuente: Auditoría a Metodología de Balance de Arsénico 2019

La fundición Caletones cuenta con varios equipos y unidades relevantes para los puntos de muestreo y para la elaboración del balance de masa. La información de cantidad de equipos y su capacidad se encuentra en la Tabla 3-17. A diferencia de otras fundiciones, se observa la existencia de tres hornos de secado. Así como dos convertidores Teniente como reactor de fusión.

**Tabla 3-17 Equipos e instalaciones principales de fundición Caletones**

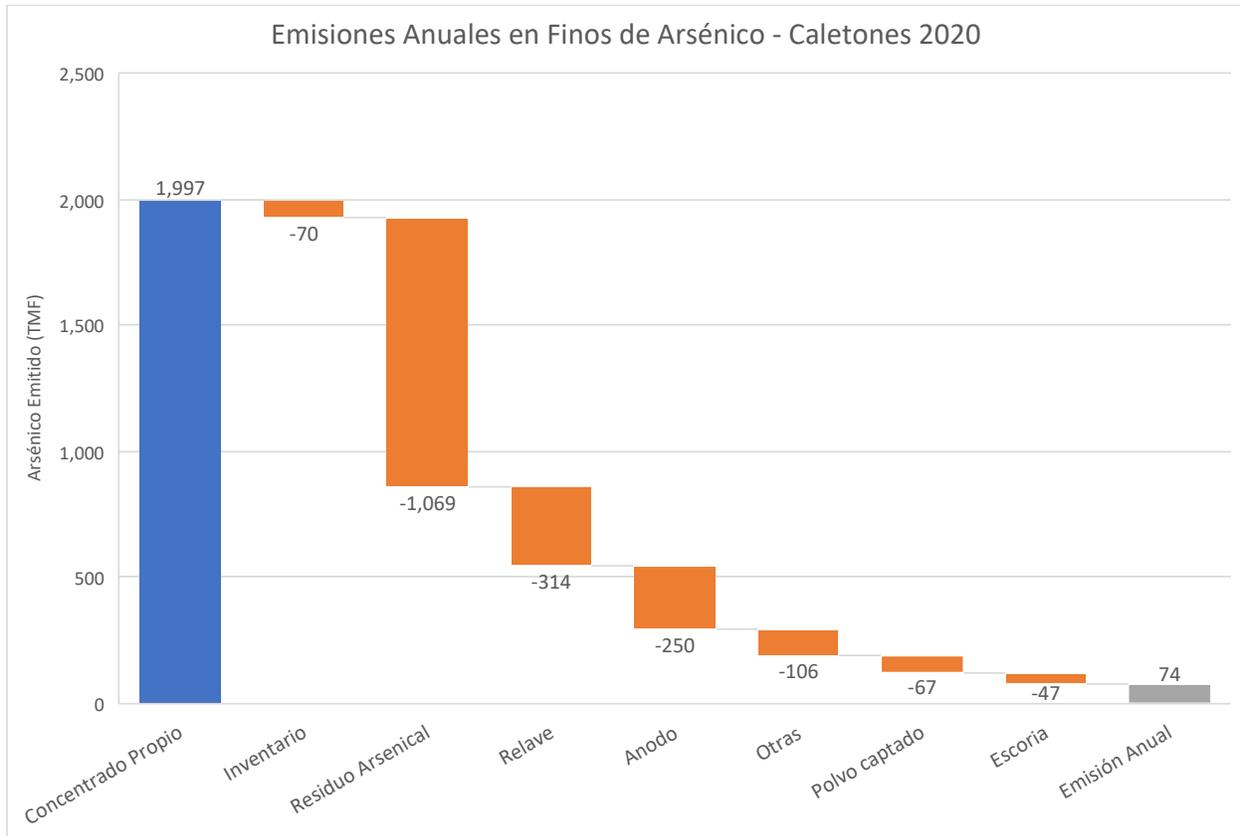
Equipo/Instalación	Cantidad	Capacidad
Horno de secado Fluosólido N°1	1	65 [t/h]
Horno de secado Fluosólido N°2	1	90 [t/h]
Horno de secado Fluosólido N°3	1	150 [t/h]
Reactor de Fusión (Tipo Teniente)	2	90 [t/h]
Reactor de Conversión (Tipo CPS)	4	200 [t/carga]
Horno de Refinación Anódica (Tipo Basculante)	4	400 [t/carga]
Rueda de Moldeo 28	1	28 moldes
Rueda de Moldeo Twin	2	16 moldes
P. Limpieza Gases N°1	1	192.400 [Nm3/h]
P. Limpieza Gases N°2	1	329.000 [Nm3/h]
Planta Reducción de Emisiones N°1	1	180.000 [Nm3/h]
Planta Reducción de Emisiones N°2	1	280.000 [Nm3/h]
Planta Reducción de Hornos Anódicos	2	165.659 [m3/h]
Planta Tratamiento Escoria CT	1	3750 [ton/día]

Fuente: Elaboración propia en base a metodología balance de arsénico 2019

A nivel operacional, la Figura 3-54 representa el balance de emisiones de arsénico del año 2020. En ella las barras de color azul representan las “entradas”<sup>47</sup> de arsénico en el balance, las barras naranjas representan las “salidas”, por su parte, la “variación flujo intermedio” representa el cambio interanual de las existencias de arsénico en los flujos intermedios. Cabe destacar, que la variación interanual de las existencias impacta al balance de masa según lo descrito en la Ecuación 4, descrita en la Sección 3.1.1.

---

<sup>47</sup> Ver Ecuación 4 donde se explica la relación entre las entradas, salidas, flujos intermedios y emisiones.

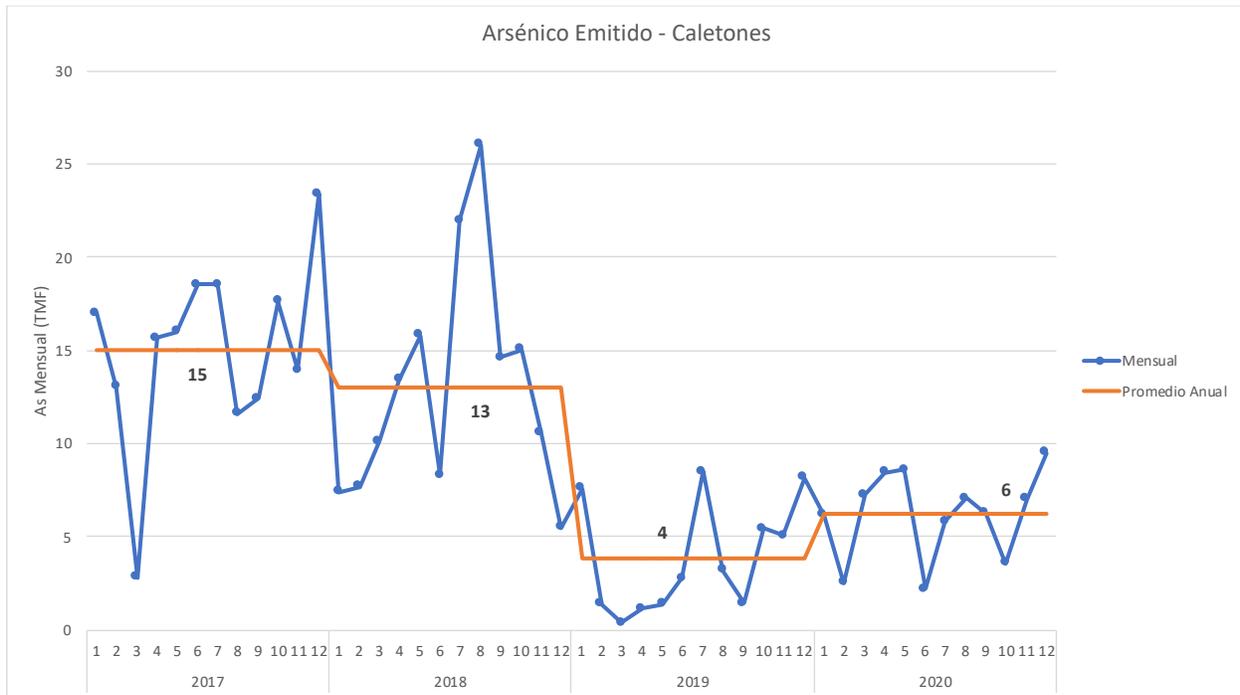


**Figura 3-54 Representación gráfica del balance de masa de As en fundición Caletones 2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes mensuales

En la Figura 3-54 se puede ver que en la fundición Caletones, la principal entrada de arsénico es la recepción de concentrado propio. Por el otro lado, las salidas tienen una distribución en más corrientes, la de residuo arsenical, que corresponde al efluente producto de la limpieza de los gases, relave planta de flotación de escoria, ánodos y polvos precipitadores electrostáticos. La primera corriente de salida mencionada, contribuye en un 54% al total acumulado, mientras que el relave y los ánodos producidos representan un 16% y 13%, respectivamente. Lo anterior resulta en una estimación de la emisión anual de 74 [TMF], comparable en magnitud con el arsénico del flujo de otras salidas.

Cabe mencionar, que la variación de los flujos intermedio corresponde al balance de varios flujos, dentro de los cuales los principales son los inventarios de carga fría y concentrado de escoria CT. Es el primero mencionado, el que tiene una mayor movilidad respecto a ese año, con una variación de -54,58 [TMF] de finos de arsénico. Luego, cabe mencionar el inventario de polvos de planta de reducción de humos en hornos anódicos, el cual tiene una variación positiva de 1,8 [TMF] de finos de arsénico, a pesar de no ser de los flujos más grandes.



**Figura 3-55 Emisión mensual de arsénico [TMF] y comparación con promedio anual**

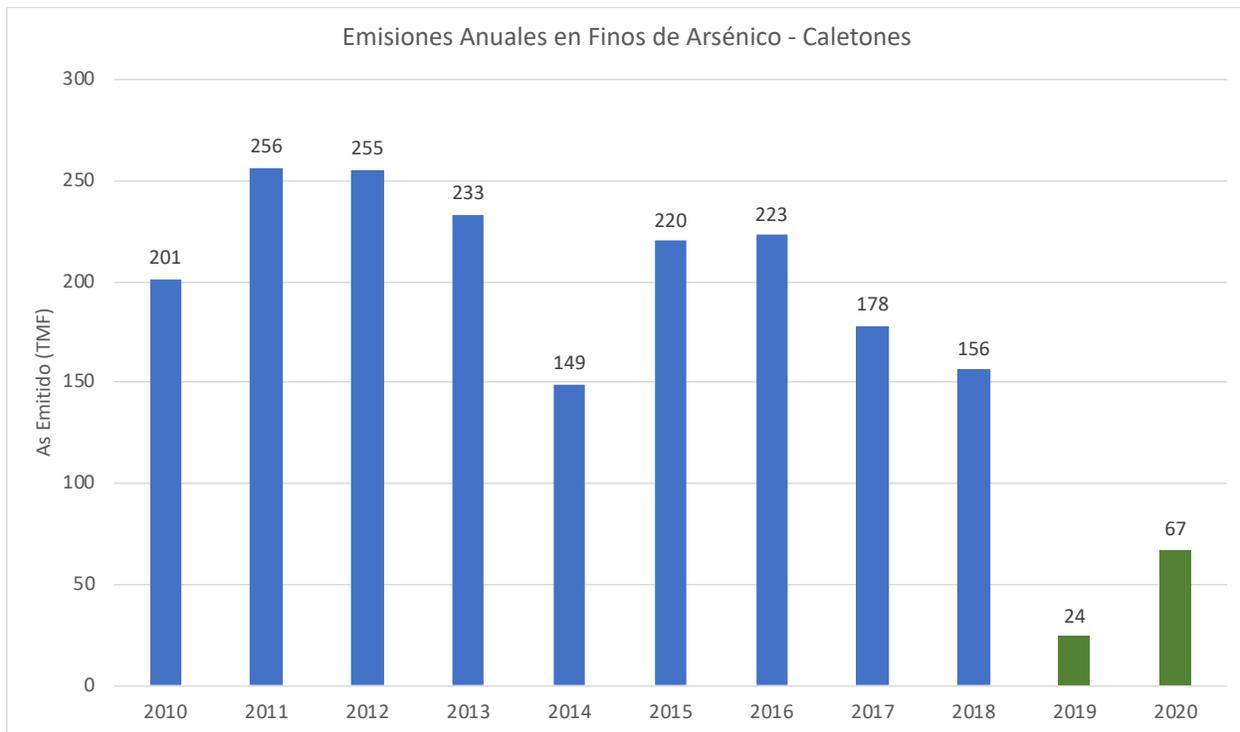
Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-55 se presentan los valores de emisión mensual de arsénico, así como su comparación con el promedio mensual de cada año, para el período 2017 a 2020. Se selecciona este periodo por representar el periodo en que se cuenta con mayores detalles de la estimación del balance de masa en las diferentes fundiciones, facilitando la comparación entre ellas.

Se observa una variación intermensual relevante, con emisiones de arsénico mensuales que oscilan entre valores cercanos a 0 [TMF/mes] y hasta 26 [TMF/mes]. Al comparar los valores anuales, se observa que, si bien los años 2017 y 2018 contaban con valores similares, desde octubre/2018 se observa una reducción sistemática de las emisiones mensuales de arsénico que resultan en emisiones significativamente menores en el año 2019, lo cual también se mantiene para el último año reportado. Los promedios anuales resultantes de los balances de masa parten en 15 [TMF/año] el año 2017 y terminan en 6 [TMF/mes] el año 2020.

Lo anterior resulta en la disminución de las emisiones anuales que se observa en la Figura 3-56. Cabe notar que existe una diferencia relevante al hacer la comparación con las emisiones mensuales, pues de acuerdo a la metodología de balance de emisión, a diferencia de las emisiones mensuales, las emisiones anuales deben considerar la reducción por el arsénico contenido en el material de limpieza.

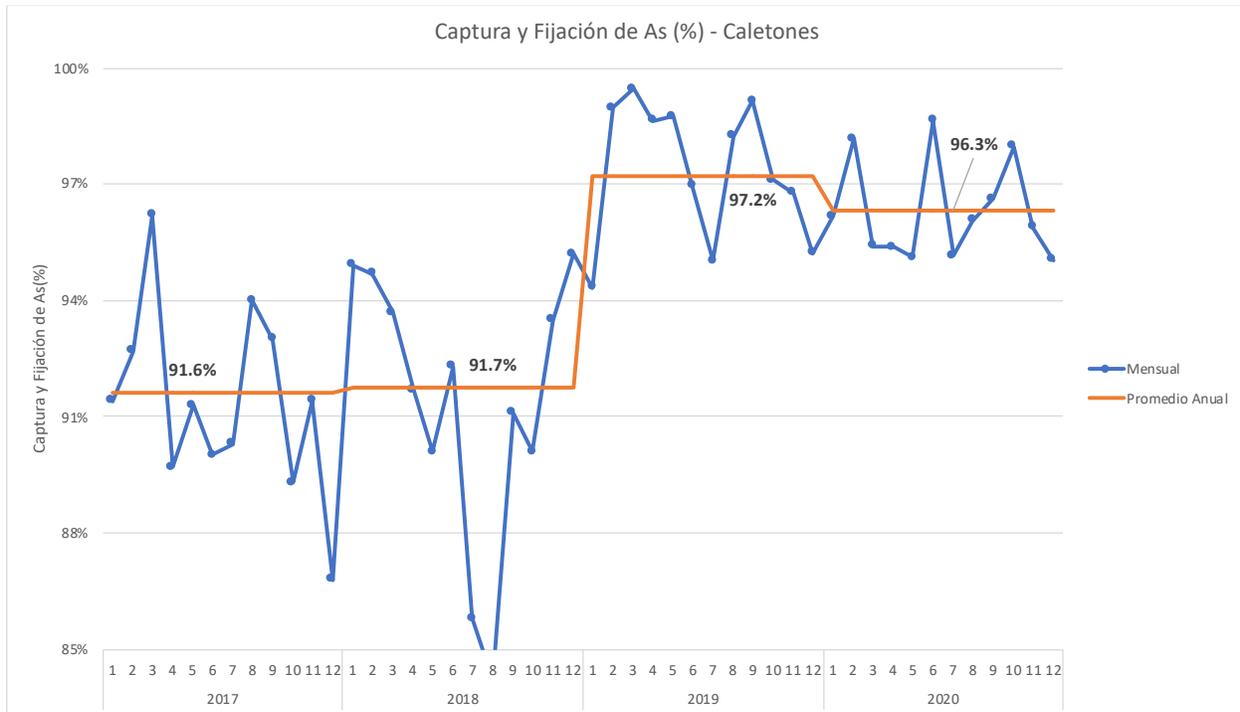
Se puede observar también que recién el 2019 se cumple con holgura los límites de emisión establecidos en el artículo 3° de la norma de emisión (MMA, 2013a), donde para la fundición Caletones se establece un límite de 130 ton/año de emisión. Este comportamiento tuvo un declive relevante, el cual se mantuvo durante el año 2020, donde, en comparación con años anteriores, la emisión representa menos del doble e incluso en algunos casos, el triple.



**Figura 3-56 Emisiones anuales [TMF] de arsénico en Caletones, 2010-2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos y antecedentes Codelco

De forma complementaria, en la Figura 3-57 se presentan los valores reportados de captura y fijación de arsénico en la fundición Caletones. La estimación considera la proporción entre la masa de arsénico que ingresa a la fundición y la masa que resulta del balance de masa como emisión. Al respecto, la norma en su Artículo 3° establece que la captura y fijación de arsénico debe ser al menos un 95%. Similar a las emisiones, se observa que recién el 2019 se cumple con la tasa de captura anual, logrando cambiar la tendencia anterior de 91,6%-91,7% a un satisfactorio 97,2%. Este significativo aumento de la tasa de captura y fijación de arsénico es una de las razones principales que explican la reducción en las emisiones mensuales y anuales observadas en la Figura 3-55 y Figura 3-56.

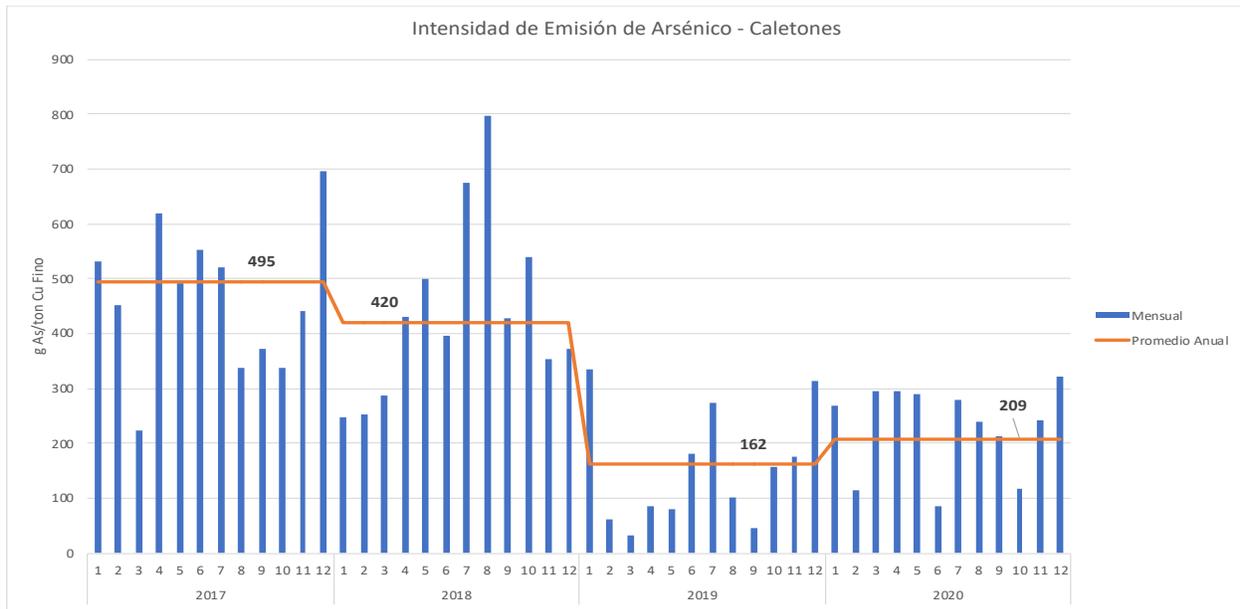


Nota: Por escala no se incluye en la figura el valor 84.2%, correspondiente a agosto/2018.

**Figura 3-57 Captura y fijación de arsénico (%) en fundición Caletones, 2017-2020**

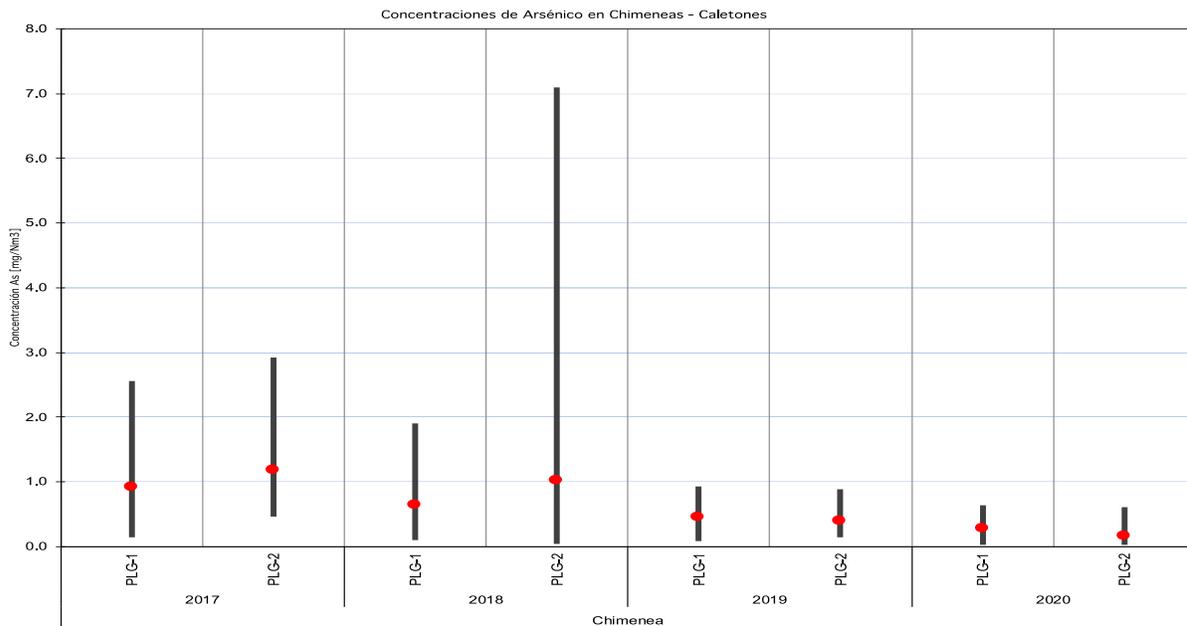
Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Por último, la Figura 3-58 presenta los valores del indicador de intensidad de emisión de arsénico, el cual refleja la proporción de la estimación de emisiones de arsénico resultante del balance de masa respecto de la producción de finos de cobre. Este indicador, complementario a los anteriormente presentados, permite observar un nivel de eficiencia en términos de cuanto emisión se alcanza por unidad producida. A diferencia del indicador de emisiones totales, este indicador controla por el efecto de la producción, funcionando como una métrica que permite resumir el desempeño ambiental en término de emisiones por nivel de actividad. En la Figura 3-58 se observa la mejora en desempeño ambiental de Caletones, apuntando a que la mejora en los niveles de emisión no responden a cambios en el nivel de actividad (producción de cobre), sino que a una reducción significativa de las emisiones unitarias, considerando las mejoras tecnológicas que la fundición Caletones implementó, en pos de dar cumplimiento a los límites de emisión establecidos en el D.S. 28/2013. Estas, tales como la optimización de plantas de secado, reducción de opacidad humos de hornos anódicos y la planta de tratamiento de escorias.



**Figura 3-58 Intensidad de emisión de arsénico [g As/TMF Cu producida] en fundición Caletones, periodo 2017-2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

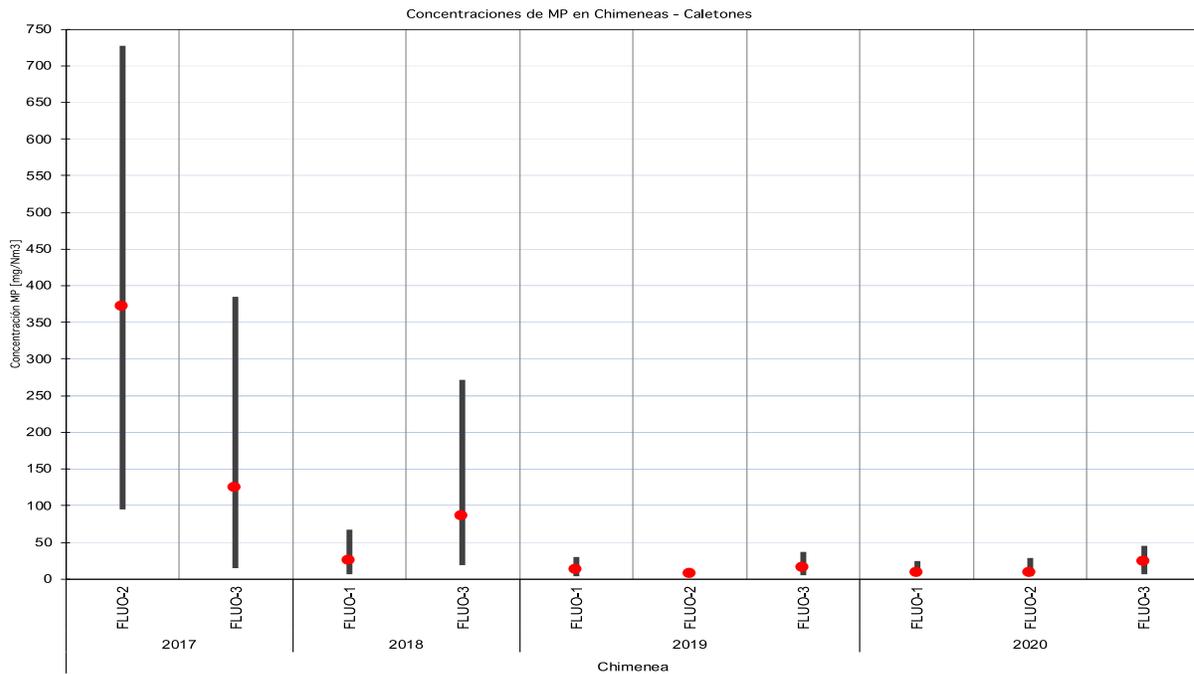


Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

**Figura 3-59 Concentraciones históricas de arsénico en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Caletones 2017-2020.**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-59 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de arsénico medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Caletones presenta datos para las chimeneas asociadas la planta de lavado de gases. En general, se puede ver un cumplimiento absoluto en el periodo de entrada en vigencia de la norma, además de una disminución de los valores medios de concentración con el paso del tiempo.



Nota: Los límites de las barras representan los valores máximos y mínimos registrados durante el año correspondiente, mientras que los puntos rojos señalan la media.

**Figura 3-60 Concentraciones históricas de material particulado en chimeneas por mediciones isocinéticas en procesos unitarios regulados, Caletones 2017-2020.**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

En la Figura 3-60 se puede ver el comportamiento de los máximos, mínimos y medias de las concentraciones de material particulado medidas en las chimeneas de los procesos unitarios regulados. En este caso, Caletones presenta datos para las chimeneas asociadas los procesos de secadores fluosólidos. En general, se observa una disminución en los valores medios y máximos desde el 2017 hasta el 2019, para luego incrementar los valores medios en las chimeneas de FLUC-2 y FLUC-3 en el 2020 dentro del umbral de 50 [mg/m<sup>3</sup>N]. Se puede ver un cumplimiento absoluto en las mediciones de material particulado en el periodo de cumplimiento de la normativa, ya que ni una verificación mensual supera el límite de 50 [mg/m<sup>3</sup>N] de concentración para ni uno de los procesos.

### 3.3.8 Comparación entre Fundiciones

En el siguiente apartado, se presenta la información recopilada a manera de comparar los distintos indicadores que reportan las fuentes emisoras de arsénico. Así, se podrán identificar los puntos importantes, capacidades y desempeño que tienen las fundiciones de cobre, asociados a la emisión de arsénico.

Tal como se ha mencionado anteriormente, la estandarización de la información reportada toma a lugar desde el periodo del año 2017, cuando comienza a regir la instrucción de carácter general sobre deberes de remisión de información para fuentes emisoras reguladas por el D.S. 28/2013 del MMA (Resolución Exenta N° 866/2016 SMA). Por esto, es que solo los datos más fidedignos y constantes serán presentados. Aun así, es importante identificar que el proceso de reporte de emisiones ha sido un proceso con mejoras progresivas, lo cual se ha visto plasmado en diferencias entre fundiciones, tales como la configuración del sistema, la identificación de flujos en el límite del sistema, métodos matemáticos de ajuste, muestreo y análisis químico, entre otros. Sin perjuicio de lo anterior, es razonable comparar los datos reportados y generar indicadores de desempeño para la comparación.

Ahora bien, respecto al caso del titular ENAMI, se incluirán tanto los valores reportados como los re-estimados para los años 2019 y 2020, correspondientes al periodo de vigencia de la norma.

En este sentido, la Tabla 3-18 presenta las emisiones anuales, junto con el detalle del material de limpieza, removido en el proceso de las fundiciones, a través de las mantenciones de los equipos. En relación a esta remoción, el protocolo se establece que el material de limpieza debe ser considerado solo para el periodo anual, por lo que el valor reportado difiere de la suma total de las emisiones mensuales. Se observa que la participación del material de limpieza respecto de la emisión acumulada en el periodo enero - diciembre varía de forma relevante entre las fundiciones.

**Tabla 3-18 Emisiones de Arsénico [TMF] y Razón entre material de limpieza y emisión acumulada por fundición, periodo 2017-2020**

Fundición	Año	Emisión Anual [TMF/Año]	Material de Limpieza Reportado [TMF/Año]	Emisión Anual Acumulada (1) [TMF/Año]	Razón material limpieza/emisión acumulada (%)
Chuquicamata	2017	422	77	499	15%
	2018	84	33	117	28%
	2019	32	42	73	58%
	2020	181	14	195	7%
	<b>Total Reportado</b>	<b>719</b>	<b>165</b>	<b>884</b>	<b>22%</b>
Altonorte	2017	116	0	116	0%
	2018	116	33	149	22%
	2019	114	0	114	0%
	2020	118	13	131	10%
	<b>Total Reportado</b>	<b>464</b>	<b>46</b>	<b>510</b>	<b>9%</b>

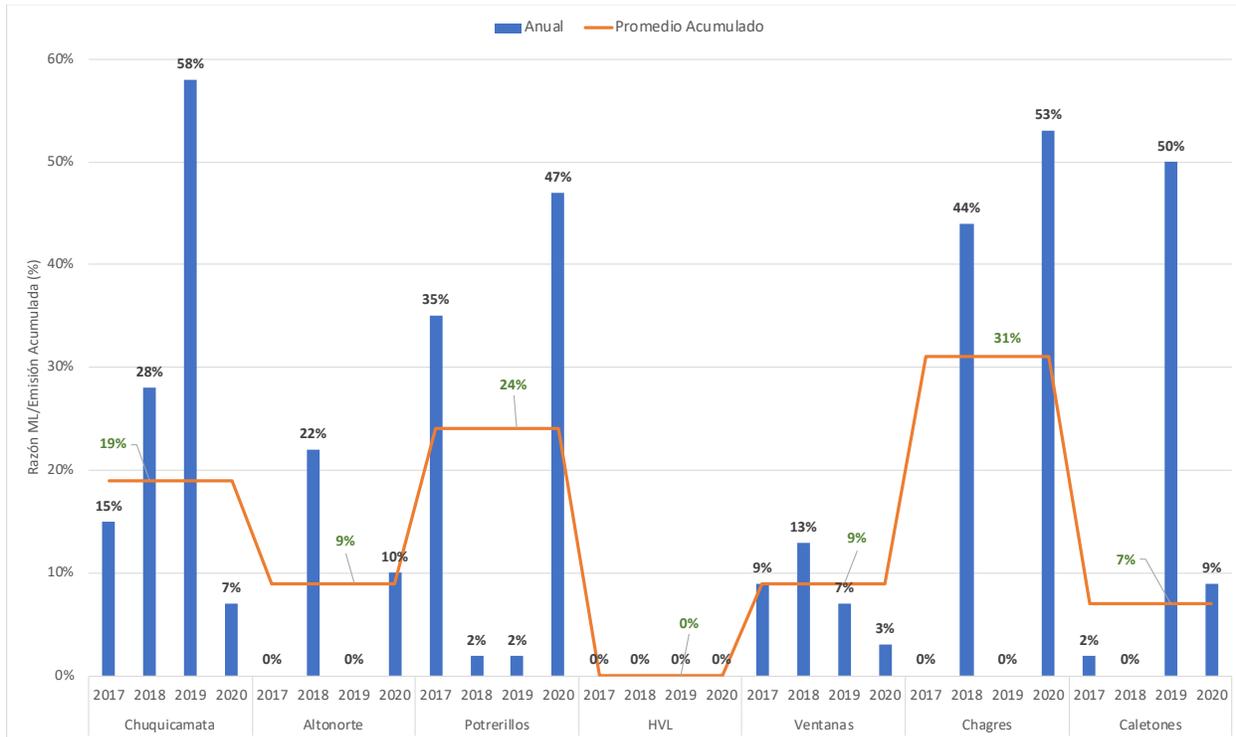
Fundición	Año	Emisión Anual [TMF/Año]	Material de Limpieza Reportado [TMF/Año]	Emisión Anual Acumulada (1) [TMF/Año]	Razón material limpieza/emisión acumulada (%)
Potrerillos	2017	559	299	858	35%
	2018	470	12	482	2%
	2019	50	1	51	2%
	2020	51	45	96	47%
	<b>Total Reportado</b>	<b>1130</b>	<b>357</b>	<b>1487</b>	<b>24%</b>
HVL	2017	20	0	20	0%
	2018	7	0	7	0%
	2019 (R/RE)	-6/11	0/0	-6/11	0%
	2020 (R/RE)	13/19	0/0	13/19	0%
	<b>Total Reportado (R/RE)</b>	<b>33/58</b>	<b>0</b>	<b>33/58</b>	<b>0%</b>
Ventanas	2017	39	4	43	9%
	2018	26	4	30	13%
	2019	26	2	28	7%
	2020	28	1	29	3%
	<b>Total Reportado</b>	<b>119</b>	<b>11</b>	<b>129</b>	<b>9%</b>
Chagres	2017	26	0	26	0%
	2018	18	14	32	44%
	2019	33	0	33	0%
	2020	9	10	19	53%
	<b>Total Reportado</b>	<b>86</b>	<b>24</b>	<b>110</b>	<b>31%</b>
Caletones	2017	178	3	181	2%
	2018	156	0	156	0%
	2019	22	23	46	50%
	2020	67	7	74	9%
	<b>Total Reportado</b>	<b>423</b>	<b>33</b>	<b>457</b>	<b>7%</b>

(1) Enero a diciembre

Fuente: Elaboración propia en base a reportes de balance de masa y reestimación

A modo de análisis, se puede señalar que la razón porcentual del material de limpieza anual respecto a la emisión acumulada correspondientes a las fundiciones Chagres, Potrerillos y Chuquicamata tienen un valor superior en comparación al resto de las fundiciones, con 31%, 24% y 19%, respectivamente. Es importante denotar que Chagres reportó dos años sin material de limpieza, y para otros dos años 2018 y 2020 se obtienen porcentajes importantes de 44% y 53% respectivamente. Además, las mayores remociones totales de contenido de arsénico en el material de limpieza en los cuatro años considerados, son para Potrerillos y Chuquicamata, reportando 357 y 165 TMF, respectivamente. Por otro lado, las fuentes emisoras fundición Altonorte, Ventanas y Caletones, que reportan menores valores en comparación al resto, se encuentran entre un 7%-9% de material de limpieza por emisiones acumuladas anuales. Finalmente, respecto a la fundición de Hernán Videla Lira, esta no reporta material de limpieza en sus reportes técnicos de balance de masa para este periodo.

Análogamente, cabe destacar que no se encuentra un patrón ni comportamiento en común para el material de limpieza, ya que las mantenciones están programadas individualmente por cada fundición. En general, se puede indicar que las mantenciones de los equipos permitirían cuantificar material que captura y fija arsénico en el proceso de la fundición de cobre, y tal como se puede ver en los resultados, dicho material permite disminuir las emisiones del contaminante.



**Figura 3-61 Razón Material de Limpieza/Emisión Acumulada, por fundición y año**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

Considerando las emisiones anuales, se puede hacer la comparación respecto de los límites máximos de emisiones permitidos para cada fundición, según lo establecido en la Norma (MMA, 2013a). Dado que los límites de emisión son diferentes para cada fundición, se propone el indicador de holgura, el cual corresponde al margen de cumplimiento de las emisiones de arsénico. Este se calcula a través de la siguiente expresión, para un año y por fundición:

$$Holgura_{fundición}^{año} = \frac{Límite\ de\ Emisión - Emisión\ Final}{Límite\ de\ Emisión} \quad [\%]$$

**Ecuación 7 Estimación de Holgura**

Así, entre mayor es el resultado de la holgura, mejor es el margen de emisión anual de la Fundición respecto del límite máximo de emisión anual permitido en la norma de emisión. Ciertamente, si el resultado es negativo, significa que el límite de emisión fue superado. Para

sintetizar, los resultados obtenidos según las emisiones reportadas y límites establecidos se presentan en la Tabla 3-19. Cabe destacar, que el promedio acumulado es calculado con las emisiones de arsénico correspondientes a los años de entrada en vigencia de los límites de emisión de As, establecidos en el art N°3 del D.S. N° 28/2013 MMA para todas las fundiciones. Además, señalar que para el total reportado se pondera el valor del límite de emisión por el número de años, para generar un promedio acumulado.

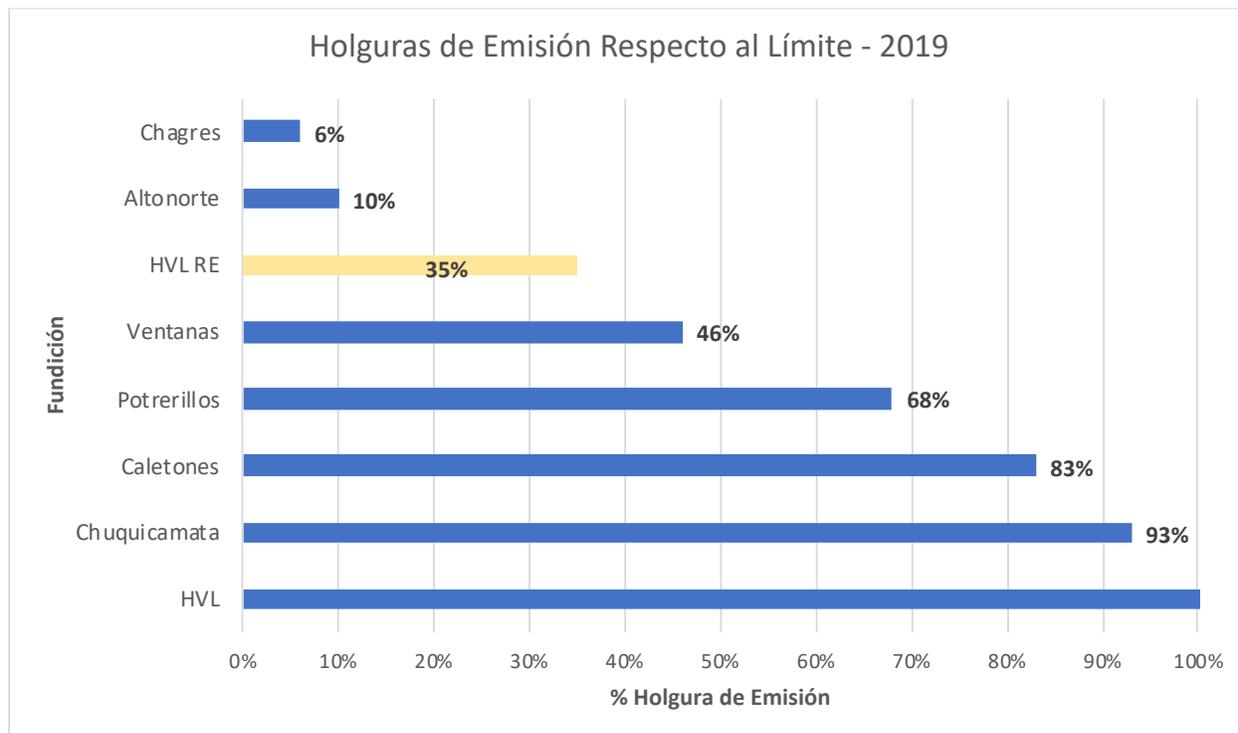
En la Tabla 3-19, se puede apreciar que las fundiciones a las cuales se limitó la emisión anual de As desde el año 2017 son Altonorte, Ventanas y Chagres. Se puede observar, que la primera fundición mencionada ha tenido un comportamiento constante en los valores de holgura, promediando un 8% en los cuatro años estudiados. Por otro lado, Ventanas experimentó un alza en la holgura del año 2017 al 2018, lo cual se ha estabilizado en los últimos tres años estudiados. Luego, la fundición Chagres ha tenido un comportamiento más variable en este periodo, promediando un 39% de holgura acumulada de emisión de As respecto al límite.

**Tabla 3-19 Holgura de emisiones respecto de límite de emisión, en períodos de entrada en vigencia del DS 28 por fundición**

Fundición	Límite de Emisión As [TMF As/Año]	Año	Emisión As Anual [TMF/Año]	Holgura
Chuquicamata	476	2019	32	93%
		2020	181	62%
		<b>Total Reportado</b>	<b>213</b>	<b>78%</b>
Altonorte	126	2017	116	8%
		2018	116	8%
		2019	114	10%
		2020	118	6%
		<b>Total Reportado</b>	<b>464</b>	<b>8%</b>
Potrerillos	157	2019	50	68%
		2020	51	68%
		<b>Total Reportado</b>	<b>101</b>	<b>68%</b>
HVL	17	2019 (R/RE)	-6/11	135%/35%
		2020 (R/RE)	13/19	24%/-12%
		<b>Total Reportado (R/RE)</b>	<b>7/30</b>	<b>80%/12%</b>
Ventanas	48	2017	39	19%
		2018	26	46%
		2019	26	46%
		2020	28	42%
		<b>Total Reportado</b>	<b>119</b>	<b>38%</b>
Chagres	35	2017	26	26%
		2018	18	49%
		2019	33	6%
		2020	9	74%
		<b>Total Reportado</b>	<b>86</b>	<b>39%</b>
Caletones	130	2019	22	83%
		2020	67	48%
		<b>Total Reportado</b>	<b>89</b>	<b>66%</b>

Nota: R corresponde a emisión reportada con cuestionamientos sobre la aplicación de la metodología y su representación de la operación real. RE corresponde a estimación revisada según método basado en intensidad de emisiones promedio declarado por el titular ENAMI para el periodo en periodo oct/2020 a sep/2021 y nivel de actividad reportado para los años respectivos. Además, cabe destacar que la fundición Potrerillos reportó resultados negativos de emisión mensual de As en ambos años desde la entrada en vigencia del DS28 MMA.

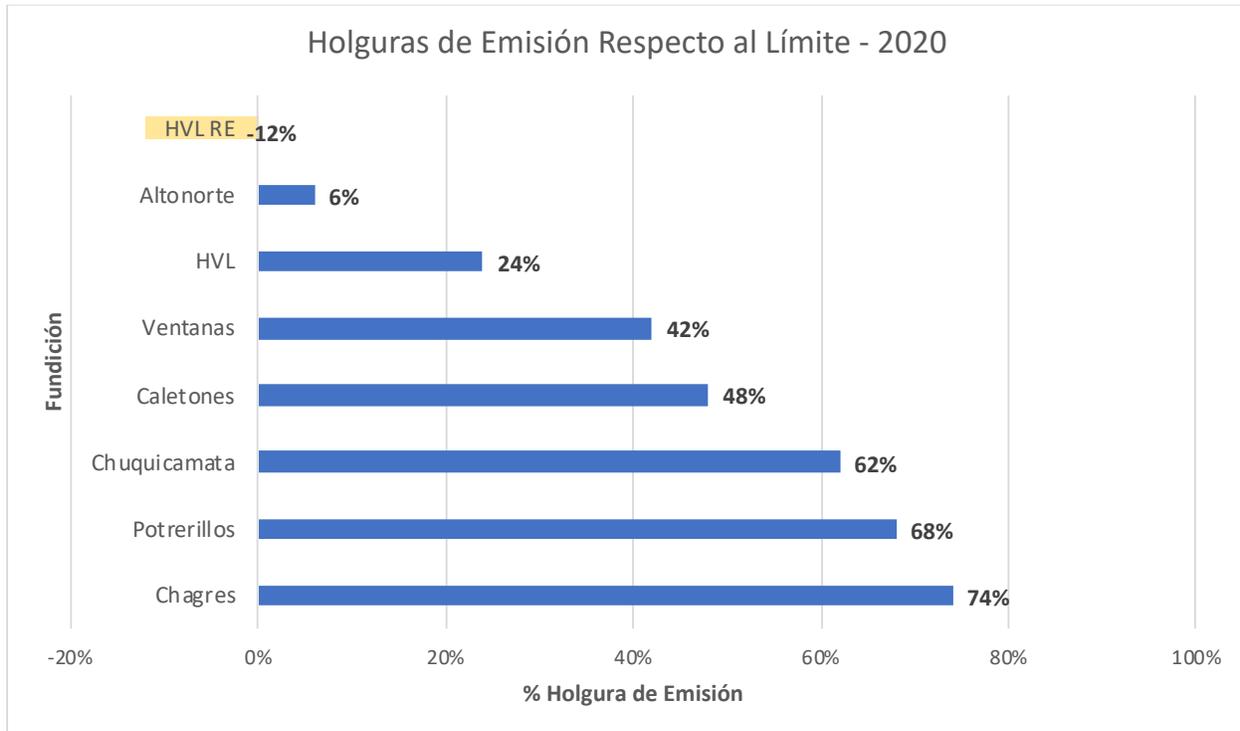
Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos



Nota: Para la fundición HVL, se incluyen los valores obtenidos mediante las emisiones reportadas y los reestimados.

**Figura 3-62 Holguras de emisión respecto al Límite por fundición, año 2019.**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos



Nota: Para la fundación HVL, se incluyen los valores obtenidos mediante las emisiones reportadas y los reestimados.

**Figura 3-63 Holguras de emisión respecto al Límite por fundación, año 2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos

A modo de representación gráfica, se elaboran las Figura 3-62 y Figura 3-63 con el objetivo de analizar visualmente el comportamiento respecto al límite de emisión anual establecido en la norma. Así, también estudiar la magnitud de diferencia por año.

Los valores resultantes indican que la fundación que presenta una menor holgura en el año 2019 respecto al límite de emisión corresponde a la fundación Chagres, registrando un porcentaje de holgura de 9%, lo cual se puede asociar a que no se reportó material de limpieza. Luego, continúa la fundación Altonorte, que para el mismo año registró un porcentaje de holgura del 10% y también no declaró material de limpieza. Por otra parte, en el año 2020, la fundación que presentó el porcentaje de holgura más bajo correspondió a la fundación Altonorte presentando un valor de 6%, en dicho año si reportó material de limpieza y/o mantención, con un valor correspondiente a 13 TMF/año, no obstante, se menciona que dicho valor no es el más alto en comparación a las otras fundaciones. Por otra parte, se observa para la Fundación Altonorte que la disminución en la holgura de emisión entre el año 2019 y 2020 se debe a que en el año 2020 la emisión de As acumulada fue de 131 TMF/año y la emisión anual fue de 118 TMF/año y en el año 2019 la fundación presentó una disminución de 4 TMF/año en su emisión registrando un valor de emisión anual de As, correspondiente a 114 TMF/año, sin embargo, tal como se mencionó anteriormente la Fundación Altonorte presenta un comportamiento desde el año 2017 estable en termino de sus emisiones y porcentaje de captura y fijación.

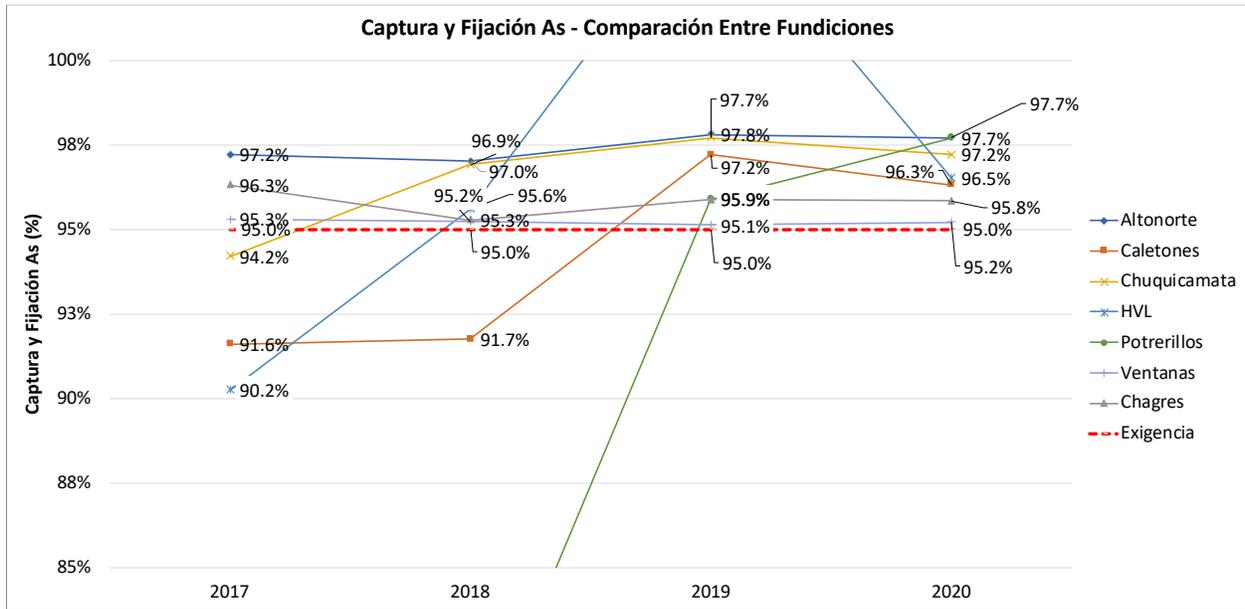
Por otra parte, se puede destacar el margen que ha presentado Chuquicamata, Caletones y Potrerillos el periodo de 2019, contando con un 93%, 83% y 68%, respectivamente. Asimismo, se distingue que, en el año 2020, las fundiciones de Chagres, Potrerillos y Chuquicamata superaron el 62% de holgura de emisiones respecto al límite.

Ahora bien, para el caso de la fundición HVL, se analizan los valores reportados y re-estimados, ya que los valores reportados escapan de la comparación. Es por esto, que la holgura de emisión máxima tiene un valor porcentual bastante alto (135%), el cual se explica por las emisiones negativas reportadas el año 2019, a pesar de no reportar material de limpieza. Posteriormente, el valor de emisión anual de arsénico re-estimado para el año 2020, cuenta con una holgura negativa del -12% del límite máximo.

Entonces, los valores re-estimados de la fundición de ENAMI, permiten contrastar este indicador con las otras fundiciones y con el valor reportado. En este sentido, el valor reestimado de emisión anual de arsénico correspondiente al periodo 2020 es de 19 [TMF], por lo que la holgura del límite de emisión tiene un valor de -12%. Así, el valor reestimado para ENAMI en el último año reportado arroja un incumplimiento del límite específico para la fundición fijado en la norma (17 [TMF/Año]). Por otro lado, la reestimación del periodo 2019 es de 11 [TMF], por lo cual la holgura disminuye considerablemente a un 35%. Por último, cabe destacar que el promedio acumulado de los años 2019 y 2020 para las emisiones re-estimadas tiene una holgura positiva del 12%.

Por su parte, las fundiciones de Ventanas y Caletones mantienen una holgura del límite de emisión superiores al 42% en ambos años. En particular, la fundición Ventanas cuenta con valores similares para los dos periodos anuales, mientras que Caletones reporta una mayor holgura para el año 2019, consistente con la proporción del material de limpieza correspondiente a 23 TMF As/año, el mayor valor registrado para el periodo analizado.

Continuando con la comparación entre fundiciones, es relevante analizar el porcentaje de captura y fijación de arsénico por fundición y año, considerando que la norma de emisión estableció en su artículo N°3 que adicional al cumplimiento del límite máximo de emisión anual de As, las fundiciones simultáneamente deberán cumplir con un porcentaje de captura y fijación del As igual o superior a un 95%. Es importante acentuar que este corresponde a la división entre la emisión acumulada anual y el total presente en la corriente de entrada. Cabe señalar, que este valor no considera el material de limpieza que se resta en la emisión anual, por lo que es la sumatoria aritmética de las emisiones mensuales.



**Figura 3-64 Porcentaje de captura y fijación de As (%) para el periodo 2017-2020.**

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3-64 se marca con línea roja segmentada la exigencia de cumplir con un porcentaje mínimo de captura y fijación, el cual corresponde a un 95%. Se puede observar, que la exigencia de porcentaje de captura y fijación de arsénico de la norma de emisión ha sido cumplida por todas las fundiciones en los últimos dos años reportados, periodo en el cual se encuentra vigente la norma para todas las fuentes emisoras afectas. En la gráfica, no se muestran los valores de HVL para el 2019 por superar el 100% de captura y fijación (dada emisión anual negativa), ni de Potrerillos para los años 2017 y 2018, ya que presentó porcentajes menores a un 85%, registrándose valores de 69,4% y 78,9% respectivamente, cabe mencionar que en dichos años para la fundición potrerillos no se encontraba vigente la norma de emisión.

Entonces, tal como se puede ver en la Tabla 3-20 considerando el periodo 2019-2020, años en que la norma se encontraba en vigencia para todas las fundiciones, se puede observar que los mejores resultados de captura y fijación de arsénico anuales se encuentran en Altonorte y Chuquicamata, con 97,7% y 97,4%, respectivamente. Luego, también se destaca Caletones, la cual en el año 2019 presentó un porcentaje de captación y fijación de arsénico de 96,7%.

**Tabla 3-20 Captura y fijación de As(%) por fundición, período 2017 a 2020**

Fundición	Año	Arsénico Corriente de Entrada Anual [TMF/Año]	Emisión Anual Acumulada [TMF/Año]	% Captura y Fijación Anual de As
Chuquicamata	2017	8.588	499	94,2%
	2018	3.730	117	96,9%
	2019	3.234	73	97,7%
	2020	6.439	195	97,0%
	<b>2019-2020</b>	<b>9.673</b>	<b>268</b>	<b>97,2%</b>
Altonorte	2017	4.192	116	97,2%
	2018	3.873	149	96,2%
	2019	5.090	114	97,8%
	2020	5.615	131	97,7%
	<b>2019-2020</b>	<b>10.705</b>	<b>245</b>	<b>97,7%</b>
Potrerillos	2017	2.794	858	69,3%
	2018	2.287	482	78,9%
	2019	1.290	51	96,0%
	2020	2.225	96	95,7%
	<b>2019-2020</b>	<b>3.515</b>	<b>147</b>	<b>95,8%</b>
HVL	2017	186	20	89,2%
	2018	152	7	95,4%
	2019 (R/RE)	120/120	-6/11	105,0%/90,8%
	2020 (R/RE)	460/460	13/19	97,2%/95,9%
	<b>2019-2020 (R/RE)</b>	<b>580/580</b>	<b>7/30</b>	<b>98,8%/94,8%</b>
Ventanas	2017	821	43	94,8%
	2018	600	30	95,0%
	2019	574	28	95,1%
	2020	585	29	95,0%
	<b>2019-2020</b>	<b>1.159</b>	<b>57</b>	<b>95,1%</b>
Chagres	2017	634	26	95,9%
	2018	673	32	95,2%
	2019	794	33	95,8%
	2020	455	19	95,8%
	<b>2019-2020</b>	<b>1.250</b>	<b>52</b>	<b>95,8%</b>
Caletones	2017	2.039	181	91,1%
	2018	1.788	156	91,3%
	2019	1.654	46	97,2%
	2020	1.997	74	96,3%
	<b>2019-2020</b>	<b>3.651</b>	<b>120</b>	<b>96,7%</b>

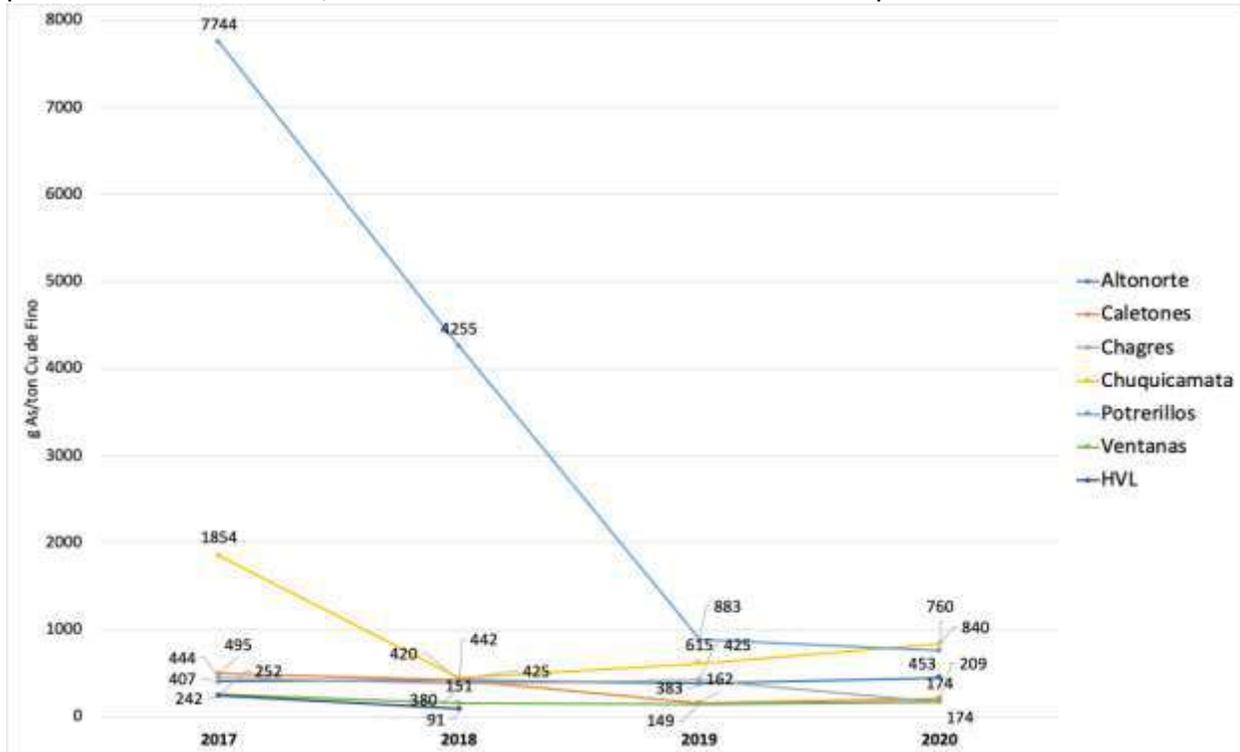
Nota: R corresponde a emisión reportada con cuestionamientos sobre la aplicación de la metodología y su representación de la operación real. RE corresponde a estimación revisada según método basado en intensidad de emisiones promedio declarado por el titular ENAMI para el periodo oct/2020 a sep/2021 y nivel de actividad reportado para los años respectivos.

Para la fundición Potrerillos, año 2019, se utiliza el valor de captación y fijación de arsénico reportado en la rectificación de balances de masa (Resolución Exenta 1915/2020 SMA).

Fuente: Elaboración propia

Por último, se estudia el comportamiento de las fundiciones a través de los años mediante el indicador de desempeño ambiental que asocia el arsénico emitido con los finos de cobre

producidos (ver Tabla 3-21). Cabe mencionar, que además se incluye a la fundición de ENAMI para los años 2019-2020, evaluando una reestimación de todos los parámetros.



**Figura 3-65 Intensidad de emisiones [g As/t Cu fino], periodo 2017 a 2020**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3-21 Intensidad de emisiones [g As/t Cu fino], periodo 2017 a 2020**

Año	DCH	ALN	POT	HVL R/RE (1)	VEN	CHG	CAL
2017	1.854	407	7.744	242	252	192	495
2018	442	425	4.255	91	151	229	420
2019	615	383	883	-77/130	149	276	162
2020	840	453	760	165/237	174	174	209
<b>2019-2020</b>	<b>728</b>	<b>418</b>	<b>822</b>	<b>44/182</b>	<b>162</b>	<b>225</b>	<b>185</b>

- (1) Para los años 2019 y 2020 se presentan los valores reportados y recalculados. R corresponde a emisión reportada con cuestionamientos sobre la aplicación de la metodología y su representación de la operación real. RE corresponde a estimación revisada según método basado en intensidad de emisiones promedio reportado en periodo oct/2020 a sep/2021 y nivel de actividad reportado para los años respectivos.

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, analizando el periodo 2019-2020, se observa que la fundición Potrerillos presenta, la mayor emisión de arsénico por tonelada de cobre fino, con un valor del indicador de 822 [g As/t Cu fino]. Por otra parte, en esta fundición se observa una alta intensidad de emisiones de arsénico reportadas en los años 2017 y 2018, que, si bien se reduce de forma significativa tras la entrada en vigencia de los límites de emisión, es la fundición con mayor intensidad promedio, para el periodo 2019-2020. Cabe mencionar que, en el año 2019, la fundición Potrerillos durante el periodo enero-abril del año 2019 se encontraba en un estado operacional de detención y comenzó a reportar emisiones desde mayo 2019, presentando para los meses, mayo, junio y

agosto del mismo año emisiones negativas. En segundo lugar, de intensidad de emisiones, se encuentra la fundición Chuquicamata, por su parte, ha reportado un promedio acumulado entre los años 2019 y 2020 de 728 [g As/t Cu fino]. La división de Chuquicamata tuvo resultados más altos en el año 2017, cuyo valor correspondió a 1.854 [g As/t Cu fino], pero tras las modificaciones realizadas en el marco del DS28/2013 MMA ha tendido a una reducción relevante de la intensidad de sus emisiones, presentando en los años 2019 y 2020, 615 [g As/t Cu fino] y 840 [g As/t Cu fino] respectivamente. No obstante, se destaca que aún se encuentra en proceso de *ramp-up*, lo cual se traduce en que su intensidad de emisiones, desde el año 2018, ha aumentado en una tasa de 27%.

Luego, la fundición Altonorte presenta un indicador de intensidad de emisiones de 418 [g As/t Cu fino] para el periodo estudiado, con un mínimo de 383 [g As/t Cu fino] para el año 2019, y un máximo de 453 [g As/t Cu fino], correspondiente al año 2020. La fundición de Chagres también tiene un comportamiento de su indicador estable para el periodo 2019-2020, donde el valor de intensidad fue de 225 [g As/t Cu fino].

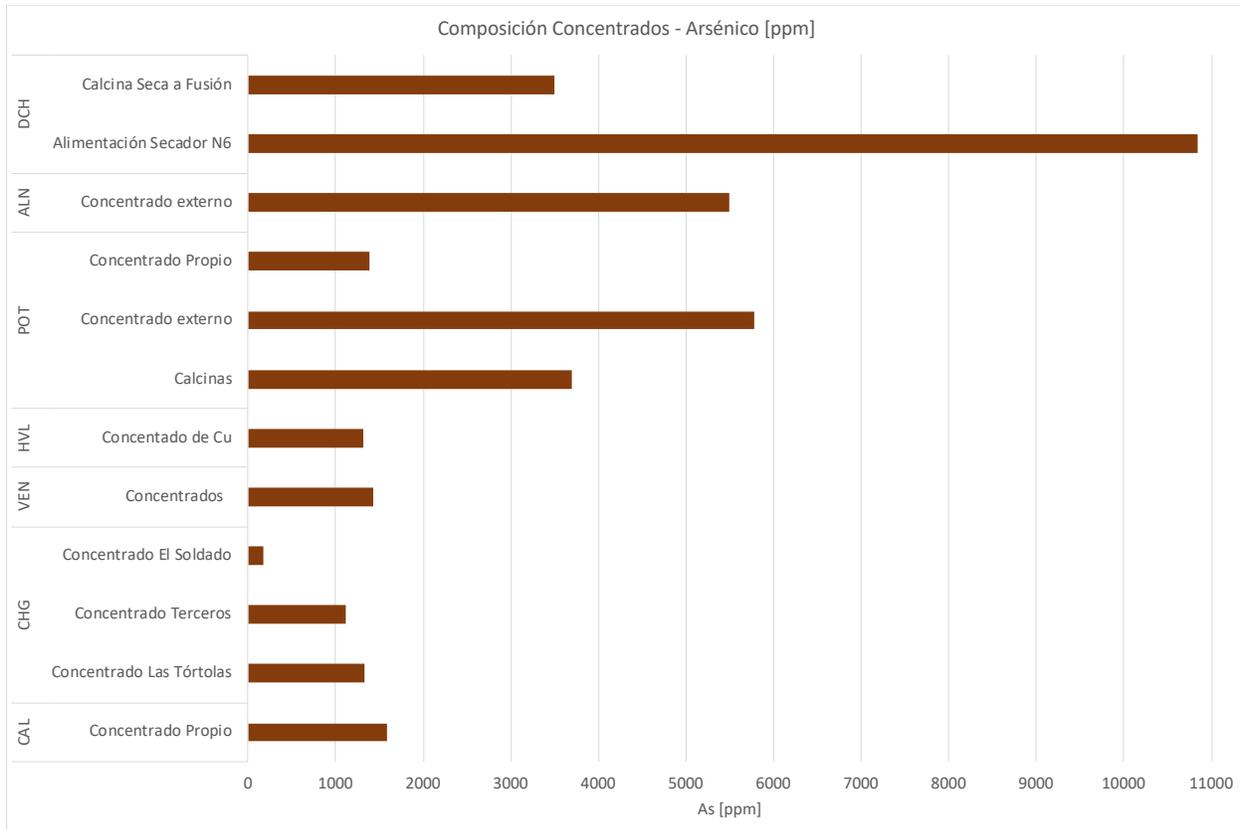
Por su parte, Hernán Videla Lira el indicador reportado es sólo referencial, dada la seguidilla de emisiones negativas provenientes de los balances de masa, eso sí, la reestimación muestra un promedio acumulado del periodo 2019-2020 de 182 [g As/t Fino de Cobre].

Respecto a la fundición Caletones, se puede notar que a partir del año 2019 se alcanza un nivel de intensidad de emisiones de As en torno a 185 [g As/t Cu fino], este indicador bajó a la mitad del reportado en el periodo 2017-2018. Luego, la fundición Ventanas ha tenido un comportamiento más estable desde el año 2019, con un valor promedio en torno a 160 [g As/t Cu fino].

Para complementar el análisis de datos, es importante evaluar la composición de los concentrados, los cuales representan la gran parte de las entradas, tal como se verá más adelante. La Figura 3-66 presenta la composición de arsénico de los concentrados tratados por fundición. En esta, se puede ver que esta concentración es mayor en la fundición Chuquicamata, donde alcanza valores superiores a 10.000 ppm, mientras que Potrerillos y Altonorte se encuentran entre las 5.000-6.000 ppm de concentración de arsénico <sup>48</sup>. Lo señalado anteriormente tiene relación directa con la emisión de este elemento por cobre producido, dado que el indicador de intensidad de emisión de As de la fundición Chuquicamata en el año 2020, presentó el mayor valor de las fundiciones afectas al D.S. 28/2013 MMA, este siendo 840 [g As/t Cu fino].

---

<sup>48</sup> Mayores detalle en el Informe complementario de Norma de Emisión de la presente consultoría, en la sección 3.2.1.8



**Figura 3-66 Contenido Arsénico en concentrados de cobre [ppm], año 2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos periodo 2020

Finalmente, en la Tabla 3-22 se presentan los datos de los principales flujos y su proporción respecto al tipo de corriente. En esta, se puede visualizar la participación del arsénico en las fundiciones, para así poder identificar las corrientes con mayor o menor composición del elemento, además de poder comparar entre fundiciones.

**Tabla 3-22 Principales flujos y su proporción respecto del total por fundición, año 2020**

Fundición	Tipo Flujo	Corriente	Proporción
Chuquicamata	Entradas	Alimentación Secador N5	52%
		Alimentación Secador N6	38%
		Calcina Seca a Fusión	7%
	Salidas	Efluente limpieza de gases	44%
		Escoria descarte HF	18%
		Polvos Captados tolva tripartita	13%
		Polvos Captados HF	10%
		Ánodos	9%
	Variación de Flujos Intermedios/Entradas		-
Altonorte	Entradas	Concentrado Externo	100%
	Salidas	PLS	67%
		Relave	23%

Fundición	Tipo Flujo	Corriente	Proporción
		Ánodos	10%
	Variación de Flujos Intermedios/Entradas	-	-11%
Potrerillos	Entradas	Concentrado Externo	87%
		Concentrado Propio	10%
	Salidas	Efluente limpieza de gases	41%
		Polvo Captado No Recirculado	36%
		Relave	11%
		Ánodos	10%
Variación de Flujos Intermedios/Entradas	-	-18%	
HVL	Entradas	CNU CT	100%
	Salidas	Ácido Sulfúrico Grado C	39%
		Escoria a Botadero	25%
		Ánodos	20%
		Otras Producciones	16%
Variación de Flujos Intermedios/Entradas	-	-16%	
Ventanas	Entradas	Concentrado Propio	88%
		Restos de Ánodos Ventanas	6%
		Restos de Ánodos Teniente	4%
		Restos de Ánodos HVL	2%
		Polvo de filtro gases del CT (PEPA)	42%
	Salidas	Ánodos Corrientes	25%
		Ácido Sulfúrico Grado C	15%
		Ánodos Hojas Madres	7%
		Escoria de descarte	7%
Variación de Flujos Intermedios/Entradas	-	-11%	
Chagres	Entradas	Concentrado Las Tórtolas	81%
		Concentrado Externo	10%
		Concentrado El Soldado	7%
	Salidas	Escoria a Botadero	55%
		Ácido Sulfúrico Grado C	27%
		Ánodos	15%
Variación de Flujos Intermedios/Entradas	-	2%	
Caletones	Entradas	Concentrado Propio	100%
	Salidas	Residuo Arsenical	58%
		Relave PFE	17%
		Ánodos	14%
		Variación de Flujos Intermedios/Entradas	-

Fuente: Elaboración propia en base a reportes de titular a SMA

A modo de análisis de los flujos en los balances de masa de arsénico, se estudian los flujos, disgregándolos por corriente, para obtener información relevante acerca de la composición de aquellos. En la Tabla 3-22, se informa el valor de la proporción porcentual de las corrientes más relevantes, respecto al total de finos de arsénico del flujo correspondiente del balance másico (Entrada o Salida), por fundición. Luego, se procede a calcular la relación entre la variación de flujos intermedios (diferencia entre existencia final e inicial) y las entradas totales. El resultado

obtenido de este último indicador tiene la intención de examinar cuánto implica la entrada en la variación de flujos intermedios. Además, los valores negativos significan que la existencia inicial es menor a la final, en un periodo acumulado anual.

Entonces, en primer lugar, se puede notar que todas las fundiciones tienen como principal entrada los concentrados, los cuales son catalogados entre propios o externos. Entre las fundiciones, se puede observar que Caletones, Chuquicamata, Chagres y Ventanas tienen como principal concentrado los de su producción. También, se pueden notar otras corrientes en los flujos de entradas, tal como restos de ánodos en la fundición Ventanas o calcina seca a fusión en Chuquicamata, los cuales tienen una contribución del 12% y 7%, respectivamente.

Ahora bien, para las corrientes de salida, las corrientes tienen más dispersión, donde se puede ver que los efluentes de limpieza de gases son los principales para Chuquicamata y Potrerillos, con 44% y 41%, respectivamente. También, la escoria de descarte, o escoria a botadero, cuenta con contribuciones considerables en la fundición Chagres, Chuquicamata, HVL, y en un menor nivel a Ventanas. Por otro lado, Altonorte y Caletones tienen una contribución de 23% y 17%, respectivamente, mientras que para Potrerillos se obtiene un 11%.

En el mismo sentido, dentro de las corrientes de salida que cuentan con proporción considerable, pero de menor valor, se encuentran los ánodos. Esta corriente corresponde al cobre producido, el cual tiene un orden del 9% al 25%, donde para Ventanas es la corriente de salida más relevante en finos de arsénico.

Luego, respecto a los flujos de inventario/existencia intermedios, se encuentran variadas relaciones entre fundición, donde las fundiciones de Chuquicamata y Chagres cuentan con una relación positiva, lo que quiere decir que hubo más circulante en el periodo acumulado anual, aunque, con valores pequeños en relación a la entrada total, con un 2% y 1%, respectivamente. Las fundiciones que cuentan con mayor implicancia en este indicador son Potrerillos y HVL.

### **3.4 Proyección de inventario**

A continuación se presenta la metodología y supuestos de proyección (Sección 3.4.1), así como los resultados de la implementación de la metodología (Sección 3.4.2).

#### **3.4.1 Metodología de proyección**

De acuerdo a las bases técnicas del estudio, se requiere una proyección de 15 años, es decir, del año 2020 (año base inventario) al año 2035. El desarrollo de una proyección es un ejercicio sujeto a incertidumbre, donde se combina la incertidumbre propia de la estimación de las emisiones, con la incertidumbre de la proyección de la actividad de las fuentes emisoras. En este marco se destaca que en la medida que el horizonte de evaluación aumenta, aumenta también la incertidumbre asociado a que la proyección de la situación futura es un ejercicio que depende de aún más supuestos. Pequeñas diferencias supuestos pueden resultar en variaciones relevantes en el largo plazo. Por ejemplo, ante una situación de crecimiento anual constante, si suponemos

una tasa de 3% en cinco años tendríamos un crecimiento acumulado de 16% mientras que, si consideramos 4%, en los mismos años tendríamos un crecimiento de 22%. En un periodo más largo, por ejemplo 15 años, la tasa de 3% implica un crecimiento de 56%, mientras que una tasa de 5% implica un crecimiento de 80%.

El ejemplo anterior pretende ilustrar que las proyecciones deben ser interpretadas como un ejercicio prospectivo, que refleja un set particular de supuestos de proyección y que, como todo ejercicio de proyección, está sujeto a variables cuyo valor futuro es incierto, y luego los resultados también están sujetos a incertidumbres.

En particular para la proyección del inventario de arsénico descrito anteriormente se considera tres posibles orígenes de variación respecto del inventario base presentado en la Sección 3.2: (1) apertura de nuevas fuentes de emisión o cierre de fuentes existentes; (2) cambios tecnológicos que puedan alterar las tasas de emisión; y (3) cambios en los niveles de actividad de las fuentes existentes. A continuación, se presenta el detalle para cada una de ellos.

Cabe destacar que las emisiones de arsénico corresponden fundamentalmente a las emisiones de las fundiciones de cobre, mientras que un segundo grupo corresponde a número menor de fuentes (85) corresponden a termoeléctricas cuya contribución corresponde a >0,1%. De ellas las principales contribuidoras corresponde a las termoeléctricas que combustionan carbón. Un tercer grupo, cerca de 4.800 fuentes adicionales, representan <0,1% de las emisiones. El bajo peso específico de las fuentes de este grupo resulta en que se proyecte su emisión igual a la emisión estimada para el año 2020. Si bien pueden existir cambios, su efecto es bastante menor que la incertidumbre asociada a las fuentes principales.

### **(1) Apertura de nuevas fuentes de emisión o cierre de fuentes existentes**

Las principales fuentes de emisión de arsénico corresponden a las fundiciones de cobre, y en segundo lugar o a fuentes que combustionen carbón. Respecto a las fundiciones de cobre, no se cuentan con antecedentes<sup>49</sup> que permitan proyectar la apertura de una nueva fundición de cobre en territorio nacional, de la misma forma tampoco se espera el cierre de ninguna de las fundiciones. Lo anterior se reflejan en la última proyección de la producción de cobre de Coquilco<sup>50</sup> (2021), donde hasta el año 2032 sólo se esperan variaciones en las actividades de las fuentes existentes.

Por su parte, en el marco de los esfuerzos de mitigación de las emisiones GEI del país, se generó el plan de descarbonización de la matriz energética, en el cual las empresas se comprometen a

---

<sup>49</sup> Algún programa de candidato a la presidencia menciona la posibilidad de crear una nueva fundición, sin entregar mayores antecedentes de capacidad, ubicación o plazos. Se considera que este antecedente no es suficiente certero para incluir una nueva fundición en las proyecciones.

<sup>50</sup> Proyección de la producción de cobre en Chile 2021 – 2032

no iniciar desarrollo de nuevos proyectos a carbón que no cuenten con sistemas de captura y almacenamiento de carbono. El costo de esta tecnología es privativo, lo que resulta en que las proyecciones del sistema energético, notablemente la PELP<sup>51</sup>, no consideren la incorporación de nuevas centrales a carbón. Más aún el plan contempla la meta del cierre de todas las centrales de carbón hacia el año 2040, comprometiendo el cierre de 8 centrales para antes del año 2024. Desde el anuncio del plan se han realizado algunos anuncios que han confirmado el cierre de otras de las centrales existentes. A pesar de la existencia del plan y de los anuncios adicionales, no se cuenta con plazos definidos para el cierre del resto de las centrales a carbón. Respecto a esto, se considera como referencia de plazos un cronograma de cierre que el Coordinador Eléctrico utilizó durante el estudio de los impactos del cierre de las centrales a carbón. Con todo lo anterior el cronograma de cierre considerado se presenta en la Tabla 3-23.

**Tabla 3-23 Cronograma de cierre de centrales a carbón considerado en proyección**

Central	Primer año de no operación	Comentario respecto a año de cierre considerado
Central termoeléctrica bocamina u1	2021	Plan de retiro y/o reconversión de unidades a carbón Minenergía (2019)
Central termoeléctrica ventanas unidad 1	2021	Plan de retiro y/o reconversión de unidades a carbón Minenergía (2019)
Central térmica Tocopilla	2022	Plan de retiro y/o reconversión de unidades a carbón Minenergía (2019)
Central termoeléctrica ventanas unidad 2	2023	Plan de retiro y/o reconversión de unidades a carbón Minenergía (2019)
Central térmica mejillones	2025	Plan de retiro y/o reconversión de unidades a carbón Minenergía (2019)
Central termoeléctrica Angamos	2026	Anuncio 6 de julio 2021
Central termoeléctrica Campiche	2026	Anuncio 6 de julio 2021
Central termoeléctrica nueva ventanas	2026	Anuncio 6 de julio 2021
Central termoeléctrica nueva Tocopilla	2027	En base a cronograma del Coordinador Eléctrico Nacional
Central Tarapacá	2032	En base a cronograma del Coordinador Eléctrico Nacional
Central térmica andina	2036	En base a cronograma del Coordinador Eléctrico Nacional
Guacolda	2034	En base a cronograma del Coordinador Eléctrico Nacional
Complejo termoeléctrico Santa maría	2038	En base a cronograma del Coordinador Eléctrico Nacional
Central termoeléctrica Cochrane	2039	En base a cronograma del Coordinador Eléctrico Nacional

Fuente: Elaboración propia

## (2) Cambios tecnológicos que puedan alterar las tasas de emisión

Respecto a posibles cambios tecnológicos que puedan alterar las tasas de emisión, se observa que actualmente las principales fuentes cuentan con normas de emisión, cuyos límites de emisión se estarían cumpliendo satisfactoriamente. Asimismo, las centrales a carbón han estado

---

<sup>51</sup> Planificación Energética de Largo Plazo – Proceso 2020: <https://energia.gob.cl/planificacion-energetica-de-largo-plazo-proceso>

sujetas a un impuesto sobre sus emisiones de dióxido de carbono, MP, NOx y SO<sub>2</sub>, lo cual es un incentivo para lograr niveles de emisión aun menores que los exigidos por la norma. En vista de lo anterior, en la proyección de las emisiones no se considera ningún cambio tecnológico que pudiera variar las tasas de emisión.

### (3) Cambio en los niveles de actividad de las fuentes existentes

Respecto a cambios en los niveles de actividad, COCHILCO proyectó que hasta el 2032, habrá pequeñas variaciones en la medida que se realizan mejoras operativas, así como las fundiciones terminan de adaptarse a los cambios tecnológicos que implicó la implementación del DS28/2013 del MMA. De esta forma se espera que las fundiciones pasen de una producción cercana a las 1.300 kt de Cu hasta una producción cercana a 1.500 kt hacia fines de la década. Para la proyección para los 3 años posteriores al año 2032, se considera que se mantiene el nivel productivo del año 2032, es decir, una producción de 1.530 kt desde las fundiciones.



**Figura 3-67 Proyección de producción de concentrados de cobre refinados y sin refinar**

Fuente: (Cochilco, 2021)

Respecto a las centrales de carbón, la proyección de su nivel de actividad es un ejercicio complejo en la medida que su operación es definido por el Coordinador Eléctrico Nacional en virtud de minimizar los costos marginales del sistema. En este sentido la proyección a 2035, se ve afectada por variables tan complejas de proyectar como la hidrología, la instalación de nuevas centrales de generación, los costos de sistemas de respaldos, la proyección de líneas de transmisión, y la demanda agregada del sistema eléctrico. Sin perjuicio de lo anterior, considerando que las centrales a carbón tienen el costo marginal más bajo de las centrales termoeléctricas, es

esperable que su uso se mantenga relativamente constante, más aún cuando las salidas de algunas de las centrales a carbón van a aumentar la presión por el uso de centrales térmicas de bajo costo. En este sentido se realiza el supuesto de que la proyección a futuro de las emisiones de las centrales termoeléctrica será igual a la del año base. Lo anterior se conjuga con el plan de cierre discutido anteriormente.

### 3.4.2 Resultados de la proyección

En la Tabla 3-24 se presentan la proyección de la estimación de emisiones de arsénico hasta el año 2035. El crecimiento en los niveles de producción proyectados por Cochilco, se reparte entre las fundiciones que actualmente operan con menor factor de planta. De esta forma, se proyecta que desde el año 2025 todas las fundiciones procesaran un nivel de concentrados que implica que todos tengan un factor de planta superior a 88%. Lo anterior se traduce en que fundiciones que el año 2020 tienen factores de planta más bajos como Chuquicamata (57%), Potrerillos (74%) o Chagres (79%), aumentan sus niveles de procesamiento y, como consecuencia, sus niveles de emisión. Los valores resultantes de esta estimación se presentan en la Tabla 3-24. Asimismo, en el caso de HVL ante la falta de reporte para las emisiones 2020, se asume que en el futuro cumple con los límites de emisión del DS28/2013.

Se observa que en el período se alcanza un peak de emisiones en los años 2025-2030, lo cual se explica por ser los años en que se espera el mayor nivel de actividad de acuerdo a la proyección de COCHILCO (ver Figura 3-66). En general se observa que las emisiones de las fundiciones y de la planta de tostación aumentan en 25%, mientras que las emisiones de las otras fuentes se reducen en un 35% asociado al proceso de descarbonización de la matriz energética, impulsadas por las termoeléctricas que reducen su emisión en un 90%. Lo anterior, resulta en que el peso específico de las otras fuentes en su conjunto en el inventario es aún menor alcanzando sólo un 0,06% del inventario total.

**Tabla 3-24 Proyección de inventario de arsénico [ton/año], 2020-2035**

Tipo fuente	Fuente	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	
Fundiciones	Chuquicamata	180,8	191,3	272,3	272,3	272,3	283,3	283,3	283,3	283,3	283,3	283,3	279,7	281,5	281,5	281,5	281,5	
	Altonorte	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	122,5	122,5	122,5	122,5	122,5	122,5	120,9	121,7	121,7	121,7	121,7	
	Potreriillos	51,0	53,8	60,9	60,9	60,9	63,3	63,3	63,3	63,3	63,3	63,3	62,5	62,9	62,9	62,9	62,9	
	HVL	18,7	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
	Ventanas	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,2	29,4	29,4	29,4	29,4
	Chagres	8,6	8,6	9,6	9,6	9,6	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	9,8	9,9	9,9	9,9	9,9
	Caletones	67,0	67,0	67,0	67,0	67,0	69,8	69,8	69,8	69,8	69,8	69,8	69,8	68,9	69,3	69,3	69,3	69,3
Planta Tostación	Ministro Hales	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Otras fuentes	Termoeléctrica	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	Otras fuentes	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
<b>Total</b>		<b>473,0</b>	<b>484,6</b>	<b>573,6</b>	<b>573,6</b>	<b>573,6</b>	<b>596,2</b>	<b>596,1</b>	<b>595,9</b>	<b>595,9</b>	<b>595,9</b>	<b>595,9</b>	<b>588,4</b>	<b>592,2</b>	<b>592,2</b>	<b>592,2</b>	<b>592,2</b>	

Fuente: Elaboración propia

## 4. Efectos en salud y coeficientes de riesgo

El presente capítulo contiene la metodología y resultados de la recopilación y sistematización de información científica disponible relacionada con los efectos en la salud humana de la exposición a arsénico, y sus distintas formas químicas, en el aire.

### 4.1 Caracterización de efectos adversos en salud asociados a la exposición de arsénico en el aire

En las siguientes Secciones se explicitan las fuentes de información consultadas (ver Sección 4.1), una presentación de los antecedentes generales (ver Sección 4.2) y un detalle completo de los efectos adversos del arsénico sobre los diferentes sistemas (ver Sección 4.3).

#### 4.1.1 Fuentes de información consultadas

Para caracterizar los efectos adversos en la salud asociados a la exposición de arsénico en el aire, se elaboró un perfil toxicológico del metaloide y sus formas químicas disponibles, mediante la recopilación y revisión de información científica relacionada a exposiciones ambientales. La información recopilada se encuentra en el **“Anexo B: revisión bibliográfica efectos en salud”**, adjunto en formato digital. Las bases de datos revisadas fueron:

- MEDITEXT® Medical Management Database
- INFOTEXT® Database for Regulations, Standards & General Information
- HAZARTEXTTM Hazard Management Database
- REPROTEXT® Reproductive Hazard Reference Database
- CHRIS (Chemical Hazard Response Information System)
- IRIS (Integrated Risk Information System)
- New Jersey Fact Sheets
- HSDB® (Hazardous Substances Data Bank)
- NIOSH Pocket Guide
- RTECS® Registry of Toxic Effects of Chemical Substances
- REPRORISK® System
- REPROTEXT® Reproductive Hazard Reference Database
- TERIS (Teratogen Information System)
- Shepard's Catalog of Teratogenic Agents
- REPROTOX® Reproductive Hazard Information Database
- ATSDT ToxFAQs™ (Agency for toxic substances and disease registry)
- Risk Assessment Information System (RAIS) Toxicity Profiles.
- Organización Mundial de Salud (OMS)

#### 4.1.2 Antecedentes generales

El arsénico es un elemento natural que se distribuye ampliamente en la corteza terrestre. Es clasificado químicamente como un metaloide, que corresponde a los elementos que poseen propiedades tanto metálicas como no metálicas. El arsénico se encuentra generalmente en el medio ambiente combinado con otros elementos como oxígeno, cloro y azufre en su forma inorgánica, y combinado con carbono e hidrógeno en su forma orgánica (ATSDR, 2007).

El arsénico puede emitirse al aire desde fuentes naturales, como a partir del polvo por rachas de viento o por erupciones volcánicas, o por la acción antropogénica, como en procesos de extracción y fundición de minerales, funcionamiento de plantas de energía u otros procesos de combustión de carbón (ATSDR, 2007). La mayoría de las emisiones de arsénico provocadas por el hombre que provienen de fundiciones de metales y la combustión de combustibles, el arsénico se emite principalmente en forma de arsenitos ( $As_2O_3$  o como sales del ácido correspondiente) o arseniatos ( $As_2O_5$  o las sales del ácido arsénico) (European Commission, 2000).

El arsénico presente en la materia es emitido al medioambiente adherido generalmente a pequeñas partículas que puede permanecer en el aire durante muchos días y viajar largas distancias. En cambio el arsénico contenido en el suelo que se puede incorporar al aire por la acción del viento, generalmente se encuentra en partículas más grandes las cuales se depositan en el suelo o son abatidas por la lluvia (ATSDR, 2007).

El arsénico es un reconocido tóxico que puede estar en variadas formas químicas tanto orgánicas como inorgánicas. En la mayoría de los casos la toxicidad inducida por arsénico en humanos se debe a la exposición a formas inorgánicas del metaloide, a través del consumo de alimentos, agua aire y exposiciones ocupacionales, pero no a las formas orgánicas presentes en peces y mariscos principalmente (Costa, 2019). Las formas orgánicas de arsénico son considerablemente menos tóxicas en comparación a las inorgánicas. (ATSDR, 2007).

El arsénico afecta a casi todos los procesos celulares y funciones de los órganos de nuestro cuerpo. La ingesta de arsénico es generalmente la vía de exposición más importante, mientras que la inhalación normalmente aporta menos del 1% de la dosis total (European Commission, 2000).

Los compuestos trivalentes de arsénico son más solubles en agua que los compuestos de arsénico pentavalente y, por lo tanto, son más tóxicos por naturaleza. Las formas reducidas (As trivalente (III)) y oxidadas (As pentavalentes (V)) de arsénico, pueden absorberse y acumularse en tejidos y fluidos corporales. La distribución del arsénico en el cuerpo es bastante constante, pero se distribuye ampliamente en órganos como la piel, los pulmones, el hígado y los riñones. En el hígado, el metabolismo del arsénico implica metilación enzimática y no enzimática. El arsénico inorgánico se reduce de pentóxido a trióxido mediante procesos enzimáticos o no enzimáticos (glutación). Aproximadamente el 70% de arsénico (tanto de tipo orgánico como inorgánico) se excreta a través del sistema renal a través de la orina. El arsénico inorgánico se retiene en el

cuerpo más tiempo que el arsénico orgánico y el proceso de excreción de As inorgánico es más prolongado (Mohammed Abdul, Jayasinghe, Chandana, Jayasumana, & De Silva, 2015).

Dependiendo del tipo de exposición al arsénico (es decir, aguda o crónica), el desarrollo de síntomas clínicos varía. Sin embargo, los síntomas de la exposición aguda se desarrollan mucho más rápidamente, mientras que los síntomas clínicos de la exposición crónica al arsénico se desarrollan durante un período prolongado de exposición. En casos de toxicidad aguda por arsénico, se pueden producir daños en los órganos que pueden provocar la muerte. La mayor parte de los efectos adversos a la salud derivados de la exposición al arsénico descritos en la literatura están asociados a reportes de casos de intoxicación aguda (corto plazo) por la ingesta tanto accidental como intencional (suicidas) de las distintas formas químicas del metaloide, siendo menor la información de efectos a la salud derivados de la exposición por la vía inhalatoria (Mohammed Abdul et al., 2015).

#### **4.1.3 Efectos adversos en salud asociados a la exposición de arsénico en el aire**

En las siguientes subsecciones se presentan los principales efectos del arsénico en distintos sistemas de órganos del cuerpo humano que puede asociarse a la exposición por vía inhalatoria. Se incluyen los siguientes sistemas:

- Sistema nervioso
- Sistema respiratorio
- Sistema cardiovascular
- Sistema circulatorio
- Sistema hepático
- Sistema renal
- Sistema reproductivo y del desarrollo
- Desarrollo de cáncer<sup>52</sup>

##### **4.1.3.1 Sistema nervioso**

Neurológicamente hablando el sistema nervioso periférico es un órgano diana clave de la toxicidad del arsénico. El desarrollo de complicaciones neurológicas debido a la exposición aguda y crónica al arsénico es bastante rápido y, generalmente, se informa como neuropatía sensitivomotora simétrica (Mohammed Abdul et al., 2015). Algunos de los síntomas clínicos más comunes incluyen parestesia, dolor y entumecimiento en las plantas de los pies debido a la disminución de la capacidad de las neuronas para desintoxicar especies reactivas de oxígeno (ROS) y la producción de glutatión. El estrés oxidativo se considera una de las principales causas de neurotoxicidad inducida por arsénico, también el arsénico es capaz de inducir la apoptosis neuronal (Nordberg, 2021), (ATSDR, 2016), (Micromedex, 2021a), (HazardText, 2021a).

---

<sup>52</sup> No corresponde a un sistema, pero dada su relevancia se presenta como una subsección propia.

#### 4.1.3.2 Sistema respiratorio

La exposición al arsénico a través del agua potable o por exposición ocupacional puede provocar complicaciones respiratorias con el tiempo. Existe numerosa evidencia sobre la correlación de la disfunción pulmonar relacionada con la exposición al arsénico y el aumento de la tasa de mortalidad debido a enfermedades respiratorias. La inhalación de polvo o vapores de arsénico puede producir complicaciones respiratorias como tos crónica, laringitis, bronquitis y rinitis (Mohammed Abdul et al., 2015). Algunos de los síntomas respiratorios clínicos comunes observados en un estudio de cohorte incluyen tos crónica, ruidos en el pecho, dificultad para respirar, sangre en el esputo y otros problemas respiratorios (ATSDR, 2016), (Micromedex, 2021a), (HazardText, 2021a).

#### 4.1.3.3 Sistema cardiovascular

La sobre exposición a altas dosis de arsénico tiene una correlación con enfermedades cardiovasculares (síndrome coronario agudo, arritmia, hipertensión, insuficiencia arterial, trombosis y aterosclerosis). De esta forma, la exposición al arsénico constituye un factor de riesgo para el desarrollo de patologías cardiovasculares, tal como lo son el tabaquismo, la obesidad, el sedentarismo, la Diabetes Mellitus, la malnutrición por exceso, la dislipidemia, entre otros factores de riesgo (Mohammed Abdul et al., 2015), (ATSDR, 2016), (Micromedex, 2021a), (HazardText, 2021a).

#### 4.1.3.4 Sistema circulatorio

Inmediatamente después de la exposición, el arsénico entra en la circulación sistémica. La mayoría del arsénico se une principalmente a la hemoglobina y se acumula en los eritrocitos, lo que induce la hemólisis. La hemólisis señalada genera anemia. Luego, además de esta anemia hemolítica, el arsénico puede causar otros efectos hematológicos en el contexto de la exposición crónica, particularmente leucopenia y trombocitopenia. Estos hallazgos hematológicos pueden encontrarse cada uno de forma independiente y aislada, o pueden encontrarse asociados entre sí. De esta forma, los tres tipos de efecto señalados pueden encontrarse de manera sincrónica, lo que se denomina pancitopenia (Mohammed Abdul et al., 2015), (ATSDR, 2016), (Micromedex, 2021a), (HazardText, 2021a).

#### 4.1.3.5 Sistema hepático

La acumulación de arsénico en el hígado después de exposiciones repetidas es relativamente mayor y propensa a una mayor toxicidad hepática. El metabolismo del As inorgánico tiene lugar en el hígado para luego excretarse a través de la orina. La exposición crónica al arsénico puede causar insuficiencia hepática crónica relacionada con una cirrosis hepática de origen tóxico, lo cual va seguido del desarrollo de hipertensión portal. Producto de esto es que se observa hemorragia digestiva alta debido a ruptura de várices esofágicas, junto con ascitis, ictericia y

hepatomegalia (aumento de tamaño del hígado). Consecuentemente con esto, se observa un aumento de las enzimas hepáticas en los análisis de laboratorio (Mohammed Abdul et al., 2015), (Micromedex, 2021a), (HazardText, 2021a).

#### **4.1.3.6 Sistema renal**

Durante el proceso de eliminación de arsénico a través del sistema renal, la acumulación de arsénico en los riñones produce citotoxicidad en el tejido renal. Niveles por sobre el rango normal de creatinina sérica, nitrógeno ureico en sangre y proteinuria son algunas de las manifestaciones clínicas seguidas de lesión renal (necrosis tubular aguda) por toxicidad por arsénico. Además, se ha informado de una asociación positiva entre la exposición al arsénico y la aparición de albuminuria y proteinuria (Mohammed Abdul et al., 2015), (Micromedex, 2021a), (HazardText, 2021a).

#### **4.1.3.7 Sistema reproductivo y del desarrollo**

Los estudios en animales han demostrado toxicidad para la reproducción y el desarrollo debido a la exposición al As inorgánico. La exposición al arsénico puede causar retardo del crecimiento intrauterino y puede ser factor de riesgo para abortos, mortinatos y muerte perinatal. El arsénico afecta los órganos sexuales masculinos y femeninos y puede causar problemas de fertilidad en ambos sexos. En los hombres, el arsénico puede inducir disfunción de las gónadas a través de la disminución de la síntesis de testosterona, apoptosis y necrosis (Mohammed Abdul et al., 2015), (Micromedex, 2021a), (HazardText, 2021a).

#### **4.1.3.8 Exposición al arsénico y desarrollo de cáncer**

El arsénico es un carcinógeno humano bien conocido desde finales del siglo XVII y ha sido clasificado como carcinógeno de grupo 1 por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) con evidencia de apoyo de la inducción de carcinogenicidad en humanos. La exposición al arsénico ha demostrado la capacidad de inducir tumorigénesis en humanos en la piel, pulmón, vejiga, hígado y próstata (Mohammed Abdul et al., 2015). Sin embargo, es importante considerar que la exposición oral está asociada con cáncer de vejiga, pulmón y piel, mientras que la exposición por inhalación está asociada sólo con cáncer de pulmón. Por el contrario, algunos efectos no cancerosos (p. Ej. , Lesiones cutáneas, efectos neurotóxicos) son comunes a ambas vías (ATSDR, 2007), (Micromedex, 2021a), (HazardText, 2021a).

#### 4.1.3.9 Resumen de efectos adversos de salud

A continuación, se presenta un resumen de los efectos adversos en salud asociados a la exposición por vía inhalatoria (en negro) y otras vías (en rojo) de las especies químicas de arsénico con información disponible.

**Tabla 4-1 Efectos agudos no carcinogénicos según forma química de arsénico**

Órgano/sistema	Arsénico inorgánico	Trióxido de arsénico	Tricloruro de arsénico	Pentóxido de arsénico	Arsina
	Cas: 7440-38-2	Cas: 1327-53-3	Cas: 7784-34-1	Cas: 1303-28-2	Cas: 7784-42-1
<b>Nervioso</b>	Coma, encefalopatía tóxica, neuropatía, tetraplejía, convulsiones, amnesia	Encefalopatía tóxica, neuropatía, temblor, coma, convulsiones, mareos, dolor de cabeza, neuropatía periférica, pseudo tumor cerebral, fatiga	Encefalopatía tóxica, neuropatía periférica secundaria,	Encefalopatía tóxica, neuropatía, convulsiones	Jaqueca
<b>Respiratorio</b>	Apnea, lesión pulmonar, bronquitis	Insuficiencia respiratoria aguda, lesión pulmonar aguda, síndrome de distrés respiratorio agudo, disnea, sangrado de nariz, tos, hipoxia, derrame pleural, neumonitis	Edema de laringe, síntoma de irritación de membranas mucosas de nariz y garganta, lesión pulmonar aguda, apnea, lesión pulmonar aguda,	Tos, apnea, lesión pulmonar aguda, síndrome de distrés respiratorio agudo	Insuficiencia respiratoria aguda, derrame pleural
<b>Cardiovascular</b>	Arritmia cardíaca, hipotensión	Taquicardia ventricular, torsade de pointes, hipotensión, cardiomiopatía, arritmia cardíaca, bradicardia, intervalo QT prolongado, edema	Arritmia cardíaca	Arritmia cardíaca, hipovolemia por filtración capilar, hipotensión	Arritmia cardíaca, hipotensión
<b>Circulatorio</b>	Hemólisis, pancitopenia, anemia, leucopenia, coagulación intravascular diseminada	Hemólisis, pancitopenia, leucocitosis, mielo supresión, anomalías de la coagulación, anemia,	Hemólisis, pancitopenia,	Hemólisis, pancitopenia, anemia, coagulación intravascular diseminada	Hemólisis, leucocitosis
<b>Endocrino</b>	Hiperglicemia	Hiperglicemia		Hiperglicemia	

Órgano/sistema	Arsénico inorgánico Cas: 7440-38-2	Trióxido de arsénico Cas: 1327-53-3	Tricloruro de arsénico Cas: 7784-34-1	Pentóxido de arsénico Cas: 1303-28-2	Arsina Cas: 7784-42-1
<b>Hepático</b>	Daño hepático, enzimas hepáticas anormales. Falla hepática	Daño hepático, enzimas hepáticas aumentadas, lesión de hígado	Daño hepático	Daño hepático	Ictericia, enzimas hepáticas aumentada, hepatomegalia
<b>Renal</b>	Falla renal	Falla renal, nefrotoxicidad,	Falla renal	Falla renal	Falla renal
<b>Reproductivo y del desarrollo</b>	Efectos en el embarazo: nacimiento de un bebé muerto, trastornos del embarazo	Efectos en el embarazo: muerte neonatal, muerte fetal,	Efectos en el embarazo: muerte neonatal	Efectos en el embarazo: muerte neonatal, encefalopatía, incremento abortos espontáneos, toxicidad fetal	
<b>Dermatológico</b>	Líneas de mees, herpes, quemaduras (prurito, Rush cutáneo)	Trastornos dérmicos (rubor, diaforesis, hiperqueratosis palmar, edema periférico y dermatitis exfoliativa), piel seca, prurito, dermatitis de contacto, líneas de mees	Irritación cutánea, erupción bulbosa, envenenamiento, dermatitis (rubor, diaforesis, hiperqueratosis palmar, edema periférico y dermatitis exfoliativa), línea de mees.	Dermatitis.	
<b>Gastrointestinal</b>	Gastroenteritis	Dolor abdominal, vómitos, diarrea acuosa o sanguinolenta, debilidad y enrojecimiento de la piel	Irritación gastrointestinal, hemorragia gastrointestinal, gastroenteritis	Gastroenteritis, sabor a ajo	Náuseas y vómitos, pérdida de apetito, dolor abdominal
<b>Otros efectos</b>	Deshidratación, hipocalemia				

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4-2: Efectos crónicos no carcinogénicos según forma química de arsénico**

Órgano/sistema	Arsénico inorgánico	Trióxido de arsénico	Tricloruro de arsénico	Pentóxido de arsénico	Arsina
	Cas: 7440-38-2	Cas: 1327-53-3	Cas: 7784-34-1	Cas: 1303-28-2	Cas: 7784-42-1
<b>Nervioso</b>	Encefalopatía tóxica, comportamiento anormal, neuropatía, enfermedad cerebrovascular, nistagmo, deterioro cognitivo, perturbación en el pensamiento,			neuropatía	
<b>Respiratorio</b>	Bronquitis asmática, irritación de las membranas mucosas, lesión del sistema respiratorio, bronquiectasias				
<b>Cardiovascular</b>	Miocarditis, isquemia, hipertensión, infarto al miocardio			Miocarditis, isquemia, incremento de presión arterial, infarto al miocardio	
<b>Circulatorio</b>	Anemia hemolítica, pancitopenia, anemia, macrocitosis		Pancitopenia	Pancitopenia, anemia, macrocitosis	
<b>Endocrino</b>	Diabetes mellitus				
<b>Hepático</b>	Daño hepático			Daño hepático	
<b>Reproductivo y del desarrollo</b>	Efectos en el embarazo (aborto espontáneo, muerte fetal, mortalidad neonatal y mortalidad infantil, así como una reducción significativa del peso al nacer). Disfunción eréctil	Efectos en el embarazo (muerte fetal, mortalidad neonatal), deterioro de la fertilidad masculina	Efectos en el embarazo (aborto espontáneo, muerte fetal, mortalidad neonatal y mortalidad infantil, así como una reducción significativa del peso al nacer)	Disfunción eréctil	
<b>Dermatológico</b>	Alopecia		Dermatitis (rubor, diaforesis, hiperqueratosis palmar, edema periférico, hiperpigmentación y dermatitis exfoliativa)		

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4-3 Efectos carcinogénicos según forma química de arsénico**

Órgano/sistema afectado	Arsénico inorgánico	Trióxido de arsénico	Tricloruro de arsénico	Pentóxido de arsénico	Arsina
	Cas: 7440-38-2	Cas: 1327-53-3	Cas: 7784-34-1	Cas: 1303-28-2	Cas: 7784-42-1
<b>Respiratorio</b>	Cáncer de pulmón	Cáncer de pulmón	Mayor riesgo de cáncer de pulmón.	Cáncer de pulmón	
<b>Renal</b>	Cáncer de vejiga, de riñón	Cáncer de vejiga, de riñón	Cáncer de vejiga, de riñón	Cáncer de vejiga, de riñón	
<b>Hepático</b>	Angiosarcoma hepático (*)	Angiosarcoma hepático (*)	Angiosarcoma hepático (*)	Angiosarcoma hepático (*)	
<b>Dermatológico</b>	Cáncer de pie de tipo no melanoma.	Cáncer de pie de tipo no melanoma.	Cáncer de pie de tipo no melanoma.	Cáncer de pie de tipo no melanoma.	
<b>Otros órganos/sistemas afectados</b>	Ganglios linfáticos, médula ósea, próstata (*)	Ganglios linfáticos, médula ósea, próstata, genotóxico (mutación en leucocitos)	Parece ser mutagénico	próstata(*)	Carcinoma

(\*): Asociado solo a exposiciones del tipo ocupacional.

Fuente: Elaboración propia

## 4.2 Perfil toxicológico arsénico

A continuación, se presenta el perfil toxicológico de las formas químicas con información disponible del metaloide:

### 4.2.1 Arsénico inorgánico – Número CAS: 7440-38-2

#### 4.2.1.1 Usos/formas/fuentes

El arsénico es un elemento de aspecto metálico, brillante, quebradizo, cristalino y de color gris plateado o blanco estaño. Puede existir en tres formas alotrópicas: amarillo (alfa), negro (beta) y gris (gamma) (HSDB, 2001). La forma metaloide amorfa (alfa-arsénico) se oscurecerá a negro (beta-arsénico) y formará trióxido de arsénico ( $As_2O_3$ ) en el aire húmedo. Cuando el vapor de arsénico se enfría repentinamente, se forma un tipo de arsénico amarillo que no tiene propiedades metálicas (Budavari, 2000; Hathaway et al, 1996; Lewis, 1996; NIOSH, 2001) (HazardText, 2021e)

#### Usos:

El arsénico se utiliza: en metalurgia para endurecer cobre, plomo y aleaciones; en la fabricación de ciertos tipos de vidrio; en la producción de pigmentos; en plaguicidas (con mayor frecuencia como trióxido de arsénico), insecticidas, fungicidas y raticidas; en herbicida; en agricultura como desecante del algodón; como subproducto en la fundición de minerales de cobre; como componente de dispositivos eléctricos y como material dopante en la fabricación de semiconductores (Bingham et al, 2001; Budavari, 2000; Hathaway et al, 1996; HSDB, 2001; Lewis, 1998; Zenz, 1994). Históricamente, el arsénico se usaba en un tónico conocido como “solución de Fowler” para tratar una variedad de enfermedades, como la leucemia y la psoriasis (Bingham et al, 2001; Harbison, 1998; Zenz, 1994). También se ha utilizado como marcador radiactivo (un isótopo artificial, As) en toxicología (HSDB, 2001).

El arsénico, como sulfuro de arsénico, también es un componente de ciertos tipos de productos depilatorios, conocidos como agentes depilatorios corrosivos a base de arsénico (CABD) que se han utilizado tradicionalmente en Irán e India. En Irán, CABD también se conoce como “Vajebi” (Farzaneh et al, 2011)(HazardText, 2021e).

También destaca su presencia en sustancias preservantes hidrosolubles para la madera como el arseniato de cobre cromatado (CCA)(Wottitz & Moreno, 2011).

#### Formas:

El arsénico es un elemento que puede encontrarse en la naturaleza en formas orgánicas e inorgánicas. Rara vez se encuentra en su forma elemental aislada. Más comúnmente, está presente en especies minerales, en aleaciones o como óxido u otra forma compuesta (Budavari, 2000). En su forma inorgánica es posible encontrarle como arsénico trivalente (trioxido de

arsénico, arsenito de sodio, tricloruro de arsénico) o arsénico pentavalente (pentóxido de arsénico, ácido arsenioso, arseniatos).

**Fuentes:**

Se cree que el arsénico se encuentra en todo el universo. Es el vigésimo elemento más común en la corteza terrestre, con una concentración de 1,8 ppm (Baselt, 1997; Bingham et al, 2001; Budavari, 2000; Zenz, 1994) (HazardText, 2021e).

Se ha encontrado arsénico en(HazardText, 2021e):

- Una variedad de remedios caseros / homeopáticos / herbales de China, India e Irán (Espinoza et al, 1995; Kew et al, 1993; Sheerin et al, 1994; p 5; Hall & Harruff, 1989; Kerr & Saryan, 1986).
- En la contaminación del agua subterránea y potable (hidroarsenismo endémico) en Chile, Taiwán, México, Argentina, Tailandia e India (Mazumder et al, 2001; Rahman y col., 2001; Woollons y Russell-Jones, 1998).
- En un vino elaborado a partir de uvas cultivadas en viñedos tratados con un pesticida arsénico (Houser & Vitek, 1979).
- En conservantes utilizados por taxidermistas (Jensen & Olsen, 1995).
- En opio (contenido de hasta 74,1 mcg / 100 g) (Datta, 1977).
- Brillo de luna contaminado (contiene hasta 415 mcg / L de arsénico) (Gerhardt et al, 1980).
- En la fabricación de vidrio artístico (Apostoli et al, 1998).
- Venenos para hormigas que contienen arsénico sódico (prohibido por la EPA) (Kuslikis et al, 1991).
- Alimentos marinos, especialmente mariscos (las concentraciones varían desde 2 mg / kg para peces de agua dulce hasta 22 mg / kg para langostas) (Buchet et al, 1994; Baselt, 2000).
- Arseniato de cromo-cobre (CCA) utilizado como conservante de la madera (exposición al arsénico a través del polvo en el aire) (Jensen & Olsen, 1995; Nygren et al, 1992; Peters et al, 1984).

**4.2.1.2 Efectos clínicos agudos:**

Para observar una intoxicación aguda se deben dar dos elementos mínimos. El primero es que exista exposición, y el segundo es que la dosis de exposición sea suficientemente alta. Y en este sentido para observar una intoxicación aguda por arsénico, las dosis de exposición deben ser particularmente altas, tanto que éstas no se ven en ambientes comunitarios sino en exposiciones ocupacionales, con la única excepción de la ingesta directa de preparados concentrados de

arsénico con propósitos suicidas y en ingestas accidentales de este tipo de preparados, pero en ningún caso ocurrirá por exposición a través del aire ambiental.

**Toxicológicos:** El arsénico trivalente ( $As^{3+}$ ) interrumpe la fosforilación oxidativa, lo que conduce a la formación de radicales libres mediante la inhibición del complejo multienzimático piruvato deshidrogenasa, que posteriormente disminuye la gluconeogénesis debido a la falta de acetil-CoA. El arsénico pentavalente ( $As^{5+}$ ) puede transformarse en arsénico o sustituir al fosfato inorgánico en la glucólisis, lo que provoca el desacoplamiento de la fosforilación oxidativa y la pérdida de la formación de ATP. Crónicamente, el arsénico puede causar daño al ADN, mutación en el gen supresor p-53 e inhibición de los mecanismos de reparación del ADN que conducen al cáncer. Los metales que contienen arsénico se consideran no tóxicos debido a su baja solubilidad. El arsénico orgánico tiene una toxicidad significativamente menor en comparación con las formas inorgánicas trivalentes y pentavalentes (HazardText, 2021a).

**Toxicidad leve a moderada:** Los síntomas gastrointestinales ocurren rápidamente después de una ingestión aguda. Los signos y síntomas iniciales incluyen ardor en los labios, constricción de la garganta y disfagia. A continuación de estos síntomas sigue un dolor abdominal intenso, náuseas, vómitos y diarrea profusa “como agua de arroz” que puede provocar hipovolemia (HazardText, 2021a).

Además, la hipovolemia por fuga capilar (tercer espacio) es un efecto temprano común. Puede producirse una prolongación del Intervalo QT. Los calambres musculares, el edema facial, la bronquitis, la disnea, el dolor de pecho, la deshidratación, la sed intensa y las alteraciones de los líquidos y los electrolitos también son comunes después de exposiciones importantes. También se puede desarrollar un olor a ajo en el aliento y las heces. La toxicidad subaguda puede producir neuropatías, tanto motoras como sensoriales, y puede progresar a un síndrome similar a Guillain-Barré (HazardText, 2021a).

**Toxicidad severa:** La hipotensión y la taquicardia son signos tempranos comunes de intoxicación grave. La hipotensión puede ser resistente a la reanimación con líquidos y puede producirse insuficiencia multiorgánica. Pueden aparecer fiebre y taquipnea. Estos pacientes pueden desarrollar arritmias ventriculares, incluida la Torsade de pointes (TdP). Se han informado encefalopatía, convulsiones y coma. Varios días después de la ingestión pueden aparecer insuficiencia renal aguda, anemia hemolítica, rabdomiólisis y hepatitis (HazardText, 2021a).

#### 4.2.1.3 Efectos clínicos crónicos

La absorción oral de arsénico generalmente es la ruta de exposición más importante, mientras que la inhalación normalmente contribuye con menos del 1% de la dosis total (European Commission, 2000). Si bien la ruta de exposición ocupacional más común al arsénico en personas es la inhalatoria, la probabilidad de exponerse a niveles ocupacionales en un escenario comunitario es extremadamente baja.

La secuencia de intoxicación crónica incluye debilidad, anorexia, hepatomegalia, ictericia y molestias gastrointestinales, seguidas de conjuntivitis, irritación del tracto respiratorio superior, hiperpigmentación, y dermatitis exfoliativa. Voz ronca y perforación del tabique nasal es un resultado común después de una inhalación prolongada de polvo o humo de arsénico blanco. Los síntomas del sistema nervioso periférico pueden incluir entumecimiento, ardor y hormigueo en las manos y los pies; dolor; parestesias; fasciculaciones musculares; temblor grueso; ataxia y confusión mental. Puede seguir debilidad muscular, sensibilidad en las extremidades y dificultad para caminar. La fase final consiste en una neuropatía sensorial periférica de manos y pies. También puede ocurrir neuropatía motora asociada. Ciertos compuestos de arsénico son carcinógenos humanos conocidos. La exposición crónica en entornos ocupacionales puede causar intoxicación y conlleva un mayor riesgo de cáncer de piel, pulmón, vejiga y posiblemente de hígado (HazardText, 2021a).

#### 4.2.1.4 Rangos de toxicidad:

##### a) Exposición letal mínima

Los diferentes compuestos de arsénico pueden tener diferentes dosis letales. La dosis letal más baja registrada de arsénico es de aproximadamente 130 mg (Bingham et al, 2001; OHM / TADS, 2001). Tan solo 20 mg de arsénico pueden producir toxicidad potencialmente mortal (Hutton & Christians, 1983; Schoolmeester & White, 1980; Zaloga et al, 1970). De acuerdo con una revisión retrospectiva de 155 pacientes con intoxicación por agente depilatorio a base de arsénico corrosivo (CABD), 9 pacientes murieron luego de una ingestión media de 213 +/- 141 g del polvo CABD. Si bien la formulación de estos productos no está estandarizada, el análisis de CABD ha demostrado que consta de aproximadamente un 25% de sulfuro de arsénico y un 65% de bicarbonato de calcio (HazardText, 2021a).

##### b) Exposición máxima tolerada

**AGUDA:** El consumo humano diario promedio de arsénico es: 0,025-0,033 mg/kg (en alimentos y agua) (Baselt, 2000). Las estimaciones de dosis tóxicas orales agudas de compuestos de arsénico oscilan entre 1 mg y 10 g. Tan solo 10 ppm en agua puede ser un peligro grave para la salud (OHM / TADS, 2001) (HazardText, 2021a).

**CRÓNICA:** Los sujetos expuestos crónicamente a niveles entre 0,1 y 0,39 mg/L de arsénico en el agua potable no mostraron diferencias en los efectos sobre la salud de sujetos expuestos a 0,001 mg/L de arsénico (Valentine et al, 1992). La ingestión prolongada de compuestos arsenicales en el rango de 0,04-0,09 mg/kg/día producía con frecuencia una intoxicación leve (Hayes & Laws, 1991). Se informó que los montañeros de Estiria (Austria) ingirieron arsénico una o dos veces por semana como tónico y, en consecuencia, se volvieron tolerantes a dosis diarias estimadas en 400 mg o más (Hayes & Lawes, 1991) (HazardText, 2021a).

c) Clasificación cancerígena:

**Tabla 4-4 Clasificación carcinogénica – arsénico inorgánico**

Agencia	ID	Clasificación carcinogénica	Referencia
ACGIH	Arsénico y compuestos inorgánicos de As	A1	American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2010; PubChem, 2021
USEPA	Arsénico inorgánico	A	U.S. Environmental Protection Agency, 2011
IARC	Arsénico y compuestos inorgánicos de As	1	International Agency for Research on Cancer (IARC), 2016; International Agency for Research on Cancer, 2015; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010a; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2008; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2007; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2006; IARC, 2004)
MAK	Arsénico y compuestos inorgánicos de As: arsénico metálico	Categoría 1	DFG: List of MAK and BAT Values 2002, Report No. 38, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area, Wiley-VCH, Weinheim, Federal Republic of Germany, 2002.
NIOSH	Arsénico (compuestos inorgánicos, como As)	Ca	National Institute for Occupational Safety and Health, 2007
NTP	Arsénico y compuestos inorgánicos	K	U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, National Toxicology Project
Comunidad Europea	Arsénico y compuestos inorgánicos	-	(European Commission, 2000)

Fuente: Extraído de Arsenic. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021a)

**Definiciones:**

- **ACGIH - A1:** Carcinógeno humano confirmado: El agente es carcinogénico para los humanos según el peso de la evidencia de estudios epidemiológicos.
- **EPA - A:** Carcinógeno humano.
- **IARC – 1:** El agente (o mezcla) es cancerígeno para los seres humanos. La circunstancia de exposición implica exposiciones que son cancerígenas para los seres humanos. Esta categoría se utiliza cuando existe suficiente evidencia de carcinogenicidad en humanos. Excepcionalmente, un agente (o mezcla) puede incluirse en esta categoría cuando la

evidencia de carcinogenicidad en humanos es menos que suficiente, pero hay evidencia suficiente de carcinogenicidad en animales de experimentación y evidencia sólida en humanos expuestos de que el agente (o mezcla) actúa a través de un mecanismo relevante de carcinogenicidad.

- **MAK - Categoría 1:** Sustancias que causan cáncer en el hombre y se puede suponer que contribuyen de manera significativa al riesgo de cáncer. Los estudios epidemiológicos proporcionan evidencia adecuada de una correlación positiva entre la exposición de los seres humanos y la aparición de cáncer. Los datos epidemiológicos limitados se pueden corroborar con la evidencia de que la sustancia causa cáncer por un modo de acción que es relevante para el hombre.
- **NIOSH – Ca:** NIOSH considera que esta sustancia es un potencial carcinógeno ocupacional.
- **NTP – K:** Conocido = Se sabe que es un carcinógeno humano

d) Valores de referencia exposición aguda

**Tabla 4-5 Valores de referencia exposición aguda inhalatoria - arsénico inorgánico**

Criterio de toxicidad	Concentración (ng/m <sup>3</sup> )	Efecto crítico	Referencia
<b>Acute Reference Exposure Level (REL)</b>	200	Disminución del peso fetal en ratones	(OEHHA, 2014)
<b>Short-Term Air Permitting Effects Screening Levels (ESLs)</b>	3000	La toxicidad materna en ratas se documentó como estertores durante la exposición antes del apareamiento y la gestación en un estudio de varios días.	(TCEQ, 2011)

**Nota:** Acute REL: Concentración en o por debajo de la cual no se prevén efectos adversos para la salud durante una exposición promedio de 1 hr (<https://oehha.ca.gov/air/general-info/oehha-acute-8-hour-and-chronic-reference-exposure-level-rel-summary>)

Fuente: Elaboración propia

e) Valores de referencia exposición crónica

## Cancerígenos

**Tabla 4-6 Valores de referencia exposición crónica inhalatoria: cancerígenos - arsénico inorgánico**

Criterio de toxicidad	Concentración (ng/m <sup>3</sup> )	Efecto crítico	Referencia
Inhalation Unit Risk (IUR)	4,3	Mortalidad por cáncer pulmonar	(US-EPA, 2011)
Inhalation Unit Risk (IUR)	3,3	Mortalidad por cáncer pulmonar	(CARB, 1990)
Inhalation Unit Risk (IUR)	0,15	Mortalidad por cáncer pulmonar	TCEQ (Erraguntla et al., 2012)
Inhalation Unit Risk (IUR)	0,7	Mortalidad por cáncer pulmonar	Netherlands (Dutch Expert Committee on Occupational Safety, DECOS)(Lewis et al., 2015)

Nota: Inhalation Unit Risk (IUR) estimación cuantitativa en términos de riesgo por volumen de aire respirado expresado generalmente en unidades de ug/m<sup>3</sup> de la sustancia cancerígena (US-EPA, 1994).

Fuente: Elaboración propia

### No cancerígenos

**Tabla 4-7 Valores de referencia exposición crónica inhalatoria: no cancerígenos - arsénico inorgánico**

Criterio de toxicidad	Concentración asociada con riesgo (ng/m <sup>3</sup> )	Efecto crítico	Referencia
Chronic Reference Exposure Level (REL)	15	Disminución de la función intelectual en niños de 10 años.	(OEHHA, 2014)

Nota: Chronic REL: están diseñados para abordar exposiciones continuas durante toda la vida: la métrica de exposición utilizada es la exposición promedio anual. (<https://oehha.ca.gov/air/general-info/oehha-acute-8-hour-and-chronic-reference-exposure-level-rel-summary>).

Fuente: Elaboración propia

#### f) Valores de toxicidad

No se encontró información específica de valores de toxicidad por la vía inhalatoria. Se presentan los disponibles de otras vías

**Tabla 4-8 Valores de toxicidad arsénico inorgánico**

Identificación	Animal - vía	Valor informado
<b>Dosis Letal (LD)</b>	Humano - oral	1-2 mg/kg
<b>Dosis Letal (LD)</b>	Conejo - oral	4-19 mg/kg
<b>Dosis Letal (LD)</b>	Rata - oral	8 mg/kg
<b>Dosis Letal 50 (LD50)</b>	Ratón - Intraperitoneal	46,200 mcg/kg -- ataxia, hipermotilidad gastrointestinal, diarrea
<b>Dosis Letal 50 (LD50)</b>	Ratón - oral	25-47 mg/kg 145 mg/kg -- ataxia, hipermotilidad gastrointestinal, diarrea
<b>Dosis Letal 50 (LD50)</b>	Cerdo - oral	6,5 mg/kg
<b>Dosis Letal 50 (LD50)</b>	Rata - Intraperitoneal	13.390 mcg/kg
<b>Dosis Letal 50 (LD50)</b>	Rata - oral	15 mg/kg 112 mg/kg 763 mg/kg -- ataxia, hipermotilidad gastrointestinal, diarrea
<b>Dosis letal mínima publicada (LDLo)</b>	Cerdo de guinea - Intraperitoneal	10 mg/kg -- degeneración del hígado graso, cambios en el riñón, vejiga y uréter
<b>Dosis letal mínima publicada (LDLo)</b>	Cerdo de guinea - Subcutánea	300 mg/kg
<b>Dosis letal mínima publicada (LDLo)</b>	Conejo - Subcutánea	300 mg/kg
<b>Dosis letal mínima publicada (LDLo)</b>	Rata - Intramuscular	25 mg/kg
<b>Dosis tóxica mínima publicada (TDLo)</b>	Humano - oral	76 mg/kg por 12 años intermitentes - cancerígeno según los criterios RTECS, tumores del hígado, hemorragia 7.857 mg/kg for 55 años intermitentes -- dermatitis, cambio en la estructura / función del esófago, hemorragia Niños, 4 mg/kg -- cambios en el recuento de leucocitos, acidosis metabólica, cambios en el ECG no diagnósticos
<b>Dosis tóxica mínima publicada (TDLo)</b>	Conejo - implante	75 mg/kg -- agente tumorigénico equívoco según los criterios del RTECS, tumores de pulmón, tórax e hígado
<b>Dosis tóxica mínima publicada (TDLo)</b>	Rata - Oral	Hembra, 580 mcg / kg durante 30 semanas antes del apareamiento y 20 días de embarazo: anomalías del desarrollo del sistema musculoesquelético Hembra, 605 mcg / kg para 35semanas antes del apareamiento: mortalidad antes y después de la implantación 1.360 mg/kg por 17 días- Intermitente: cambios gastrointestinales, cambios en el recuento de células, inflamación crónica del riñón

Fuente: Arsenic. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021a)y Arsenic. Toxicology detail (Micromedex, 2021a)

#### 4.2.1.5 Estándares Normativos internacionales ocupacionales

**Tabla 4-9 Límites ocupacionales de exposición inhalatoria- arsénico inorgánico**

Entidad	Descripción	Valor (ng/m <sup>3</sup> )	Categoría carcinogénica
ACGIH	TLV-TWA	10.000	A1: Carcinógeno humano confirmado: El agente es carcinogénico para los humanos según el peso de la evidencia de estudios epidemiológicos.
	TLV-STEL	No listado	
	TLV-Ceiling	No listado	
OSHA	8 hrs. TWA	No listado	-
	Concentración máxima aceptable	No listado	
NIOSH	TWA	No listado	Ca: NIOSH considera que esta sustancia es un potencial carcinógeno ocupacional
	STEL	2.000 15- minutos	
	Ceiling	No listado	
	IDLH	5.000.000	
DS 594	LPP	10.000	A.1: Sustancia comprobadamente cancerígenas para el ser humano

Fuente: Workplace Standards extraído de Arsenic. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021a) y Arsenic. Toxicology details (Micromedex, 2021a)

**Nota:**

- TLV-TWA: Umbral Límite-Media Ponderada en el Tiempo, es el valor límite ambiental publicado por la ACGIH; se definen como la "concentración media ponderada en el tiempo, para una jornada laboral normal de trabajo de 8 horas y una semana laboral de 40 horas, a la que pueden estar expuestos casi todos los trabajadores repetidamente día tras día, sin efectos adversos".
- STEL: Límite de exposición a corto plazo. Concentración promedio ponderada en un tiempo de 15 minutos a la que trabajadores pueden estar expuestos hasta 4 veces al día con al menos 1 hora entre exposiciones sucesivas sin efectos adversos si no se supera el TLV-TWA.
- TLV-Ceiling: Nivel de concentración que no deben ser superados en ningún momento de la jornada de trabajo. Éstos pueden ser determinados como valores promediados para períodos de 15 minutos en los casos en que no sea factible una medida instantánea.
- IDLH: Concentración inmediatamente peligrosa para la vida o la salud. Según el NIOSH de EE. UU. Corresponde a la concentración máxima de exposición de la cual se puede escapar en treinta minutos sin ningún síntoma que impida el escape o efectos irreversibles para la salud.
- LPP: límites permisibles ponderados.

#### 4.2.1.6 Toxicocinética

##### a) Absorción:

Dado que el arsénico existe en el aire como un componente material particulado, la absorción a través del pulmón implica dos procesos: la deposición de las partículas en la superficie del pulmón y la absorción de arsénico del material depositado. En los pacientes con cáncer de pulmón expuestos al arsénico en el humo del cigarrillo, se calculó que la deposición era aproximadamente del 40% y la absorción era del 75% al 85% (Holland et al. 1959). Por lo tanto, la absorción total (expresada como porcentaje de arsénico inhalado) fue de aproximadamente 30 a 34%. En los trabajadores expuestos a polvos de trióxido de arsénico en fundiciones, la cantidad de arsénico excretado en la orina (la principal vía de excreción) fue de aproximadamente el 40-60% de la dosis inhalada estimada (Pinto et al. 1976; Vahter et al. 1986). La absorción de polvos y humos de trióxido de arsénico (evaluados mediante la medición de metabolitos urinarios) se correlacionó con las concentraciones de aire de arsénico promedio ponderadas en el tiempo de los muestreadores de aire de la zona de respiración personal (Offergelt et al. 1992). Las correlaciones fueron mejores inmediatamente después de un turno y justo antes del inicio del siguiente turno. Aunque el porcentaje de deposición no se midió en estos casos, parece probable que se absorbiera casi todo el arsénico depositado. Esta conclusión está respaldada por estudios de instilación intratraqueal en ratas y hámsteres, donde la eliminación de oxi compuestos de arsénico (arsenito de sodio, arseniato de sodio, trióxido de arsénico) del pulmón fue rápida y casi completa (60-90% en 1 día) (Marafante y Vahter 1987; Rhoads y Sanders 1985). En contraste, el sulfuro de arsénico y el arsenato de plomo se eliminaron más lentamente (Marafante y Vahter 1987), lo que indica que la tasa de absorción puede ser menor si el arsénico inhalado se encuentra en una forma altamente insoluble. No hay datos que sugieran que la absorción de arsénico inhalado en los niños sea diferente de la de los adultos (ATSDR, 2007).

Las sales de arsenito son más solubles en agua y se absorben mejor que el trióxido de arsénico.

3) Los compuestos arsenicales trivalentes (arsenitos, como el trióxido de arsénico) son más solubles en agua que los arseniatos (arsenicales pentavalentes). Los arsenitos son generalmente más tóxicos que los arseniatos ya que se absorben más fácilmente (Hayes, 1982). Los compuestos arsenicales orgánicos por lo general son pobremente absorbidos desde el tracto gastrointestinal (Micromedex, 2021a).

##### b) Distribución:

La distribución del arsénico después de la exposición por inhalación se ha estudiado en ratones (Burchiel et al. 2009, 2010). Los ratones (machos C57B1 / 6N) se expusieron (solo por la nariz) a aerosoles de trióxido de arsénico en concentraciones de 50 o 1.000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  As durante 3 horas/día durante 14 días. Inmediatamente después de la exposición, se observaron aumentos relacionados con la dosis en el arsénico absorbido, en la vejiga, la sangre, el cerebro, los riñones, el hígado, los pulmones y el bazo. Las concentraciones más altas se observaron en hígado, seguidas de vejiga y riñón (ATSDR, 2016).

El arsénico atraviesa fácilmente la barrera placentaria y se ha reportado daño fetal en animales y seres humanos (Micromedex, 2021a).

#### c) Metabolismo

La principal ruta metabólica del arsénico en el humano es a través del hígado, donde ocurre un proceso de reducción del arsénico V a arsénico III, y reacciones de metilación en donde el arsénico III es metilado por acción enzimática en dos pasos sucesivos, dando por producto los metabolitos metilados ácido monometilarsónico (MMA) y ácido dimetilarsínico (DMA), los cuales son más activos que el arsénico original, por lo que este tipo de metabolismo se conoce como bioactivación (ATSDR, 2016). Estos procesos parecen ser los mismos tanto si la exposición es por inhalación, vía oral o parenteral (Maud & Rumsby, 2008).

#### d) Excreción

No se encontró información de excreción por la vía inhalatoria. Se presenta la información disponible de otras vías:

**Riñón:** La eliminación urinaria completa puede llevar semanas después de una dosis única de arsénico, aunque la mayor parte de una dosis única de arsénico inorgánico se excreta en los primeros días después de la ingestión.

La mayor parte del arsénico ingerido se excreta rápidamente en la orina (en 72 horas). A los 5 a 10 días, niveles de arsénico en orina de 1 a 9 mg/L sugieren una exposición estimada superior a 3 mg/día o una fuente continua de exposición al arsénico. (Tsuji et al, 2004) (Micromedex, 2021a).

**Heces:** Se eliminan pequeñas cantidades de arsénico en las heces (Schoolmeester & White, 1980; Giberson et al, 1976). Los arseniatos se absorben mal en el tracto gastrointestinal y se excretan en gran parte, sin cambios por las heces. (Hayes, 1982) (Micromedex, 2021a).

### 4.2.1.7 Mecanismo de acción

#### e) Mecanismos farmacocinéticos

**Captación celular:** La absorción celular de arsénico depende del estado de su oxidación y del tipo de célula. El arsénico puede atravesar las membranas celulares por difusión pasiva o por transporte mediado por proteínas transportadoras. Para la difusión pasiva, las membranas celulares son más permeables al As (III) que al As (V). Para el transporte mediado por transportadores, los canales de aquaporinas y los transportadores de fosfato se han propuesto como mecanismos para el transporte de arsenito y arsenato mediado por transportadores, respectivamente (Bustaffa et al.2014; Druwe y Vaillancourt 2010; Kumagai y Sumi 2007)(ATSDR, 2016).

*Polimorfismos genéticos de enzimas metabolizadoras de arsénico:* El As (III) es más tóxico que As (V) y, de manera similar, las formas metiladas de arsenito parecen ser más tóxicas que las formas metiladas de arsenato. Por lo tanto, las alteraciones en el metabolismo del arsénico que dan como resultado un aumento de la formación o una disminución de la oxidación de compuestos de As (III) a compuestos de As (V) pueden aumentar la toxicidad inducida por el arsénico. Los polimorfismos genéticos de varias enzimas involucradas en el metabolismo del arsénico se han asociado con un aumento de los metabolitos de As (III) en la orina. Las alteraciones en el metabolismo del arsénico pueden, en parte, proporcionar una base para la sensibilidad interindividual al arsénico (Bailey y Fry 2014a, 2014b; Bhattacharjee et al.2013a; Bustaffa et al.2014; Faita et al.2013; Naujokas et al.2013; Sumi y Himeno 2012; Smith y Steinmaus 2009). Estudios han examinado la relación entre los polimorfismos de las enzimas que metabolizan el arsénico y los perfiles urinarios de los metabolitos y/o el riesgo de efectos inducidos por el arsénico en las poblaciones humanas. Los polimorfismos examinados incluyen AS3MT (Agusa et al.2009; Engstrom et al.2009, 2011; Porter et al.2010; Rodrigues et al.2012; Tellez-Plaza et al.2013), cistation- $\beta$ -sintasa (Porter et al. 2010), glutatión S-transferasa  $\pi$ 1 (Agusa et al.2012; Antonelli et al.2014; Marcos et al.2006), glutatión S-transferasa  $\omega$ 1 (Ahsan et al.2007; Antonelli et al.2014; Marcos et al. 2006; Porter et al.2010; Rodrigues et al.2012), metilentetrahidrofolato reductasa (Ahsan et al.2007; Chung et al.2010; Porter et al.2010) y ADN metiltransferasa 1 específico de N-6-adenina (Harari et al.2013). En general, los resultados muestran que los polimorfismos genéticos de las enzimas que metabolizan el arsénico en los seres humanos están asociados con diferencias en la proporción de MMA: DMA en la orina (ATSDR, 2016).

#### f) Mecanismos de toxicidad

La toxicidad del arsénico, incluido el cáncer, es muy probable que se deba a múltiples mecanismos, con algunos mecanismos que actúan de forma secuencial o sinérgica. Dos tipos generales de mecanismos parecen estar involucrados en la toxicidad inducida por arsénico: (1) formación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y daño subsiguiente a macromoléculas celulares y estrés oxidativo y (2) interacción de arsénico reactivo o especies de metabolitos de arsénico con macromoléculas celulares. Además, los avances recientes en los mecanismos de toxicidad inducida por el arsénico se han centrado en los cambios epigenéticos(ATSDR, 2016).

Los resultados de los estudios mecanicistas de la toxicidad del arsénico sugieren un papel de las ROS en la toxicidad del arsénico inorgánico (Bailey y Fry 2014b; Bhattacharjee et al.2013a, 2013b; Bustaffa et al.2014; Druwe y Vaillancourt 2010; Faita et al.2013; Kumagai y Sumi 2007; Martinez et al.2011; Salinkow y Zhitkovich 2008). El anión superóxido y la formación subsiguiente de peróxido de hidrógeno y radical hidroxilo se han propuesto como los ROS primarios asociados con el estrés oxidativo inducido por arsénico. Se considera que el estrés oxidativo es uno de los efectos biológicos iniciales de la toxicidad inducida por el arsénico, incluida la carcinogénesis(ATSDR, 2016).

La generación de ROS inducida por arsénico se ha asociado con numerosos efectos sobre tejido celular, a través de daño directo o provocar una cascada de efectos en respuesta al estrés

oxidativo. Los siguientes efectos se han asociado con ROS inducidos por arsénico: niveles reducidos de óxido nítrico en estado estable; alteraciones en las reacciones de oxidación/reducción intracelular, que pueden alterar el estado redox intracelular; disminución de los niveles de glutatión; peroxidación lipídica; daño a las proteínas; inhibición de la piruvato deshidrogenasa; disrupción de la membrana mitocondrial e inhibición de enzimas mitocondriales; fosforilación de proteínas alterada y la consiguiente alteración de diversas vías de transducción de señales; aumento de la expresión de factores de transcripción de respuesta al estrés e inestabilidad genómica a través del daño al ADN (roturas de cadena simple y doble, aductos de ADN, mutaciones de pares de bases, reordenamiento de inserciones de deleciones y amplificaciones de secuencias), inhibición irreversible de la reparación del ADN, disfunción de los telómeros, y detención mitótica (ATSDR, 2016).

La interacción del arsénico reactivo o metabolitos de arsénico con macromoléculas celulares se asocia con alteraciones en la función celular (Bhattacharjee et al. 2013a; Bustaffa et al. 2014; Druwe y Vaillancourt 2010; Salinkow y Zhitkovich 2008; Wantanabe e Hirano 2013). Debido a la reactividad del arsénico y los metabolitos, se han identificado varias células objetivo para los efectos inducidos por el arsénico, y la mayoría tiene numerosos efectos en cascada. El arsenato, arsenito, MMA y DMA interactúan directamente con grupos tiol de macromoléculas (p. Ej., Cisteína y glutatión). Como resultado, el arsénico puede inhibir la actividad de las enzimas ricas en tiol, como el piruvato deshidrogenasa, la 2-oxoglutarato deshidrogenasa y la tirosina fosfatasa, e interactuar con las proteínas “dedos de zinc”. También se ha demostrado que el arsénico interfiere con la fosforilación oxidativa mediante la formación de un éster de arseniato inestable. Las especies de arsénico participan en varias reacciones bioquímicas que incluyen interacciones covalentes, reacciones de metilación y desmetilación, reacciones ácido-base y de oxido-reducción. El arsénico altera las proteínas en la vía de señalización de la insulina, lo que provoca una alteración de la homeostasis de la glucosa. Otros efectos celulares atribuidos al arsénico incluyen la estimulación del receptor de esfingosina 1-fosfato (un receptor acoplado a proteína G), detención mitótica e interacciones con tubulina (que conducen a detención mitótica) (ATSDR, 2016).

Cambios epigenéticos. El epigenoma se refiere a compuestos químicos que funcionan como reguladores de genes sin alterar las secuencias de ADN. Investigaciones recientes han demostrado la importancia del epigenoma para mantener el desarrollo, el crecimiento y la homeostasis celular. Los cambios epigenéticos pueden provocar cambios en la expresión genética y provocar inestabilidad genética. Se han propuesto cambios en el epigenoma como mecanismos importantes en la toxicidad inducida por el arsénico, los efectos en el desarrollo y la carcinogénesis (Arita y Costa 2009; Bailey y Fry 2014b; Bhattacharjee et al. 2013a, 2013b; Bustaffa et al. 2014; Martinez et al. 2011; Salinkow y Zhitkovich 2008). Sin embargo, las consecuencias biológicas específicas y las relaciones causales de los cambios epigenéticos no se han establecido y es probable que varíen con los tipos de células y la dosis de arsénico y la duración de la exposición (ATSDR, 2016).

Se ha demostrado que el arsénico afecta el epigenoma mediante alteraciones en la metilación del ADN, las histonas y los microARN (miARN). La metilación del ADN es la adición de un grupo metilo a un nucleótido de citosina o adenina en el ADN; La metilación es un mecanismo importante para regular la expresión génica. Los resultados de estudios in vitro y en animales y de estudios de población humana han demostrado que el arsénico induce tanto la hipometilación como la hipermetilación del ADN. Las alteraciones en la metilación del ADN se han asociado con el desarrollo de enfermedades inducidas por el arsénico, incluida la carcinogénesis y los efectos sobre el desarrollo. Se ha propuesto que la hipometilación regula al alza los oncogenes y que la hipermetilación regula a la baja los genes supresores de tumores. Las histonas, el principal componente proteico de la cromatina, participan en la regulación de la expresión génica. El ADN se envuelve alrededor de las histonas, formando nucleosomas. Estudios recientes muestran que el arsénico puede producir modificaciones postraduccionales en las histonas a través de la metilación, acetilación, fosforilación y ubiquitinación de aminoácidos específicos dentro de la histona y, por lo tanto, afectar la transcripción de genes. Los miARN son pequeños ARN no codificantes que participan en la regulación postranscripcional de la expresión génica. Se ha demostrado que el arsénico altera la expresión de miARN y se ha propuesto que los miARN están involucrados en el desarrollo y progresión del cáncer (ATSDR, 2016).

#### 4.2.2 Trióxido de arsénico - Número CAS: 1327-53-3

El trióxido de arsénico es una forma inorgánica trivalente de arsénico inorgánico. A continuación, se presenta la caracterización del perfil, el cual se basa en la información disponible en “*Hazard Text – Hazard Management – Arsenic Trioxide*” (HazardText, 2021d).

##### 4.2.2.1 Usos/formas/fuentes

###### USOS:

USO TERAPÉUTICO: El trióxido de arsénico se utiliza para la inducción de la remisión y consolidación en pacientes con leucemia promielocítica aguda (APL) con la presencia de la translocación t (15; 17) o expresión del gen PML / RAR-alfa, que son refractarios o han recaído de quimioterapia con retinoides y antraciclinas (Prod Info TRISENOX (R) IV inyección, 2010) (HazardText, 2021d).

**OTROS USOS:** El trióxido de arsénico es el compuesto de arsénico comercial más importante (Clayton & Clayton, 1994). Es el material principal utilizado para producir todos los compuestos de arsénico, y se utiliza como intermediario para insecticidas, herbicidas y fungicidas, como conservante de madera, como agente decolorante y refinador en la fabricación de vidrio, en preparaciones farmacéuticas, pigmentos y en inmersión para ovinos y bovinos para conservar pieles, como mordiente textil y para purificar gases sintéticos (EPA, 1985; Lewis, 1993; Budavari, 1996; Morgan, 1989). Aproximadamente el 85% del uso de plaguicidas de trióxido de arsénico ha sido en preparaciones líquidas destinadas a matar ratones y ratas (EPA, 1988). El 15% restante se ha utilizado para matar topos, tuzas y hormigas (EPA, 1988). Sin embargo, muchos pesticidas que

contienen arsénico han sido prohibidos en los Estados Unidos (Clayton & Clayton, 1994). Durante muchos años, los pesticidas arsénicos fueron la causa más común de intoxicación fatal en los EE.UU. (Hayes & Laws, 1991) (HazardText, 2021d).

#### **FORMAS:**

**USO TERAPÉUTICO:** La inyección de trióxido de arsénico está disponible como solución estéril, transparente e incolora de 10 mg / 10 ml (1 mg/ml) en ampollas de vidrio de un solo uso de 10 ml (Prod Info TRISENOX (R) IV inyección, 2010) (HazardText, 2021d).

The most common inorganic arsenical in air is arsenic trioxide

El trióxido de arsénico es la forma química de arsénico inorgánico más común en el aire (European Commission, 2000).

#### **FUENTES**

El trióxido de arsénico se obtiene como subproducto en la fundición de concentrados de cobre y plomo (HSDB, 2006). En los Estados Unidos, el trióxido de arsénico se encuentra principalmente en la fundición de minerales de sulfuro de cobre; las exposiciones más altas suelen ser las de los tostadores (HSDB, 2006). El trióxido de arsénico en forma solubilizada se convierte en arsenito de sodio, que es más tóxico que en la forma no solubilizada (HazardText, 2021d).

#### **4.2.2.2 Efectos clínicos agudos:**

Para observar una intoxicación aguda se deben dar dos elementos mínimos. El primero es que exista exposición, y el segundo es que la dosis de exposición sea suficientemente alta. Y en este sentido para observar una intoxicación aguda por arsénico, las dosis de exposición deben ser particularmente altas, tanto que éstas no se ven en ambientes comunitarios sino en exposiciones ocupacionales, con la única excepción de la ingesta directa de preparados concentrados de arsénico con propósitos suicidas y en ingestas accidentales de este tipo de preparados, pero en ningún caso ocurrirá por exposición a través del aire ambiental.

**Toxicológicos:** El arsénico trivalente ( $As^{3+}$ ) interrumpe la fosforilación oxidativa, lo que conduce a la formación de radicales libres mediante la inhibición del piruvato deshidrogenasa, que posteriormente disminuye la gluconeogénesis debido a la falta de acetyl-CoA. Crónicamente, el arsénico puede causar daño al ADN, mutación en el gen supresor p-53 e inhibición de los mecanismos de reparación del ADN que conducen al cáncer (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

**Toxicidad leve a moderada:** Los síntomas gastrointestinales ocurren rápidamente después de una ingestión aguda. Los signos y síntomas iniciales incluyen ardor en los labios, constricción de la garganta y disfagia. A continuación de estos síntomas sigue un intenso dolor abdominal, náuseas, vómitos y diarrea profusa "como agua de arroz" que puede provocar hipovolemia (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Además, la hipovolemia por fuga capilar (tercer espacio) es un efecto temprano común. Puede producirse una prolongación del Intervalo QT. Los calambres musculares, el edema facial, la bronquitis, la disnea, el dolor de pecho, la deshidratación, la sed intensa y las alteraciones de los líquidos y los electrolitos también son comunes después de exposiciones importantes. También se puede desarrollar un olor a ajo en el aliento y las heces. La toxicidad subaguda puede producir neuropatías, tanto motoras como sensoriales, y puede progresar a un síndrome similar a Guillain-Barré (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

**Toxicidad severa:** La hipotensión y la taquicardia son signos tempranos comunes de intoxicación grave. La hipotensión puede ser resistente a la reanimación con líquidos y puede producirse insuficiencia multiorgánica. Pueden aparecer fiebre y taquipnea. Estos pacientes pueden desarrollar arritmias ventriculares, incluida la Torsade de pointes (TdP). Se han informado encefalopatía, convulsiones y coma. Varios días después de la ingestión pueden aparecer insuficiencia renal aguda, anemia hemolítica, rabdomiólisis y hepatitis (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

#### 4.2.2.3 Efectos clínicos crónicos

La absorción oral de arsénico generalmente es la ruta de exposición más importante, mientras que la inhalación normalmente contribuye con menos del 1% de la dosis total (European Commission, 2000). Si bien la ruta de exposición ocupacional más común al arsénico en personas es la inhalatoria, la probabilidad de exponerse a niveles ocupacionales en un escenario comunitario es extremadamente baja.

La secuencia de intoxicación crónica incluye debilidad, anorexia, hepatomegalia, ictericia y molestias gastrointestinales, seguidas de conjuntivitis, irritación del tracto respiratorio superior, hiperpigmentación, y dermatitis. Voz ronca y perforación del tabique nasal es un resultado común después de una inhalación prolongada de polvo o humo de arsénico blanco. Los síntomas del sistema nervioso periférico pueden incluir entumecimiento, ardor y hormigueo en las manos y los pies; dolor; parestesias; fasciculaciones musculares; temblor grueso; ataxia; y confusión mental. Puede seguir debilidad muscular, sensibilidad en las extremidades y dificultad para caminar. La fase final consiste en una neuropatía sensorial periférica de manos y pies. También puede ocurrir neuropatía motora asociada. Ciertos compuestos de arsénico son carcinógenos humanos conocidos. La exposición crónica en entornos ocupacionales puede causar intoxicación y conlleva un mayor riesgo de cáncer de piel, pulmón, vejiga y posiblemente de hígado (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

#### 4.2.2.4 Rangos de toxicidad:

No se encontró información de rango de toxicidad por la vía inhalatoria. Se presenta la información disponible de otras vías:

g) Exposición letal mínima

Se han enumerado dosis potencialmente mortales de trióxido de arsénico de 70 a 180 mg o de 1 a 2,5 mg/kg (HSDB, 2006) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Oral: Una dosis oral de 120 mg de trióxido de arsénico puede ser fatal (Finkel, 1983). La ingestión de 2 gramos de trióxido de arsénico en un intento de suicidio fue fatal a pesar de la terapia de quelación, cuidados intensivos de apoyo y hemodiálisis (Levin-Scherz et al, 1987) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Un trabajador que estuvo enterrado bajo trióxido de arsénico crudo durante 1 a 2 minutos murió pocas horas después de la exposición, a pesar del tratamiento intensivo (Gerhardsson et al, 1988) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

El trióxido de arsénico en forma solubilizada se convierte en arsenito de sodio, que es más tóxico que en forma no solubilizada. Se ha reportado que 200 mg de trióxido de arsénico ingeridos de forma aguda por un adulto pueden ser letales (Baselt y Cravey, 1989; Baselt, 1988) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

SERIE DE CASOS: Una serie de pacientes desarrollaron intoxicación aguda por arsénico después de ingerir sopa de curry mezclada con trióxido de arsénico. La concentración estimada de arsénico en la sopa fue de aproximadamente 6.000 mcg/g o superior. Un total de 67 personas se vieron afectadas; 4 murieron (un niño de 10 años, una niña de 16 años, un hombre de 53 años y un hombre de 64 años) aproximadamente a las 12 horas posteriores a la ingestión, siendo la principal causa de muerte por efectos cardiovasculares (Yamauchi & Takata, 2021) (HazardText, 2021d).

h) Exposición máxima tolerada

Adultos

Un hombre de 43 años sobrevivió tras ingerir 54 g de trióxido de arsénico en un intento de suicidio, 200 veces la dosis letal (Duenas-Laita et al, 2005) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Un hombre de 23 años ingirió intencionalmente 1.040 mg de trióxido de arsénico. Las manifestaciones clínicas incluyeron debilidad severa, diarrea acuosa parda, vómitos y sed insaciable, seguidas de campos visuales restringidos, disfunción hepática, dermatitis y neuropatía periférica. Fue tratado con reanimación con líquidos y BAL. Todos los síntomas del paciente, incluida su discapacidad visual, se resolvieron durante las siguientes 3 semanas y fue dado de alta sin secuelas (Kamijo et al, 1998) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Una mujer de 33 años sobrevivió a la ingestión de 1850 mg de trióxido de arsénico después del tratamiento con 2,3 propanosulfonato (DMPS) y hemodiálisis (Kruszewska et al, 1996) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Un hombre de 77 años desarrolló náuseas, vómitos, insuficiencia renal y anemia después de ingerir 4 g de trióxido de arsénico en un intento de suicidio. Con cuidados de apoyo, incluida la terapia de quelación con dimercaprol (BAL), el paciente se recuperó gradualmente (Yilmaz et al, 2009) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Una mujer de 67 años que fue tratada por psoriasis persistente con solución de Fowler durante un período de 15 años (estimado en 25 g de trióxido de arsénico en total) desarrolló fibrosis hepática no cirrótica como resultado de la intoxicación crónica por arsénico (Piontek et al, 1989). (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Un hombre de 45 años se presentó al servicio de urgencias con náuseas y vómitos varias horas después de ingerir intencionalmente 1 g de un material que contenía arsénico que se sospechaba que era material dental de trióxido de arsénico. Una radiografía de abdomen reveló varias lesiones radiopacas en el colon ascendente. Su nivel de arsénico en suero fue de 212,5 mcg / L (referencia normal, menos de 20 mcg/L). El tratamiento incluyó lavado gástrico con carbón activado y quelación con ácido dimercaptopropanosulfónico IV (DMPS). Las complicaciones durante su estadía en el hospital incluyeron el desarrollo de una lesión renal aguda; sin embargo, sus síntomas mejoraron posteriormente de manera gradual y fue dado de alta 17 días después (Tan et al, 2015) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

Una mujer de 37 años ingirió intencionalmente 37,5 g de trióxido de arsénico y posteriormente desarrolló hipotensión, taquicardia, prolongación del intervalo QTc, acidosis metabólica, insuficiencia renal aguda, desgarros esofágicos y gastritis. Con terapia de quelación y cuidados de apoyo, se recuperó gradualmente sin secuelas (Lu et al, 2017) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

### Niños

La ingestión aguda de 9 a 14 mg de trióxido de arsénico por un niño de 16 meses produjo signos y síntomas gastrointestinales clásicos de intoxicación por arsénico (Watson et al, 1981) (HazardText, 2021d; Micromedex, 2021c).

## i) Clasificación cancerígena:

**Tabla 4-10 Clasificación carcinogénica - Trióxido de arsénico**

Agencia	ID	Clasificación carcinogénica	Referencia
ACGIH	No listada	No listada	American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2010; PubChem, 2021
USEPA	No listada	No listada	U.S. Environmental Protection Agency, 2011
IARC	Trióxido de arsénico	1	International Agency for Research on Cancer (IARC), 2016; International Agency for Research on Cancer, 2015; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010a; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2008; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2007; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2006; IARC, 2004)
MAK	Arsénico y compuestos inorgánicos de As: Trióxido de arsénico	Categoría 1	DFG: List of MAK and BAT Values 2002, Report No. 38, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area, Wiley-VCH, Weinheim, Federal Republic of Germany, 2002.
NIOSH	No listada	No listada	National Institute for Occupational Safety and Health, 2007
NTP	No listada	No listada	U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, National Toxicology Project
Comunidad Europea	Trióxido de arsénico	1	(European Commission, 2000)

Fuente: Extraído de Arsenic trioxide. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values: (2021) (HazardText, 2021d)

## Definiciones:

- IARC – 1:** El agente (o mezcla) es cancerígeno para los seres humanos. La circunstancia de exposición implica exposiciones que son cancerígenas para los seres humanos. Esta categoría se utiliza cuando existe suficiente evidencia de carcinogenicidad en humanos. Excepcionalmente, un agente (o mezcla) puede incluirse en esta categoría cuando la evidencia de carcinogenicidad en humanos es menos que suficiente, pero hay evidencia suficiente de carcinogenicidad en animales de experimentación y evidencia sólida en humanos expuestos de que el agente (o mezcla) actúa a través de un mecanismo relevante de carcinogenicidad.
- MAK - Categoría 1:** Sustancias que causan cáncer en el hombre y se puede suponer que contribuyen de manera significativa al riesgo de cáncer. Los estudios epidemiológicos proporcionan evidencia adecuada de una correlación positiva entre la exposición de los seres humanos y la aparición de cáncer. Los datos epidemiológicos limitados se pueden corroborar con la evidencia de que la sustancia causa cáncer por un modo de acción que es relevante para el hombre.

- **Comunidad Europea – 1:** Sustancias que se sabe que son cancerígenas para el hombre.

j) Valores de referencia aguda:

**Tabla 4-11 Valores de referencia exposición aguda inhalatoria – trióxido de arsénico**

Criterio de toxicidad	Concentración (ng/m <sup>3</sup> )	Efecto crítico	Referencia
Short-Term Air Permitting Effects Screening Levels (ESLs)	3000	La toxicidad materna en ratas se documentó como estertores durante la exposición antes del apareamiento y la gestación en un estudio de varios días.	(TCEQ, 2011)

Fuente: Extraído de [https://www.tceq.texas.gov/toxicology/esl/list\\_main.html](https://www.tceq.texas.gov/toxicology/esl/list_main.html)

k) Valores de referencia crónica

No se encuentra información específica.

l) Valores de toxicidad

No se encontró información de valores de toxicidad por la vía inhalatoria. Se presenta la información disponible de otras vías:

**Tabla 4-12 Valores de toxicidad - trióxido de arsénico**

Identificación	Animal - vía	Valor informado
Dosis Letal 50 (LD50)	Ratón - intravenosa	10.700 mcg/kg
Dosis Letal 50 (LD50)	Ratón - oral	20 mg/kg
Dosis Letal 50 (LD50)	Ratón - subcutánea	9800 mcg/kg
Dosis Letal 50 (LD50)	Rata - intraperitoneal	871 mg/kg
Dosis Letal 50 (LD50)	Rata - oral	10 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Vaca - oral	30 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Pollo - subcutánea	13 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Perro - oral	10 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Humano - oral	1.429 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Conejo - intravenosa	10.560 mcg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Conejo - oral	4 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Conejo – subcutánea	7 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Rata - subcutánea	8 mg/kg

Fuente: Arsenic trioxide. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values: (2021) (HazardText, 2021d)

#### 4.2.2.5 Estándares Normativos internacionales ocupacionales

**Tabla 4-13 Límites ocupacionales de exposición inhalatoria - trióxido de arsénico**

Entidad	Descripción	Valor (mg/m <sup>3</sup> )	Categoría carcinogénica	Efecto crítico
ACGIH	TLV-TWA	No listado	No listado	-
	TLV-STEL	No listado		
	TLV-Ceiling	No listado		
OSHA	8 hrs. TWA	No listado	No listado	
	Concentración máxima aceptable	No listado		
NIOSH	TWA	No listado	No listado	
	STEL	No listado		
	Ceiling	No listado		
	IDLH	No listado		

Fuente: Workplace standards extraído de Arsenic trioxide. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Value (HazardText, 2021d)

#### 4.2.2.6 Toxicocinética

##### m) Absorción:

Los compuestos de arsénico se absorben principalmente a través del tracto gastrointestinal o después de la inhalación. Hasta el 80% del trióxido de arsénico ingerido puede ser absorbido (Mahieu et al, 1981) (Micromedex, 2021c).

Dado que el arsénico existe en el aire como material particulado, la absorción a través del pulmón implica dos procesos: la deposición de las partículas en la superficie del pulmón y la absorción de arsénico del material depositado. En los pacientes con cáncer de pulmón expuestos al arsénico en el humo del cigarrillo, se calculó que la deposición era aproximadamente del 40% y la absorción era del 75% al 85% (Holland et al. 1959). Por lo tanto, la absorción total (expresada como porcentaje de arsénico inhalado) fue de aproximadamente 30 a 34%. En los trabajadores expuestos a polvos de trióxido de arsénico en fundiciones, la cantidad de arsénico excretado en la orina (la principal vía de excreción) fue de aproximadamente el 40-60% de la dosis inhalada estimada (Pinto et al. 1976; Vahter et al.1986). La absorción de polvos y humos de trióxido de arsénico (evaluados mediante la medición de metabolitos urinarios) se correlacionó con las concentraciones de aire de arsénico promedio ponderadas en el tiempo de los muestreadores de aire de la zona de respiración personal (Offergelt et al. 1992). Las correlaciones fueron mejores inmediatamente después de un turno y justo antes del inicio del siguiente turno. Aunque el porcentaje de deposición no se midió en estos casos, parece probable que se absorbiera casi todo el arsénico depositado. Esta conclusión está respaldada por estudios de instilación intratraqueal en ratas y hámsteres, donde la eliminación de oxi compuestos de arsénico (arsenito de sodio, arseniato de sodio, trióxido de arsénico) del pulmón fue rápida y casi completa (60-90% en 1 día) (Marafante y Vahter 1987; Rhoads y Sanders 1985). En contraste, el sulfuro de arsénico y el arsenato de plomo se eliminaron más lentamente (Marafante y Vahter 1987), lo que indica que la tasa de absorción puede ser menor si el arsénico inhalado se encuentra en una forma

altamente insoluble. No hay datos que sugieran que la absorción de arsénico inhalado en los niños sea diferente de la de los adultos (ATSDR, 2007).

n) Distribución:

La distribución del arsénico después de la exposición por inhalación se ha estudiado en ratones (Burchiel et al. 2009, 2010). Los ratones (machos C57B1 / 6N) se expusieron (solo por la nariz) a aerosoles de trióxido de arsénico en concentraciones de 50 o 1.000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  As durante 3 horas/día durante 14 días. Inmediatamente después de la exposición, se observaron aumentos relacionados con la dosis en el arsénico absorbido en la vejiga, la sangre, el cerebro, los riñones, el hígado, los pulmones y el bazo. Las concentraciones más altas se observaron en hígado, seguidas de vejiga y riñón (ATSDR, 2016).

La acumulación de arsénico se observa típicamente en tejidos que contienen cantidades significativas de proteínas que contienen grupos sulfhidrilo (ejemplo., uñas, cabello, médula ósea) (Shen et al, 1997)(Micromedex, 2021c)

o) Metabolismo

En uso terapéutico el trióxido de arsénico se somete a hidrólisis para formar ácido arsenioso, la especie farmacológicamente activa, cuando se coloca en solución. El ácido arsenioso se metila en metabolitos menos citotóxicos, ácido monometilarsónico y ácido dimetilarsínico, mediante metiltransferasas principalmente en el hígado. En uso terapéutico se ha observado que en el hígado el arsénico pentavalente se reduce a arsénico trivalente por la arsenato reductasa; el arsénico trivalente se metila en ácido monometilarsónico y el ácido monometilarsónico es metilado en ácido dimetilarsónico mediante metiltransferasas. El metabolito activo es el ácido dimetilarsínico (Prod Info TRISENOX (R) IV injection, 2010) (Micromedex, 2021c).

p) Excreción

Riñón: Aproximadamente el 15% de la dosis de trióxido de arsénico se excreta en la orina como ácido arsenioso inalterable, la especie activa. Los metabolitos metilados del ácido arsenioso (ácido monometilarsónico y ácido dimetilarsínico) se excretan principalmente en la orina (Prod Info TRISENOX (R) IV inyección, 2010).

Bilis: Es extensa, basado en la aparición de cantidades sustancialmente mayores de arsénico recuperadas en las heces frente a la orina en un estudio (Shen et al, 1997).

*Total body clearance:* El clearance total del ácido arsenioso, la especie activa del trióxido de arsénico, es de 49 L/h. El clearance no se ve afectado por el peso corporal o la dosis (para un rango de dosis de 7 a 32 mg) (Prod Info TRISENOX (R) IV inyección, 2010) (Micromedex, 2021c).

## q) Vida media eliminación

La vida media de eliminación media del ácido arsenioso, la especie activa del trióxido de arsénico, es de 10 a 14 horas (Prod Info TRISENOX (R) IV inyección, 2010) (Micromedex, 2021c).

#### 4.2.2.7 Mecanismo de acción

## r) Mecanismos farmacocinéticos

El mecanismo de acción del trióxido de arsénico no se comprende del todo bien; sin embargo, los estudios in vitro indican que los cambios morfológicos y la fragmentación del ADN característicos de la apoptosis ocurren en las células de leucemia promielocítica humana NB4 después de la administración de trióxido de arsénico. Además, el trióxido de arsénico induce daño y degradación de la proteína de fusión PML / RAR-alfa (ProdInfo TRISENOX (R) IV inyección, 2010) (Micromedex, 2021c).

## s) Mecanismos de toxicidad

El arsénico trivalente altera la fosforilación oxidativa, lo que conduce a la formación de radicales libres mediante la inhibición del piruvato deshidrogenasa, que posteriormente disminuye la gluconeogénesis debido a la falta de acetyl-CoA. Crónicamente, el arsénico puede causar daño al ADN, mutación en el gen supresor p-53 e inhibición de los mecanismos de reparación del ADN que conducen al cáncer (Ford, 2006) (Micromedex, 2021c)..

### 4.2.3 Tricloruro de arsénico - Número CAS: 7784-34-1

#### 4.2.3.1 Usos/formas/fuentes

##### Usos

Se utiliza en las industrias de la cerámica y la metalurgia, en la producción de productos farmacéuticos, herbicidas e insecticidas con arsénico orgánico y en la síntesis de cloroderivados de la arsina (Budavari, 1996; ITI, 1995; Harbison, 1998; Hathaway et al, 1996; Lewis, 1997; HSDB , 2000) (HazardText, 2021c).

##### Formas

El tricloruro de arsénico es un líquido aceitoso incoloro o amarillo, que se evapora en el aire y tiene un olor acre desagradable y un sabor metálico dulce (AAR, 1998; (Budavari, 1996; Hathaway et al, 1996; ITI, 1995; Sittig, 1991). ; Lewis, 1998; Lewis, 1997). El tricloruro de arsénico libera ARSÉNICO y ÁCIDO CLORHÍDRICO al entrar en contacto con el agua o cuando se calienta hasta su descomposición (AAR, 1998; (Lewis, 1996; EPA, 1985; OHM / TADS, 1991; HSDB, 2000). Su toxicidad está determinada por ambos componentes (HazardText, 2021c).

#### 4.2.3.2 Efectos clínicos agudos:

Para observar una intoxicación aguda se deben dar dos elementos mínimos. El primero es que exista exposición, y el segundo es que la dosis de exposición sea suficientemente alta. Y en este sentido para observar una intoxicación aguda por arsénico, las dosis de exposición deben ser particularmente altas, tanto que éstas no se ven en ambientes comunitarios sino en exposiciones ocupacionales, con la única excepción de la ingesta directa de preparados concentrados de arsénico con propósitos suicidas y en ingestas accidentales de este tipo de preparados, pero en ningún caso ocurrirá por exposición a través del aire ambiental.

Los vapores o el polvo de tricloruro de arsénico son muy irritantes para los ojos, la piel, la nariz, la garganta y las membranas mucosas (AAR, 1998; Lewis, 1997; EPA, 1985; Grant, 1993; HSDB, 2000). La irritación de los ojos por los vapores de tricloruro de arsénico puede caracterizarse por enrojecimiento, lagrimeo y sensación de picazón o ardor (Grant, 1993; HSDB, 2000). La exposición dérmica directa puede causar irritación y formación de ampollas en la piel causando daños graves en el punto de contacto (Lewis, 1998; EPA, 1985; Sittig, 1991). El tricloruro de arsénico irrita e inflama las membranas mucosas de la nariz, aumentando enormemente la permeabilidad de los capilares sanguíneos (HSDB, 2000; Morgan, 1993; EPA, 1985). Pueden seguir sensaciones de ardor y sequedad, y constricción de las cavidades nasales, incluso conduciendo a perforaciones del tabique (Clayton y Clayton, 1994; Hathaway et al, 1996). Después de la ingestión, el tricloruro de arsénico puede causar irritación severa de la boca, el esófago y el estómago (EPA, 1985; HSDB, 2000). Los efectos inmediatos incluyen ardor sensaciones de los labios, constricción de la garganta y dificultad para tragar (Hathaway et al, 1996; HSDB, 2000). Puede ocurrir una corrosión severa en el esófago o el estómago. Puede producirse gastroenteritis hemorrágica acompañada de pérdida de electrolitos y líquidos, colapso y shock (Sittig, 1991; HSDB, 2000). La ingestión aguda de arsénico generalmente produce síntomas en 30 a 60 minutos, pero la aparición de los síntomas puede retrasarse varias horas si se ingiere con alimentos (Morgan, 1993; Sittig, 1991; HSDB, 2000). Después de la ingestión, inhalación o exposición dérmica al tricloruro de arsénico, puede ocurrir una intoxicación sistémica por arsénico (CHRIS, 2000; EPA, 1985; HSDB, 2000; Lewis, 1998). Los principales órganos diana de la intoxicación por arsénico inicialmente son el tracto gastrointestinal, los riñones, el hígado, el corazón y el cerebro. Eventualmente, la piel, la médula ósea y el sistema nervioso periférico pueden dañarse significativamente (Finkel, 1983; Morgan, 1993; Sittig, 1991; HSDB, 2000). Un sabor metálico dulce o un olor a ajo en el aliento y las heces pueden ayudar a identificar la intoxicación por tricloruro de arsénico. Los síntomas adicionales incluyen dolor abdominal intenso, vómitos, disfagia y diarrea acuosa abundante (como agua de arroz) y, a veces, con sangre (EPA, 1988; HSDB, 2000; Morgan, 1993; Hathaway et al, 1996; Sittig, 1991). Son frecuentes la deshidratación, la sed intensa y las alteraciones hidroelectrolíticas. La hipovolemia por fuga capilar ("tercer espacio") y el aumento de la permeabilidad capilar son signos tempranos comunes de intoxicación (Morgan, 1993; EPA, 1988; HSDB, 2000). La lesión renal se manifiesta como oliguria con hematuria, proteinuria y glucosuria y, en casos graves de intoxicación, puede producirse una necrosis tubular aguda (Morgan, 1993; HSDB, 2000). El tricloruro de arsénico daña el parénquima hepático y produce un aumento de las enzimas hepáticas, infiltración grasa,

necrosis central y cirrosis (HSDB, 2000). Los efectos cardiovasculares pueden resultar de alteraciones electrolíticas y acción tóxica directa después de la intoxicación por tricloruro de arsénico, causando arritmias cardíacas y anomalías del ECG que puede persistir durante meses después de la recuperación (Morgan, 1993; HSDB, 2000). Puede producirse encefalopatía permanente por exposición aguda a compuestos de arsénico. La encefalopatía puede provocar atrofia de la corteza de uno a seis meses después de la exposición (Fincher y Koerker, 1987). Los efectos agudos del sistema nervioso central pueden incluir dolores de cabeza, mareos, debilidad y espasmos musculares, sudores fríos, letargo, delirio, convulsiones ocasionales y síncope; pueden producirse casos graves, parálisis general, coma e incluso la muerte (HSDB, 2000; Lewis, 1996; Morgan, 1993). La neuropatía periférica de las neuronas sensoriales y motoras puede aparecer después de la intoxicación por tricloruro de arsénico, independientemente de la ruta de exposición (Clayton y Clayton, 1994; Harbison, 1998). Comúnmente comienza una a 3 semanas después (Le Quesne y McLeod, 1977; Heyman et al, 1956), generalmente como parestesias de las plantas de los pies, luego las manos, progresando proximalmente durante los siguientes días (Heyman et al, 1956). Entonces se desarrolla una debilidad y atrofia muscular severa, más distal que proximal, causando discapacidad (Le Quesne y McLeod, 1977; Donofrio y col., 1987; Heyman y col., 1956). Inicialmente puede confundirse con el síndrome de Guillain-Barré (Clayton y Clayton, 1994; Donofrio et al, 1987).

Los hallazgos físicos de la neuropatía por arsénico generalmente incluyen una disminución prominente de la sensación al tacto, dolor y temperatura, siguiendo una distribución simétrica de guante y calcetín (Harbison, 1998; Heyman et al, 1956). También son comunes la pérdida del sentido de la vibración, la pérdida de reflejos y la debilidad muscular. El arsénico inhibe las enzimas necesarias para la respiración celular y tiene el efecto de agotar las reservas de energía celular, lo que conduce a la muerte celular (Schoolmeester y White, 1980). La hemólisis, pancitopenia y anemia hipoplásica pueden ocurrir después de una intoxicación aguda por arsénico (ITI, 1995; Kyle y Pease, 1965; Kjeldsberg y Ward, 1972). Líneas blancas transversales en las uñas, pueden verse después de una exposición aguda, suelen tardar 5 semanas en aparecer por encima de la cutícula y avanzar 1 mm por semana, permitiendo una aproximación del tiempo de exposición aguda (Heyman et al, 1956). En los animales, los síntomas agudos de la intoxicación por tricloruro de arsénico pueden incluir salivación, sed, vómitos, cólicos violentos, diarrea acuosa y a veces, con sangre y agotamiento. Los síntomas puede progresar a depresión y pérdida del apetito, marcha tambaleante, temblores, estupor, parálisis de las extremidades inferiores y convulsiones (HazardText, 2021c).

#### 4.2.3.3 Efectos clínicos crónicos

La absorción oral de arsénico generalmente es la ruta de exposición más importante, mientras que la inhalación normalmente contribuye con menos del 1% de la dosis total (European Commission, 2000). Si bien la ruta de exposición ocupacional más común al arsénico en personas es la inhalatoria, la probabilidad de exponerse a niveles ocupacionales en un escenario comunitario es extremadamente baja.

La intoxicación crónica por arsénico debido al tricloruro de arsénico produce manifestaciones dérmicas más prominentes que los efectos gastrointestinales que caracterizan la intoxicación aguda. Hiperpigmentación de la piel, hiperqueratosis, edema de la cara, párpados y tobillos, salivación excesiva y sudoración con olor a ajo tanto en el aliento como en la transpiración, dermatitis exfoliativa. La dermatitis y los cambios cutáneos cancerosos son signos tempranos de intoxicación crónica (Morgan, 1993; HSDB, 2000; Lewis, 1996) Raffle, 1994). También puede ocurrir pérdida de cabello o uñas y estrías blancas en las uñas (líneas de Mee) (HSDB, 2000; (Morgan, 1993; Finkel, 1983). Los trabajadores expuestos crónicamente al arsénico por inhalación y contacto dérmico han desarrollado ronquera, dolor de garganta, irritación nasal y posible perforación del tabique nasal, irritación de ojos, piel y membranas mucosas y, raramente, cirrosis del hígado (ACGIH, 1996; (Harbison, 1998; Sittig, 1991; HSDB, 2000; Clayton y Clayton, 1994). El tricloruro de arsénico es muy irritante para los ojos; La exposición crónica puede causar conjuntivitis con lagrimeo y sensación de irritación, posiblemente debido a la excreción de arsénico en las lágrimas. Se debate si los compuestos arsenicales orgánicos afectan selectivamente al nervio óptico o la retina causando ceguera (Grant, 1993; Hathaway et al, 1996). Las alteraciones del sistema digestivo, como calambres, estomatitis, estreñimiento o diarrea, náuseas y pérdida de apetito y peso corporal, pueden ser el resultado de la exposición crónica al tricloruro de arsénico (Lewis, 1996; Morgan, 1993; HSDB, 2000). El daño hepático, revelado como hepatomegalia e ictericia, puede progresar a cirrosis, hipertensión portal y ascitis (Lewis, 1996; Morgan, 1993; HSDB, 2000). La intoxicación sistémica crónica también puede caracterizarse por neuritis periférica, que se manifiesta por confusión y debilidad, falta de coordinación, ardor u hormigueo en las manos y pies, parestesia e hiperestesia (Grant, 1993; HSDB, 2000; ITI, 1995). Los compuestos arsenicales pueden afectar la médula ósea y alterar la composición celular de la sangre (HSDB, 2000). El arsénico tiene un efecto depresor sobre la eritropoyesis de la médula ósea y mielopoyesis (ITI, 1995; Sittig, 1991). La evaluación hematológica después de la exposición crónica al tricloruro de arsénico generalmente revela anemia hipoplásica o aplásica, a veces acompañado de leucopenia. Se ha informado leucemia mieloide aguda, y la eosinofilia y la anisocitosis pueden ser evidentes (ITI, 1995; HSDB, 2000; Kjeldsberg y Ward, 1972). Se ha informado que el deterioro de la circulación periférica y el fenómeno de Raynaud están relacionados con la exposición a largo plazo a compuestos de arsénico (Hathaway et al, 1996). Se han observado cambios en el electrocardiograma después de la exposición crónica al arsénico, estos cambios se atribuyen a alteraciones electrolíticas causadas por intoxicación por arsénico (Sittig, 1991). En los animales, los síntomas crónicos de la intoxicación por tricloruro de arsénico pueden incluir indigestión, sed, emaciación, pelo seco, pulso débil e irregular membranas mucosas de color rojo ladrillo (HSDB, 2000) (HazardText, 2021c).

#### 4.2.3.4 Rangos de toxicidad:

t) Exposición letal mínima

**INHALACIÓN:** En animales de experimentación, una exposición por inhalación de 5 minutos a 40.000 ppm de tricloruro de arsénico provoca la muerte por espasmo laríngeo (Delepine, 1923).

**DÉRMICA:** Después de la exposición dérmica directa con el líquido, la necrosis tisular progresa rápidamente con absorción sistémica de arsénico (Delepine, 1923).

**ORAL:** 1 mg/kg de arsénico ingerido puede ser letal en un niño (Woody y Komentani, 1948). Tan solo 20 miligramos de arsénico pueden producir toxicidad potencialmente mortal (Zaloga et al, 1970; Schoolmeester & White, 1980). Una dosis oral de 120 mg de trióxido de arsénico puede ser fatal (Finkel, 1983).

**DOSIS LETAL** - La dosis humana mortal es de 70 a 180 mg dependiendo del peso de la víctima (EPA, 1985) (HazardText, 2021c).

u) Exposición máxima tolerada

**AGUDA:** Las estimaciones de dosis tóxicas orales agudas de varios compuestos de arsénico oscilan entre un miligramo y 10 gramos. El trióxido de arsénico en forma solubilizada se convierte en arsenito de sodio, que es más tóxico que en forma no solubilizada. La ingestión de 200 miligramos de trióxido de arsénico por un adulto puede ser letal (Baselt y Cravey, 1989; Baselt, 1988). La ingestión aguda de 9 a 14 miligramos de trióxido de arsénico por un niño de 16 meses produjo signos y síntomas gastrointestinales clásicos de intoxicación por arsénico (Watson et al, 1981). Un hombre de 30 años sobrevivió a una ingestión de 6 onzas de "Blue Ball Rat Killer" que contenía 1,5% de óxido de arsénico (2.150 miligramos de arsénico metálico por 6 onzas) con terapia agresiva (reanimación con fluidos, quelación y hemodiálisis) (Fesmire et al, 1988). El arsénico trivalente (arsenito) es más tóxico en animales que la forma pentavalente (arsenato) (Morgan, 1989). Puede producirse una toxicidad significativa con grandes cantidades de sales pentavalentes en humanos. El arsénico pentavalente puede convertirse in vitro en arsénico trivalente (HazardText, 2021c).

## v) Clasificación cancerígena

**Tabla 4-14 Clasificación carcinogénica - Tricloruro de arsénico**

Agencia	ID	Clasificación carcinogénica	referencia
<b>ACGIH</b>	No listada	No listada	American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2010; PubChem, 2021
<b>USEPA</b>	No listada	No listada	U.S. Environmental Protection Agency, 2011
<b>IARC</b>	No listada	No listada	International Agency for Research on Cancer (IARC), 2016; International Agency for Research on Cancer, 2015; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010a; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2008; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2007; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2006; IARC, 2004)
<b>MAK</b>	No listada	No listada	DFG: List of MAK and BAT Values 2002, Report No. 38, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area, Wiley-VCH, Weinheim, Federal Republic of Germany, 2002.
<b>NIOSH</b>	No listada	No listada	National Institute for Occupational Safety and Health, 2007
<b>NTP</b>	No listada	No listada	U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, National Toxicology Project
<b>Comunidad Europea</b>	No listada	-	(European Commission, 2000)

Fuente: Extraído de Arsenic trichloride. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021c).

## w) Valores de referencia aguda:

Sin información.

## x) Valores de referencia crónica

Sin información.

y) Valores de toxicidad

**Tabla 4-15 Valores de toxicidad - tricloruro de arsénico**

Identificación	Animal - vía	Valor informado
Concentración letal mínima publicada (LCLo)	Gato - inhalación	200 mg/m <sup>3</sup> para 20 metros
Concentración letal mínima publicada (LCLo)	Ratón - inhalación	338 mg/m <sup>3</sup> para 10 metros
Dosis letal 50 (LD50)	Rata - oral	48 mg/kg
Dosis letal 50 (LD50)	Rata - dermal	80 mg/kg

Fuente: Workplace standards extraído de Arsenic trichloride. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021c).

#### 4.2.3.5 Estándares Normativos internacionales ocupacionales

**Tabla 4-16 Límites ocupacionales de exposición inhalatoria tricloruro de arsénico**

Entidad	Descripción	Valor (mg/m <sup>3</sup> )	Categoría carcinogénica	Efecto crítico
ACGIH	TLV-TWA	No listado	No listado	-
	TLV-STEL	No listado		
	TLV-Ceiling	No listado		
OSHA	8 hrs. TWA	No listado	No listado	
	Concentración máxima aceptable	No listado		
NIOSH	TWA	No listado	No listado	
	STEL	No listado		
	Ceiling	No listado		
	IDLH	No listado		

Fuente: Workplace standards extraído de Arsenic trichloride. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021c).

#### 4.2.3.6 Toxicocinética

No se encuentra información específica.

#### 4.2.3.7 Mecanismo de acción

No se encuentra información específica.

#### 4.2.4 Pentóxido de arsénico - Número CAS: 1303-28-2

##### 4.2.4.1 Usos/formas/fuentes

###### Usos

El pentóxido de arsénico se utiliza como herbicida, conservante de madera, adhesivos metálicos, insecticidas, fungicida, en teñido e impresión, y en la producción de arseniatos (Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional, 2008; Sax & Lewis, 1987; Budavari, 1989; OHM / TADS, 1991; HSDB, 1991; EPA, 1985). Se sabe poco sobre los efectos del pentóxido de arsénico (HazardText, 2021b).

###### Formas

El pentóxido de arsénico es un compuesto de arsénico inorgánico sólido pentavalente, cristalino, blanco, amorfo, inodoro. Se disuelve en agua para formar ácido arsénico (AAR, 1987; Sax y Lewis, 1987; Sax y Lewis, 1989; Budavari, 1989; OHM / TADS, 1991; CHRIS, 1991; HSDB, 1991; EPA, 1985) (HazardText, 2021b).

##### 4.2.4.2 Efectos clínicos agudos:

Para observar una intoxicación aguda se deben dar dos elementos mínimos. El primero es que exista exposición, y el segundo es que la dosis de exposición sea suficientemente alta. Y en este sentido para observar una intoxicación aguda por arsénico, las dosis de exposición deben ser particularmente altas, tanto que éstas no se ven en ambientes comunitarios sino en exposiciones ocupacionales, con la única excepción de la ingesta directa de preparados concentrados de arsénico con propósitos suicidas y en ingestas accidentales de este tipo de preparados, pero en ningún caso ocurrirá por exposición a través del aire ambiental.

**Toxicológicos:** El arsénico pentavalente puede transformarse en arsénico o sustituir al fosfato inorgánico en la glucólisis, lo que provoca el desacoplamiento de la fosforilación oxidativa y la pérdida de la formación de ATP (HazardText, 2021b)(Micromedex, 2021b).

**Toxicidad leve a moderada:** Los síntomas gastrointestinales ocurren rápidamente después de una ingestión aguda. Los signos y síntomas iniciales incluyen ardor en los labios, constricción de la garganta y disfagia. A continuación de estos síntomas sigue un dolor abdominal intenso, náuseas, vómitos y diarrea profusa "como agua de arroz" que puede provocar hipovolemia (HazardText, 2021b)(Micromedex, 2021b).

Además, la hipovolemia por fuga capilar (tercer espacio) es un efecto temprano común. Puede producirse una prolongación del Intervalo QT. Los calambres musculares, el edema facial, la bronquitis, la disnea, el dolor de pecho, la deshidratación, la sed intensa y las alteraciones de los líquidos y los electrolitos también son comunes después de exposiciones importantes. También se puede desarrollar un olor a ajo en el aliento y las heces. La toxicidad subaguda puede producir

neuropatías, tanto motoras como sensoriales, y puede progresar a un síndrome similar a Guillain-Barré (HazardText, 2021b)(Micromedex, 2021b).

**Toxicidad severa:** La hipotensión y la taquicardia son signos tempranos comunes de intoxicación grave. La hipotensión puede ser resistente a la reanimación con líquidos y puede producirse insuficiencia multiorgánica. Pueden aparecer fiebre y taquipnea. Estos pacientes pueden desarrollar arritmias ventriculares, incluida la Torsade de pointes (TdP). Se han informado encefalopatía, convulsiones y coma. Varios días después de la ingestión pueden aparecer insuficiencia renal aguda, anemia hemolítica, rabdomiólisis y hepatitis (HazardText, 2021b)(Micromedex, 2021b).

#### 4.2.4.3 Efectos clínicos crónicos

La absorción oral de arsénico generalmente es la ruta de exposición más importante, mientras que la inhalación normalmente contribuye con menos del 1% de la dosis total (European Commission, 2000). Si bien la ruta de exposición ocupacional más común al arsénico en personas es la inhalatoria, la probabilidad de exponerse a niveles ocupacionales en un escenario comunitario es extremadamente baja.

La exposición crónica, el arsénico puede causar daño al ADN, mutación en el gen supresor p-53 e inhibición de los mecanismos de reparación del ADN que conducen al cáncer(HazardText, 2021b)(Micromedex, 2021b).

La secuencia de intoxicación crónica incluye debilidad, anorexia, hepatomegalia, ictericia y molestias gastrointestinales, seguidas de conjuntivitis, irritación del tracto respiratorio superior, hiperpigmentación, y dermatitis exfoliativa. Una voz ronca y perforación del tabique es un resultado común después de una inhalación prolongada de polvo o humo de arsénico blanco. Los síntomas del sistema nervioso periférico pueden incluir entumecimiento, ardor y hormigueo en las manos y los pies; dolor; parestesias; fasciculaciones musculares; temblores fuertes; ataxia; y confusión mental. Puede seguir debilidad muscular, sensibilidad en las extremidades y dificultad para caminar. La fase final consiste en una neuropatía sensorial periférica de manos y pies. También puede ocurrir neuropatía motora asociada. Ciertos compuestos de arsénico son carcinógenos humanos conocidos. La exposición crónica en entornos ocupacionales puede causar intoxicación y conlleva un mayor riesgo de cáncer de piel, pulmón, vejiga y posiblemente de hígado (HazardText, 2021b)(Micromedex, 2021b).

Se consideró que la exposición crónica al pentóxido de arsénico era, al menos en parte, responsable de un patrón complejo de efectos sobre la salud en una familia que incluye: hiperestésias sensoriales, calambres musculares, conjuntivitis pruriginosa recurrente, otitis media, sinusitis, bronquitis, neumonía, erupciones cutáneas descritas como " tipo sarampión", piel enrojecida y engrosada en las plantas, malestar general, disminución de la sensibilidad en manos y pies, dolores de cabeza, desmayos, convulsiones tónico clónicas en niños más pequeños,

epistaxis, fácil formación de moretones, alopecia y parto prematuro (HazardText, 2021b)(Micromedex, 2021b).

#### 4.2.4.4 Rangos de toxicidad:

##### z) Exposición letal mínima

Una concentración de 10 ppm de pentóxido de arsénico en el agua presenta un peligro agudo (OHM / TADS, 2000).

Se observó una rápida extinción en las colonias reproductoras de ratas y ratones cuando se agregaron 5 mg / L de pentóxido de arsénico al agua potable (OHM / TADS, 2000). 1 mg / kg de arsénico ingerido puede ser letal en un niño (Woody y Kometani, 1948). La dosis letal más pequeña registrada de arsénico es de aproximadamente 130 mg (Bingham et al, 2001; OHM / TADS, 2001). Tan solo 20 mg de arsénico pueden producir toxicidad potencialmente mortal (Hutton & Christians, 1983; Schoolmeester & White, 1980; Zaloga et al, 1970) (HazardText, 2021b)(Micromedex, 2021b).

INFORMES DE CASOS: Entre 1966 y 1979, se produjeron 61 casos de intoxicación accidental por arsenito de sodio, incluidos 11 pacientes que fueron hospitalizados y 24 casos mortales en adultos y niños reportado al Sistema de Monitoreo de Incidentes de Plaguicidas de la EPA (PIMS) (EPA, 1988) (HazardText, 2021b)(Micromedex, 2021b).

##### aa) Exposición máxima tolerada

AGUDA: Las estimaciones de dosis tóxicas orales agudas de varios compuestos de arsénico oscilan entre 1 miligramo y 10 gramos. El arsénico pentavalente se puede convertir in vivo en arsénico trivalente. El arsénico trivalente (arsenito) es más tóxico en los animales que la forma pentavalente (arsenato). Sin embargo, puede ocurrir una toxicidad significativa con grandes cantidades de sales pentavalentes en humanos (Morgan, 1993).

Un hombre de 30 años sobrevivió a una ingestión de 6 onzas de "Blue Ball Rat Killer" que contenía 1,5% de óxido de arsénico (2.150 miligramos de arsénico metálico por 6 onzas) con terapia agresiva (reanimación con fluidos, quelación y hemodiálisis) (Fesmire et al, 1988).

En una serie de casos de 149 ingestas de veneno para hormigas que contenía arseniato en Minnesota, principalmente en niños menores de tres años, no se les administró ningún tratamiento y no se produjeron efectos adversos en el seguimiento de 4 a 6 meses después de la exposición. En dos casos, los niveles de arsénico en orina sin quelación alcanzaron 3.500 y 5.819 mcg/24 horas y no se observaron secuelas, lo que sugiere que muchas ingestiones pequeñas de arsénico pueden permanecer asintomáticas (Kingston et al, 1993).

## bb) Clasificación cancerígena

**Tabla 4-17 Clasificación carcinogénica - Pentóxido de arsénico**

Agencia	ID	Clasificación carcinogénica	referencia
ACGIH	No listada	No listada	American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2010; PubChem, 2021
USEPA	No listada	No listada	U.S. Environmental Protection Agency, 2011
IARC	Pentóxido de arsénico	1	International Agency for Research on Cancer (IARC), 2016; International Agency for Research on Cancer, 2015; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010a; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2008; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2007; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2006; IARC, 2004)
MAK	No listada	No listada	DFG: List of MAK and BAT Values 2002, Report No. 38, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area, Wiley-VCH, Weinheim, Federal Republic of Germany, 2002.
NIOSH	No listada	No listada	National Institute for Occupational Safety and Health, 2007
NTP	No listada	No listada	U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, National Toxicology Project
Comunidad Europea	Pentóxido de arsénico	1	(European Commission, 2000)

Fuente: extraído de Arsenic pentoxide. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021b).

## Definiciones:

- **IARC – 1:** El agente (o mezcla) es cancerígeno para los seres humanos. La circunstancia de exposición implica exposiciones que son cancerígenas para los seres humanos. Esta categoría se utiliza cuando existe suficiente evidencia de carcinogenicidad en humanos. Excepcionalmente, un agente (o mezcla) puede incluirse en esta categoría cuando la evidencia de carcinogenicidad en humanos es menos que suficiente, pero hay evidencia suficiente de carcinogenicidad en animales de experimentación y evidencia sólida en humanos expuestos de que el agente (o mezcla) actúa a través de un mecanismo relevante de carcinogenicidad.
- **Comunidad Europea – 1:** Sustancias que se sabe que son cancerígenas para el hombre.

## cc) Valores de referencia aguda:

No se encuentra información específica

dd) Valores de referencia crónica

No se encuentra información específica

ee) Valores de toxicidad

**Tabla 4-18 Valores de toxicidad - pentóxido de arsénico**

Identificación	Animal - vía	Valor informado
Dosis letal 50 (LD50)	Ratón - oral	55 mg/kg
Dosis letal 50 (LD50)	Rata - oral	8 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Conejo - intravenosa	6 mg/kg
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Conejo - subcutánea	12.400 mcg/kg

Fuente: Extraído de Arsenic pentoxide. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021b).

#### 4.2.4.5 Estándares Normativos internacionales ocupacionales

**Tabla 4-19 Límites ocupacionales de exposición inhalatoria pentóxido de arsénico**

Entidad	Descripción	Valor (mg/m <sup>3</sup> )	Categoría carcinogénica	Efecto crítico
ACGIH	TLV-TWA	No listado	No listado	-
	TLV-STEL	No listado		
	TLV-Ceiling	No listado		
OSHA	8 hrs. TWA	No listado	No listado	
	Concentración máxima aceptable	No listado		
NIOSH	TWA	No listado	No listado	
	STEL	No listado		
	Ceiling	No listado		
	IDLH	No listado		

Fuente: Workplace standards extraído de Arsenic pentoxide. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021b).

ff) Toxicocinética

Absorción: El pentóxido de arsénico se absorbe mínimamente a través de la piel intacta y se absorbe fácilmente por ingestión, inhalación y a través de las membranas mucosas (CDC) (Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional, 2008)(Micromedex, 2021b).

Se realizaron experimentos con vacas en pastoreo y vacas mantenidas en el interior para estudiar la transferencia de elementos tóxicos de su ración a la leche y tejidos comestibles. Los elementos tóxicos se administraron mediante obleas de concentrados que contenían una mezcla de cadmio, plomo, acetato mercurio y pentóxido de arsénico. El hígado y particularmente el riñón fueron los sitios principales de acumulación de elementos. El aumento de las concentraciones de elementos en la dieta no dio como resultado concentraciones significativamente más altas en la leche, la sangre y el tejido muscular. El arsénico soluble resultó en niveles más altos de este elemento en

el tejido muscular. En cuanto al carácter de los cambios patológicos, no se observaron diferencias esenciales entre los grupos control y experimental. ("ARSENIC PENTOXIDE HSDB ® - Hazardous Substances Data Bank," 1992).

gg) Mecanismo de acción

No se encuentra información específica

#### 4.2.5 Arsina - Número CAS: 7784-42-1

##### 4.2.5.1 Usos/formas/fuentes

**USO COMERCIAL:** La arsina se produce intencionalmente para su uso en síntesis orgánica y en la industria electrónica (US DHHS, 1986; Sheehy & Jones, 1993; Schenker, 1992). Se utiliza en la industria de los semiconductores para grabar arseniuro de galio, lo que mejora la eficiencia de los semiconductores (HazardText, 2021e).

**FUENTES:** La arsina se produce cuando el agua entra en contacto con arseniuro metálico o cuando los ácidos entran en contacto con arsénico metálico o compuestos de arsénico (US DHHS, 1986) (HazardText, 2021e).

**PRODUCCIÓN ACCIDENTAL DE ARSINA (INDUSTRIA):** Las exposiciones pueden resultar de cualquier operación en la que un ácido reductor o agua actúe sobre metales u otras sustancias que contengan arsénico / arseniuro (Stokinger, 1981). Las circunstancias comunes a la industria que han resultado en exposición a la arsina incluyen: fundición y refinado de metales, galvanizado, soldadura, recubrimiento de plomo, grabado y rociado de agua sobre escoria metálica (US DHHS, 1986) (HazardText, 2021e).

**PRODUCCIÓN ACCIDENTAL DE ARSINA (CONSUMIDORES):** Las circunstancias en las que los hogares, los agricultores u otros consumidores han generado accidentalmente arsina incluyen: el uso de soluciones ácidas para limpiar los desagües en los que anteriormente se vertieron compuestos de arsénico, el uso de ácido para limpiar los contenedores que anteriormente contenían herbicidas a base de arsenito de sodio, exponiendo escaleras de aluminio a piscinas de arsenito de sodio., reutilización de contenedores para insecticidas incompatibles (US DHHS, 1986) (HazardText, 2021e).

##### 4.2.5.2 Efectos clínicos agudos:

Para observar una intoxicación aguda se deben dar dos elementos mínimos. El primero es que exista exposición, y el segundo es que la dosis de exposición sea suficientemente alta. Y en este sentido para observar una intoxicación aguda por arsénico, las dosis de exposición deben ser particularmente altas, tanto que éstas no se ven en ambientes comunitarios sino en exposiciones ocupacionales, con la única excepción de la ingesta directa de preparados concentrados de

arsénico con propósitos suicidas y en ingestas accidentales de este tipo de preparados, pero en ningún caso ocurrirá por exposición a través del aire ambiental.

Los compuestos de arsénico se absorben principalmente a través del tracto gastrointestinal,

**Toxicológicos:** La arsina se absorbe bien por inhalación y se distribuye por todo el cuerpo. Las exposiciones grandes resultan en hemólisis. El mecanismo informado es la fijación de arsina por grupos sulfhidrilo en la hemoglobina y otras proteínas esenciales. La interacción forma un intermedio reactivo que altera el flujo de iones transmembrana y aumenta en gran medida el calcio intracelular (HazardText, 2021e) (Micromedex, 2021d).

**Toxicidad leve a moderada:** Puede causar dolores de cabeza, olor a ajo en el aliento, náuseas, vómitos y dolor abdominal o en flancos (HazardText, 2021e) (Micromedex, 2021d).

**Toxicidad severa:** La toxicidad grave es causada por la hemólisis y sus complicaciones. Hipotensión, dolor en flancos, coluria, hematuria, insuficiencia renal aguda, hiperpotasemia, debilidad y calambres musculares, alteración del estado mental y cambios en el ECG (Ej., Ondas T puntiagudas, ensanchamiento del QRS) secundarios a hiperpotasemia o isquemia secundaria a la reducción de la capacidad de transporte de oxígeno. La evidencia de hemólisis puede aparecer pocas horas después de una exposición severa o puede demorarse más de 6 horas después de una exposición menos severa. En los próximos días pueden aparecer ictericia, hepatomegalia y derrames pleurales. La neuropatía periférica puede ser un efecto retardado y puede no ser completamente reversible (HazardText, 2021e) (Micromedex, 2021d)

#### 4.2.5.3 Efectos clínicos crónicos

Si bien la ruta de exposición ocupacional más común al arsénico en personas es la inhalatoria, la probabilidad de exponerse a niveles ocupacionales en un escenario comunitario es extremadamente baja.

La exposición crónica puede resultar en la excreción de arsénico en la orina; pequeñas cantidades pueden excretarse como trimetilarsina y la arsina se excreta en las heces, el cabello y las uñas en pequeñas cantidades durante largos períodos de tiempo. No provoca manifestaciones clínicas de toxicidad por arsénico. Es posible que los límites de exposición actuales no eviten el desarrollo de toxicidad crónica por la arsina (Hathaway et al, 1996). Se sabe muy poco sobre los efectos potenciales de la exposición crónica a la arsina (OIT, 1983). En casos de intoxicación ocupacional crónica se han desarrollado anemia grave, hemólisis, punteado basófilo de los glóbulos rojos y daño renal (ACGIH, 1991; HSDB, 2002). En la intoxicación crónica, además de anemia puede haber cefalea o dolor de cabeza, náuseas, vómitos, disnea o dificultad para respirar, parestesia de las extremidades e ictericia (Klimecki y Carter, 1995). Después de algunas semanas de exposición (3 horas/día), los animales de experimentación han desarrollado hemólisis y anemia (ACGIH, 1991). Varias dosis han provocado cambios en el peso del bazo y del hígado (RTECS, 2002). Estudios subcrónicos de catorce, 18 y 90 días en ratas, hámsteres y ratones revelaron cambios hematológicos, así como agrandamiento del hígado y el bazo, hiperplasia de la médula ósea y aumento de la actividad de la delta-amino-levulínico ácido deshidratasa, a niveles por

debajo de los límites de exposición actuales (Blair et al, 1990). La exposición repetida de 3 especies de roedores a la arsina entre 0,025 y 5 ppm durante 28 a 90 días produjo hematopoyesis extramedular y estasis biliar intracanalicular (Blair et al, 1990). Estos estudios son importantes porque sugieren efectos significativos de exposiciones repetidas a arsina en niveles por debajo del TLV actual (Klimecki & Carter, 1995) (HazardText, 2021e)(Micromedex, 2021d).

#### 4.2.5.4 Rangos de toxicidad:

##### hh)Exposición letal mínima

Los límites de exposición industrial en el aire indican que las exposiciones superiores a 0,05 partes por millón (ppm) en el aire son potencialmente tóxicas y NIOSH considera que las concentraciones de 3 ppm en el aire son inmediatamente peligrosas para la vida o la salud (US DHHS, 1994). La exposición a concentraciones en el aire de arsina de 250 ppm es rápidamente fatal, las concentraciones en el aire vde 25 a 50 ppm durante 30 minutos pueden ser fatales y las concentraciones de 10 ppm pueden ser fatales en tiempos de exposición más largos (NIOSH, 1997) (HazardText, 2021e).

##### ii) Exposición máxima tolerada

Una concentración de mas de 0,05 partes por millón (ppm) en el aire es potencialmente tóxico. Los síntomas de intoxicación aparecen después de la exposición por inhalación a concentraciones de 0,5 ppm (Budavari y Blumetti, 1983). El umbral de olor de 0,5 ppm no se considera adecuado para proteger a los trabajadores en un entorno industrial, ya que las exposiciones en exceso de 0,05 ppm pueden considerarse tóxicas (OSHA, 1989).

## jj) Clasificación cancerígena

**Tabla 4-20 Clasificación carcinogénica - Arsina**

Agencia	ID	Clasificación carcinogénica	referencia
ACGIH	Arsina	A4	American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2010; PubChem, 2021
USEPA	Arsina	No evaluada bajo el programa de IRIS	U.S. Environmental Protection Agency, 2011
IARC	Arsina	1	International Agency for Research on Cancer (IARC), 2016; International Agency for Research on Cancer, 2015; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010a; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2008; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2007; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2006; IARC, 2004)
MAK	No listada	No listada	DFG: List of MAK and BAT Values 2002, Report No. 38, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area, Wiley-VCH, Weinheim, Federal Republic of Germany, 2002.
NIOSH	Arsina	Ca	National Institute for Occupational Safety and Health, 2007
NTP	No listada	No listada	U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, National Toxicology Project
Comunidad Europea	No listada	-	(European Commission, 2000)

Fuente: Extraído de Arsina. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values:(HazardText, 2021e)

## Definiciones:

**ACGIH: (A4)** No clasificable como carcinógeno humano: Agentes que causan preocupación de que podrían ser carcinógenos para los humanos pero que no pueden evaluarse de manera concluyente debido a la falta de datos. Los estudios in vitro o en animales no proporcionan indicaciones de carcinogenicidad que sean suficientes para clasificar al agente en una de las otras categorías.

**EPA: (A)** No listado

**IARC: (1)** El agente (o mezcla) es cancerígeno para los seres humanos. La circunstancia de exposición implica exposiciones que son cancerígenas para los seres humanos. Esta categoría se utiliza cuando existe suficiente evidencia de carcinogenicidad en humanos. Excepcionalmente, un agente (o mezcla) puede incluirse en esta categoría cuando la evidencia de carcinogenicidad en humanos es menos que suficiente, pero hay evidencia suficiente de carcinogenicidad en animales de experimentación y evidencia sólida en humanos expuestos de que el agente (o mezcla) actúa a través de un mecanismo relevante de carcinogenicidad.

**NIOSH: (Ca)** NIOSH considera que esta sustancia es un potencial carcinógeno ocupacional.

kk) Valores de referencia exposición aguda

**Tabla 4-21 Valores de referencia exposición aguda inhalatoria - arsina**

Criterio de toxicidad	Concentración (ng/m <sup>3</sup> )	Efecto crítico	Referencia
Acute Reference Exposure Level (REL)	200	Disminución del peso fetal en ratones	(OEHHA, 2014)
Short-Term Air Permitting Effects Screening Levels (ESLs)	3000	La toxicidad materna en ratas se documentó como estertores durante la exposición antes del apareamiento y la gestación en un estudio de varios días.	(TCEQ, 2011)

Fuente: Elaboración propia

II) Valores de referencia exposición crónica

### Cancerígenos

No se encuentra información específica para efectos cancerígenos

### No cancerígenos

**Tabla 4-22 Valores de referencia exposición crónica inhalatoria: no cancerígenos - arsina**

Criterio de toxicidad	Concentración asociada con riesgo (ng/m <sup>3</sup> )	Efecto crítico	Referencia
inhalation Reference Concentration (RfC) i	50	Aumento de la hemólisis, morfología anormal de los eritrocitos y aumento del peso del bazo	(US-EPA, 1994)

 Fuente: Elaboración propia en base a EPA Risk Assessment Values for CAS7784-42-1.  
 U.S. Environmental Protection Agency, 2011.

mm) Valores de toxicidad

**Tabla 4-23 Valores de toxicidad arsina**

Identificación	Animal - vía	Valor informado
Concentración Letal 50 (LC50)	Perro - inhalación	350 mg/m <sup>3</sup> para 30 m
Concentración Letal 50 (LC50)	Cabra -inhalación	1 mg/m <sup>3</sup> para 10 m
Concentración Letal 50 (LC50)	Ratón -inhalación	250 mg/m <sup>3</sup> para 10 m
Concentración Letal 50 (LC50)	Conejo -inhalación	650 mg/m <sup>3</sup> para 10 m
Concentración Letal 50 (LC50)	Rata -inhalación	390 mg/m <sup>3</sup> para 10 m
Concentración Letal 50 (LC50)	Obeja -inhalación	1 mg/m <sup>3</sup> para 10 m
Concentración letal mínima publicada (LCLo)	Gato -inhalación	150 mg/m <sup>3</sup> para 20 m
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Humano -inhalación	25 ppm para 30 m
		300 ppm para 5 m
Dosis letal mínima publicada (LDLo)	Primate -inhalación	600 mg/m <sup>3</sup> por 1 hora
Dosis letal 50 (LD50))	Gato - intraperitoneal	2 mg/kg
Dosis letal 50 (LD50))	Cabra - intraperitoneal	3 mg/kg
Dosis letal 50 (LD50))	Ratón - intraperitoneal	3 mg/kg
Dosis letal 50 (LD50))	Conejo - intraperitoneal	2500 mcg/kg
Concentración tóxica mínima publicada (TCLo)	Humano - inhalación	3 ppm
		325 mcg/m <sup>3</sup>

Fuente: Extraído de Arsina. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values (HazardText, 2021e)

#### 4.2.5.5 Estándares Normativos internacionales ocupacionales

**Tabla 4-24: Límites ocupacionales de exposición inhalatoria- arsina**

Entidad	Descripción	Valor	Categoría carcinogénica
ACGIH	TLV-TWA	0,005 ppm 20.000 ng/m <sup>3</sup>	A4 No clasificable como carcinógeno humano: Agentes que causan preocupación de que podrían ser carcinógenos para los humanos pero que no pueden evaluarse de manera concluyente debido a la falta de datos. Los estudios in vitro o en animales no proporcionan indicaciones de carcinogenicidad que sean suficientes para clasificar al agente en una de las otras categorías.
	TLV-STEL	No listado	
	TLV-Ceiling	No listado	
OSHA	8 hrs. TWA	0,05 ppm 200.000ng/m <sup>3</sup>	-
	Concentración máxima aceptable	No listado	
NIOSH	TWA	No listado	Ca: NIOSH considera que esta sustancia es un potencial carcinógeno ocupacional
	STEL	No listado	
	Ceiling	2.000 ng/m <sup>3</sup> 15-minutos	
	IDLH	3.000.000 ng/m <sup>3</sup>	
DS 594	LPP	180.000 ng/m <sup>3</sup>	

Fuente: Workplace Standards extraído de Arsina. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Value (HazardText, 2021e)ars y Arsenic. Toxicology details (Micromedex, 2021b)

#### Nota:

- TLV-TWA: Umbral Límite-Media Ponderada en el Tiempo, es el valor límite ambiental publicado por la ACGIH; se definen como la "concentración media ponderada en el tiempo, para una jornada laboral normal de trabajo de 8 horas y una semana laboral de 40 horas, a la que pueden estar expuestos casi todos los trabajadores repetidamente día tras día, sin efectos adversos".
- STEL: Límite de exposición a corto plazo. Concentración promedio ponderada en un tiempo de 15 minutos a la que trabajadores pueden estar expuestos hasta 4 veces al día con al menos 1 hora entre exposiciones sucesivas sin efectos adversos si no se supera el TLV-TWA.
- TLV-Ceiling: Nivel de concentración que no deben ser superados en ningún momento de la jornada de trabajo. Éstos pueden ser determinados como valores promediados para períodos de 15 minutos en los casos en que no sea factible una medida instantánea.
- IDLH: Concentración inmediatamente peligrosa para la vida o la salud. Según el NIOSH de EE. UU. Corresponde a la concentración máxima de exposición de la cual se puede escapar en treinta minutos sin ningún síntoma que impida el escape o efectos irreversibles para la salud.

#### 4.2.5.6 Toxicocinética

##### nn) Absorción

La arsina es absorbida por inhalación (Stokinger, 1981)(Micromedex, 2021d). Los vapores, particularmente arsina y etil arsina, se difunden a través del saco pulmonar. Aproximadamente el 60% del gas arsina es absorbido por ratones expuestos a 0.025-2.5 mg / L por inhalación. En conejos, las concentraciones más altas se encontraron en hígado, pulmón y riñones. (PubChem, 2021).

##### oo) Distribución:

El arsénico se distribuye bien por todo el cuerpo, incluidos los glóbulos rojos, el hígado, los huesos, la piel, las vísceras, el cabello y las uñas (Stokinger, 1981) (Micromedex, 2021d).

##### pp) Metabolismo

La exposición crónica a la arsina puede resultar en excreción de arsénico en la orina con el tiempo. Una pequeña cantidad puede excretarse como trimetilarsina (Stokinger, 1981) (Micromedex, 2021d). Después de la inhalación de arsina y la conversión a As (III), el metabolismo del arsénico incluye metilación y la excreción urinaria siguió un modelo trifásico con períodos de 28 horas, 59 horas y 9 días(PubChem, 2021).

##### qq) Excreción

**RIÑÓN:** El arsénico se excreta en la orina en pequeñas cantidades durante un período prolongado y en las heces en pequeñas cantidades durante un largo período de tiempo. También una pequeña cantidad de arsina puede excretarse en el pulmón como trimetilarsina, en el cabello y las uñas durante un período prolongado (Stokinger, 1981) (Micromedex, 2021d).

#### 4.2.5.7 Mecanismo de acción

**HEMÓLISIS** - Basado en estudios en ratones, Blair et al, 1990a, propusieron que el mecanismo de hemólisis de glóbulos rojos inducida por gas arsina se debe a la depleción de glutatión intracelular dentro del eritrocito. Este estudio también demostró que la hemoglobina se oxida a metahemoglobina con la formación de cuerpos de Heinz. El resultado final es la oxidación de los grupos sulfhidrilo en la hemoglobina y posiblemente en las membranas de los glóbulos rojos, lo que conduce a la inestabilidad de la membrana y a una rápida hemólisis intravascular masiva. Winski, et al, 1997 No se observó una reducción de glutatión y disulfuro de glutatión en los glóbulos rojos humanos in vitro. Se postuló un mecanismo alternativo que involucra una interacción directa arsina-hemoglobina formando metabolitos de arsénico que causan alteración directa de la membrana celular de los eritrocitos.

Los mecanismos de toxicidad de la arsina (AsH<sub>3</sub>) no se comprenden completamente. Se realizaron estudios para determinar la toxicidad de AsH<sub>3</sub> y arsenito (As (III)) en una línea celular epitelial tubular renal para modelar la disfunción renal causada por la exposición a AsH<sub>3</sub>. La hipótesis fue que el As (III) es el metabolito tóxico responsable de la toxicidad renal del AsH<sub>3</sub>. Hubo una respuesta tóxica dependiente de la concentración y el tiempo después de la incubación con As (III). El As (III) produjo una fuga significativa de LDH tan pronto como 1 hora y una pérdida de potasio intracelular a las 5 horas. AsH<sub>3</sub> no produjo cambios en estos parámetros. El AsH<sub>3</sub> no afectó ni a los niveles de potasio ni a los de LDH durante 24 horas y hasta una concentración de AsH<sub>3</sub> de 1 mM. En este sistema, el As (III) indujo una fuga de LDH antes de la pérdida de K<sup>+</sup>. También se estudiaron los efectos de toxicidad similar al estrés oxidativo determinando los niveles de glutatión (GSH), glutatión disulfuro (GSSG) y proteína de choque térmico 32 (Hsp32). Los niveles de GSH no se vieron afectados notablemente por ningún arsénico durante un período de 6 horas o hasta una concentración de 100 microM del arsénico. Sin embargo, 100 microM de AsH<sub>3</sub> aumentaron significativamente los niveles de GSSG a los 30 minutos y alcanzaron un máximo a las 2,5 horas. La incubación con 10 microM de AsH<sub>3</sub> fue suficiente para aumentar significativamente los niveles de GSSG. Como (III) no tuvo un efecto marcado sobre GSSG. Ambos compuestos arsenicales (50 microM) produjeron un ligero aumento (aproximadamente tres veces) en los niveles de Hsp32 después de 4 horas de incubación. Estos resultados mostraron que el AsH<sub>3</sub> inalterado producía efectos tóxicos similares al estrés oxidativo sin producir muerte celular. Sin embargo, concentraciones similares de As (III) indujeron la respuesta al estrés y fueron tóxicas para las células. Estos datos indicaron que AsH<sub>3</sub> no es directamente tóxico para las células LLC-PK1 (PubChem, 2021).

La hemoglobina (Hb) se ha reconocido desde hace mucho tiempo como un componente necesario del mecanismo general de la hemólisis inducida por AsH<sub>3</sub>. Un estudio investigó el papel de la Hb en la hemólisis inducida por AsH<sub>3</sub>. El propósito era determinar si la exposición a AsH<sub>3</sub> alteraba la estructura de los componentes hemo o globina de la Hb. Se incubó arsina con oxihemoglobina (oxyHb) y carboxihemoglobina (carboxiHb) humanas aisladas, y se examinaron la liberación de hemo y la formación de modificaciones de hemoglobina inducidas por AsH<sub>3</sub>. La arsina aumentó la cantidad de hemo liberado por oxyHb en un 18%. Cuando se incubó carboxiHb con AsH<sub>3</sub>, no hubo cambios en la liberación de hemo, lo que sugiere que la sexta posición del ligando en el hierro hemo puede ser crítica en la interacción con AsH<sub>3</sub>. Las interacciones arsina-Hb se estudiaron mediante análisis espectral de masas de hemo, globina de cadena alfa y globina de cadena beta. La arsina no tuvo un efecto significativo en los espectros LCMS de cadena alfa o beta en oxyHb y carboxiHb, pero en oxyHb, la arsina aumentó constantemente la frecuencia de pérdida de fragmentos de iones acetato de metilo desde la hemo (.CH<sub>2</sub>OOH, m/z = 59) en la matriz de espectrometría asistida laser de desorción/ionización masa (MALDI-MS). La formación de enlaces cruzados de proteína Hb se investigó mediante transferencia Western usando un anticuerpo anti-Hb en membranas aisladas de eritrocitos tratados con AsH<sub>3</sub>, pero no se encontraron aductos de membrana Hb. Estos resultados sugieren que la interacción entre AsH<sub>3</sub> y hemoglobina da como resultado un aumento en la liberación de hemo que puede contribuir al mecanismo hemolítico de AsH<sub>3</sub> (PubChem, 2021).

El gas arsina es un agente hemolítico indirecto debido a su inhibición de la catalasa de los eritrocitos, lo que conduce a la acumulación de peróxido de hidrógeno que a su vez destruye la membrana de los eritrocitos. La actividad hemolítica de la arsina se debe a su capacidad para disminuir/reducir el contenido de glutatión (PubChem, 2021).

El mecanismo de la intoxicación por arsina es la hemólisis intravascular rápida. Esto puede deberse a la unión de la arsina a la hemoglobina, con la posterior liberación intraeritrocítica de arsénico elemental, o la reacción de la arsina con grupos sulfhidrilo en las enzimas respiratorias de los eritrocitos. La hemólisis intravascular conduce a la reducción observada de la hemoglobina y del hematocrito, al aumento de la hemoglobina sérica y de la bilirrubina de reacción directa y a la hemoglobinuria. Al parecer, la insuficiencia renal se debe a la precipitación de hemoglobina en los túbulos renales. Los túbulos necróticos con cilindros de hemoglobina se observan de manera característica en la autopsia en casos fatales de intoxicación por arsina. La arsina puede tener un efecto tóxico directo sobre los riñones (PubChem, 2021).

Los mecanismos de la hemólisis de la arsina parecen implicar la oxidación de la arsina a arsenito in vivo con la posterior inhibición de las enzimas que contienen sulfhidrilo. Los estudios sobre los efectos directos de la arsina en cortes de hígado y riñón han demostrado que la respiración del tejido (PubChem, 2021).

### 4.3 Coeficientes de riesgo identificados

El Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV) es el límite superior de la probabilidad de que una persona va a contraer cáncer (ya sea tratable o letal) durante su vida entera, entre todas las personas expuestas de por vida (70 años) a una concentración promedio de un contaminante, y por encima de la probabilidad basal normal de contraer cáncer. El riesgo extra se atribuye a una causa específica. Se denomina riesgo “extra” de cáncer porque es un riesgo asociado al problema de contaminación, y por lo tanto es “extra” o “adicional” al riesgo normal basal de cáncer que tiene cada persona determinada o específica (US-EPA, n.d.).

La estimación del RECV para sustancias cancerígenas por la vía de inhalación, se lleva a cabo usando las concentraciones en el aire de la sustancia cancerígena y el criterio de toxicidad que en este caso corresponde el Riesgo Unitario Inhalatorio (IUR<sup>53</sup> por su sigla en inglés)

A continuación, se presentan los niveles encontrados de riesgo unitario inhalatorio, con las concentraciones asociadas a 3 distintos niveles de riesgo: a 1 persona en 1 millón, 1 persona en 100.000 y 1 persona en 10,000, respectivamente.

---

<sup>53</sup> El riesgo unitario inhalatorio (IUR) es la estimación cuantitativa en términos de riesgo por volumen de aire respirado expresado generalmente en unidades de ug/m<sup>3</sup> de la sustancia cancerígena. (US-EPA, 1994)

**Tabla 4-25 Coeficientes de riesgo asociados a efectos cancerígenos**

<b>Criterio de toxicidad Inhalation Unit Risk (IUR) (por ng/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Concentración asociada con riesgo de 1 en 1.000.000 (ng/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Concentración asociada con riesgo de 1 en 100.000 (ng/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Concentración asociada con riesgo de 1 en 10.000 (ng/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Efecto crítico</b>	<b>Fuente</b>
<b>4,3e-6</b>	0,2	2,3	23,3	Cáncer pulmonar	(US-EPA, 2011)
<b>3,3e-6</b>	0,3	3,0	30,3	Cáncer pulmonar	(CARB, 1990)
<b>0,2e-6</b>	6,7	66,7	666,7	Cáncer pulmonar	TCEQ (Erraguntla et al., 2012)
<b>0,7e-6</b>	1,4	14,3	142,9	Cáncer pulmonar	Netherlands (Dutch Expert Committee on Occupational Safety, DECOS) (Lewis et al., 2015)
<b>1,5e-6</b>	0,7	6,7	66,7	Cáncer pulmonar	WHO Air Quality Guidelines for Europe.

Fuente: Elaboración propia

## 5. Relación entre emisión y concentración de arsénico en el aire

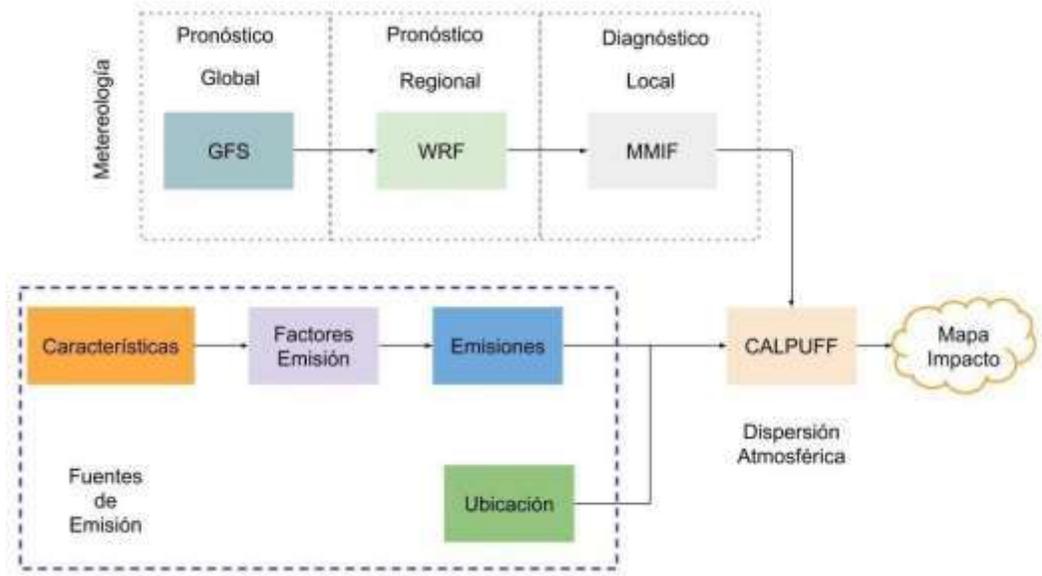
### 5.1 Metodología de estimación de relación entre emisión y concentración

La presente sección introduce la metodología para la estimación de la concentración de arsénico en ambiente a partir del inventario de emisiones procedentes de cada fuente de emisión reportada por cada planta en el presente estudio.

Respecto a la metodología para proyectar las emisiones de cada uno de los escenarios evaluados, se considera, según los resultados previos otorgados por los antecedentes técnicos, el siguiente protocolo:

- Escenario línea base de emisiones: Levantamiento de información respecto a las operaciones unitarias en cada planta y sus fuentes de emisión atmosféricas asociadas.
- Caracterización de las fuentes de emisión: geolocalización, dimensiones.
- Cálculo de las tasas de emisión por fuente.
- Evaluación de los niveles de concentración de arsénico mediante la aplicación del modelo de dispersión atmosférica Calpuff específico en los receptores discretos seleccionados con la contraparte técnica.

Para realizar el estudio de dispersión atmosférica de calidad del aire se sigue el procedimiento recomendado por el SEIA representado en la Figura 5-1.



**Figura 5-1 Diagrama de flujo de información meteorológica numérica y fuentes de emisión atmosféricas para la modelación de las emisiones atmosféricas según el SEIA.**

Fuente: Elaboración propia.

La elaboración del estudio de dispersión atmosférica de las emisiones procedentes de cada planta se compone de las siguientes etapas descritas a continuación:

- **Modelización meteorológica:** obtener los campos escalares y vectoriales que definen el estado atmosférico desde una escala global hasta local (*downscaling*).
- **Validación meteorológica:** analizar el grado de validez de los resultados numéricos obtenidos contrastándolos con la red de monitoreo superficial disponible del SINCA. Como producto, se analizarán los sesgos que pudiesen ocurrir dentro del dominio de simulación para posteriormente interpretar con mayor certeza los impactos obtenidos mediante Calpuff.
- **Caracterización de las plantas:** definir todas las fuentes de emisión atmosféricas, su ubicación, régimen de operación mensual y tasas de emisión como datos de entrada a Calpuff.
- **Proyección de emisiones y análisis de incertidumbre asociado a las emisiones de arsénico procedentes de cada planta:** evaluar los niveles de concentración en inmisión, contrastando con las mediciones informadas en cada estación de monitoreo disponible dentro del dominio de simulación.

Según los resultados indicados en la Sección 3.2, la mayor parte (sobre el 99%) de las emisiones son generadas por las fundiciones de cobre, por lo cual se desarrolló la metodología a partir de dichos datos. Sin embargo, se destaca que la metodología desarrollada puede ser aplicada a cualquier fuente de emisión atmosférica de arsénico.

### 5.1.1 Modelización meteorológica

En lo referente a los estudios realizados al amparo de esta licitación, se ejecutará la pasada de WRF para un año de datos inicializado a partir de los datos de reanálisis FNL *del National Centers for Environmental Prediction ds083.3* (NCEP<sup>54</sup>). El año base de datos meteorológico utilizado se corresponde con el más reciente terminado, es decir, el año 2020, el cual también corresponde al año en donde todas las fundiciones cuentan con avance suficiente en sus instalaciones para cumplir con el DS 28/2013. De este modo, y partiendo de condiciones a escala sinóptica del NCEP, se seguirá un patrón de cuatro dominios anidados hasta obtener 1 dominio de alta resolución (1 km<sup>2</sup>) sobre las zonas de estudio.

La configuración de los dominios de WRF se realizará conforme a las recomendaciones de la Guía para el uso de modelos de calidad del aire en el SEIA (2012)<sup>55</sup>, teniendo en cuenta los dominios espaciales de modelación y el siguiente conjunto de parametrizaciones físicas:

Dominio:

- Resolución horizontal: 27.000 m, 9.000 m, 3.000 m y 1.000 m.
- Niveles verticales: 44.
- Proyección del Mapa: Lambert Conformal Conic.

Física:

---

<sup>54</sup> <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.3/#!description>

<sup>55</sup> [https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration\\_files/guias/namelist.input](https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration_files/guias/namelist.input)

- Esquema de radiación: Goddard (onda corta) y RRTM (onda larga).
- Modelo del suelo: Difusion 5 layer scheme.
- Tratamiento de capa superficial: Monin-Obukhov Similaridad.
- Parametrización de la Capa Límite: QNSE
- Esquema de convección: Kain-Fritsch.
- Microfísica de nubes y precipitación: WSM (3 especies microfísicas).
- Parametrización de turbulencia: Smagorinsky (primer orden).

#### 5.1.1.1 Dominios de simulación WRF

La configuración de los dominios WRF se corresponde a un anidado de 4 dominios con las siguientes características:

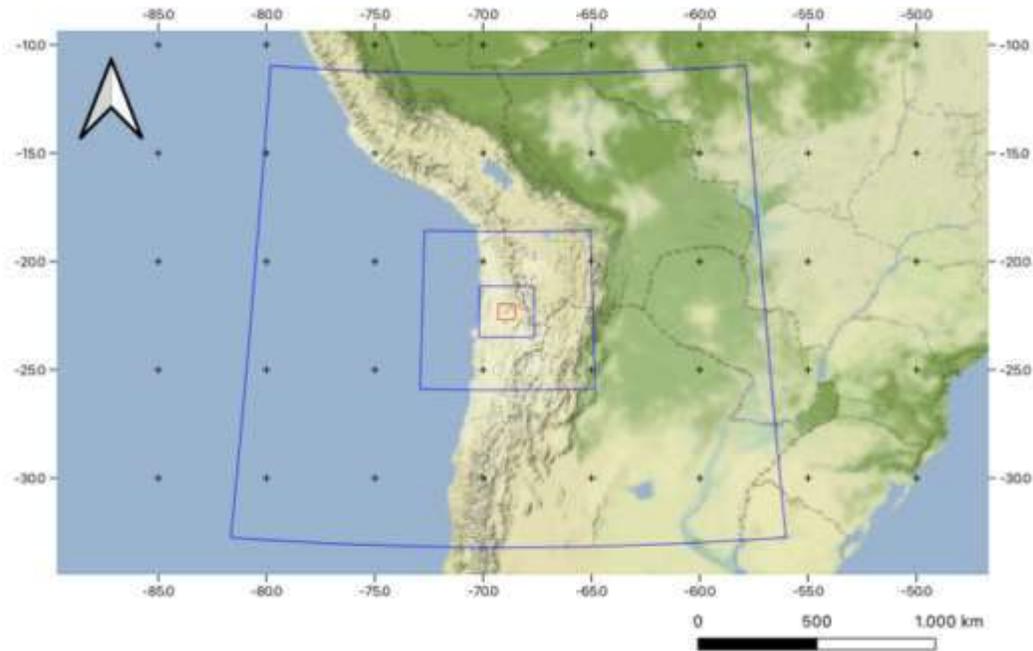
- dx, dy: resolución horizontal en km.
- nx, ny: número de nodos horizontales.
- Lx, Ly: extensión del dominio horizontal en km.

**Tabla 5-1 Características dominios WRF**

ID	dx (km)	dy (km)	nx	ny	Lx (km)	Ly (km)
<b>d01</b>	27	27	91	91	2.457	2.457
<b>d02</b>	9	9	91	91	819	819
<b>d03</b>	3	3	88	88	264	264
<b>d04</b>	1	1	82	82	82	82

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura se presenta el anidamiento utilizado de acuerdo con las características anteriores descritas en la Tabla 5-1:

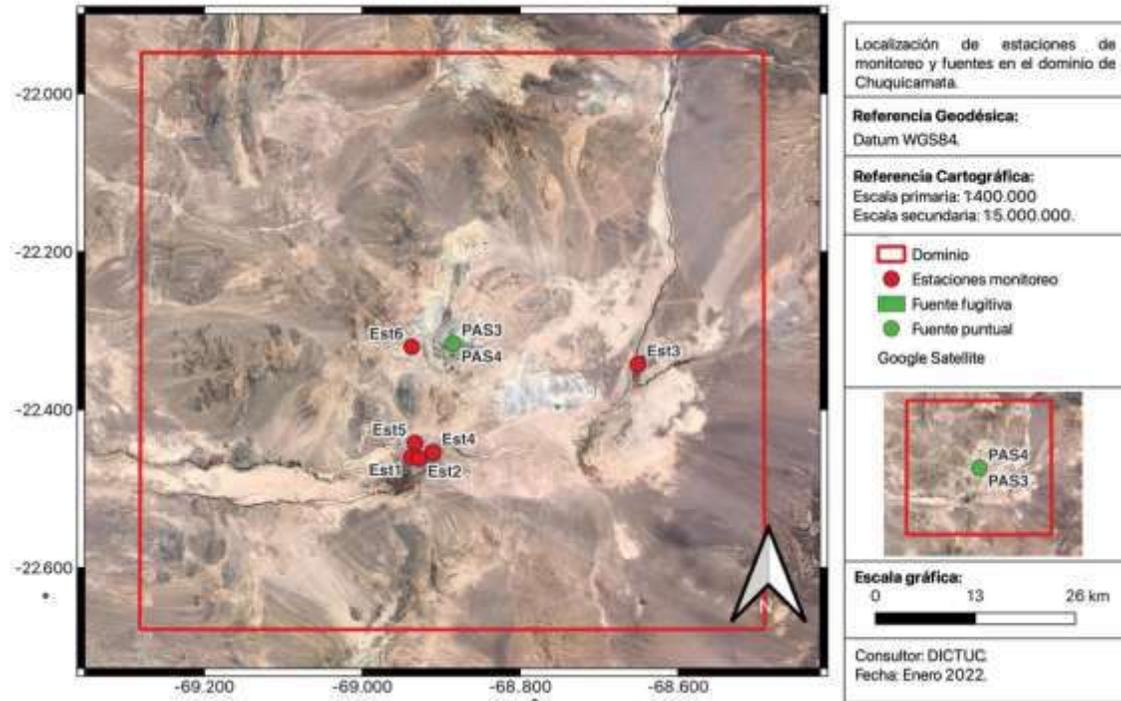


**Figura 5-2 Anidado de cuatro dominios WRF utilizado para cada una de las ubicaciones correspondientes a las 8 plantas**

Fuente: Elaboración propia

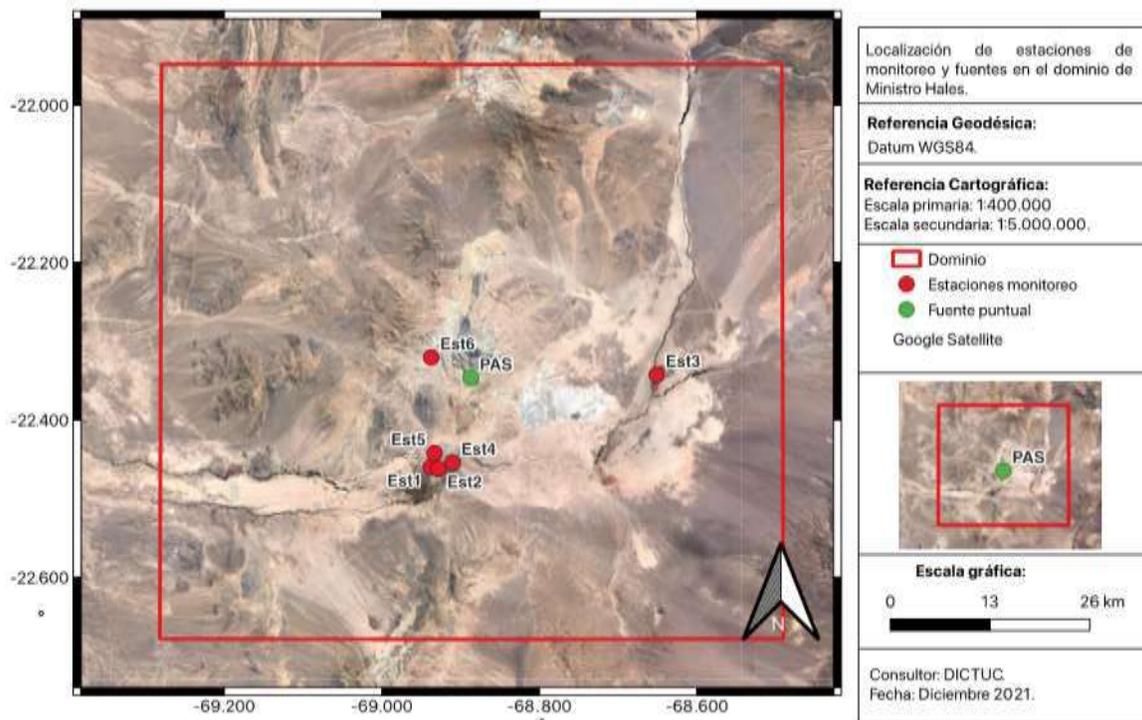
Finalmente, en las siguientes figuras se indican los dominios internos de 1 km de resolución, incluyendo las fuentes de emisión atmosféricas, estaciones de monitoreo de calidad del aire con datos de arsénico definidos para cada dominio de estudio de norte a sur, el detalle de estos se indica en la Sección 5.1.3.

La selección de los puntos de interés (receptores discretos) se desarrolló según la información disponible en la Biblioteca del Congreso Nacional, donde cada punto de interés corresponde a un centroide de las áreas urbanas según esta fuente de datos.



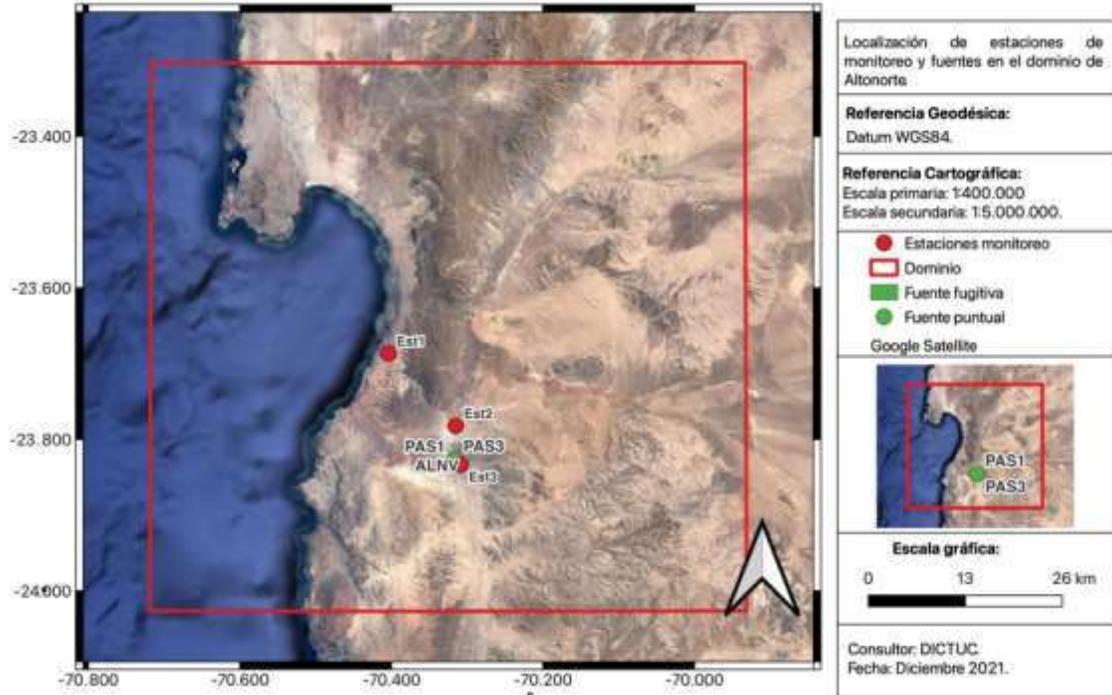
**Figura 5-3 Dominio – Fundición Chuquicamata**

Fuente: Elaboración propia



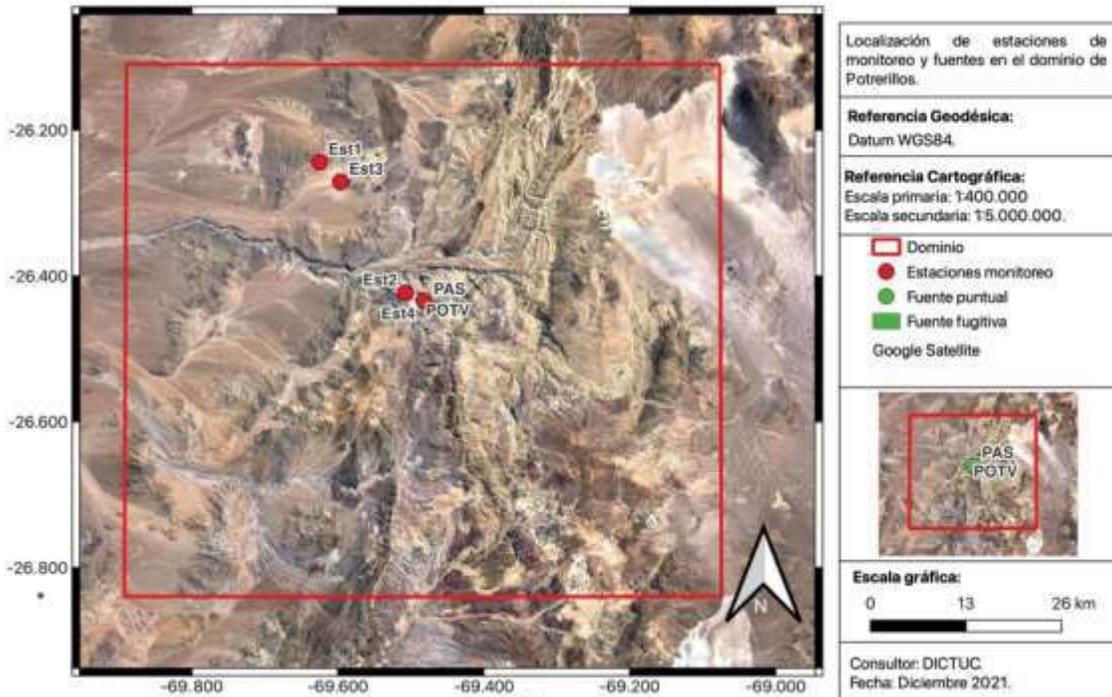
**Figura 5-4 Dominio – Planta Tostación Ministro Hales**

Fuente: Elaboración propia



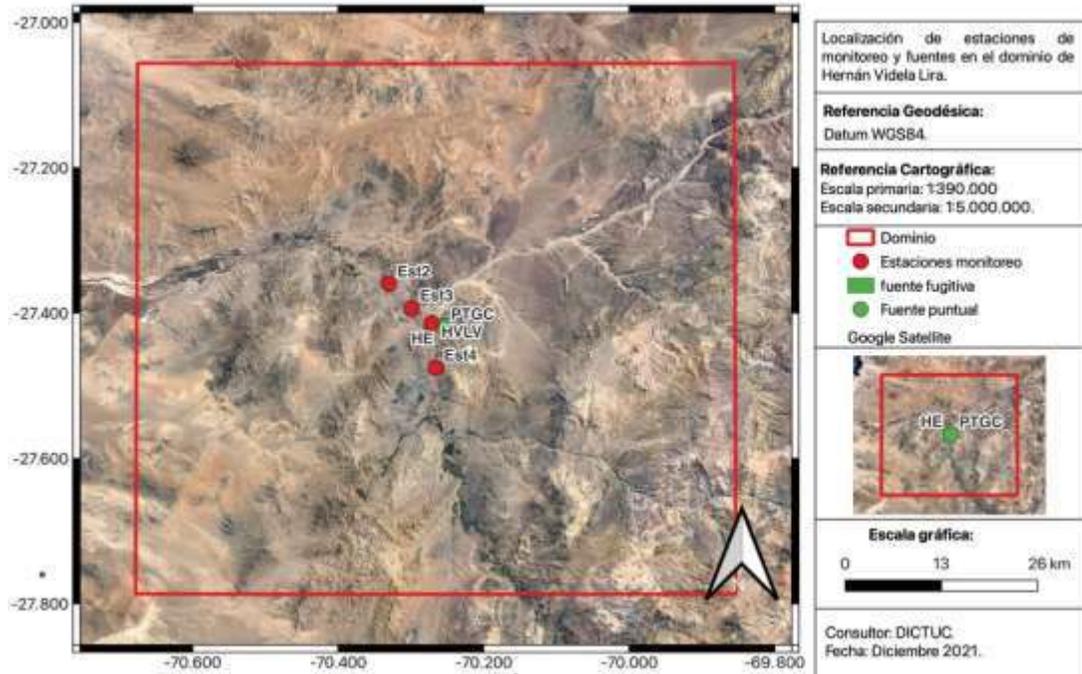
**Figura 5-5 Dominio – Fundición Altonorte**

Fuente: Elaboración propia



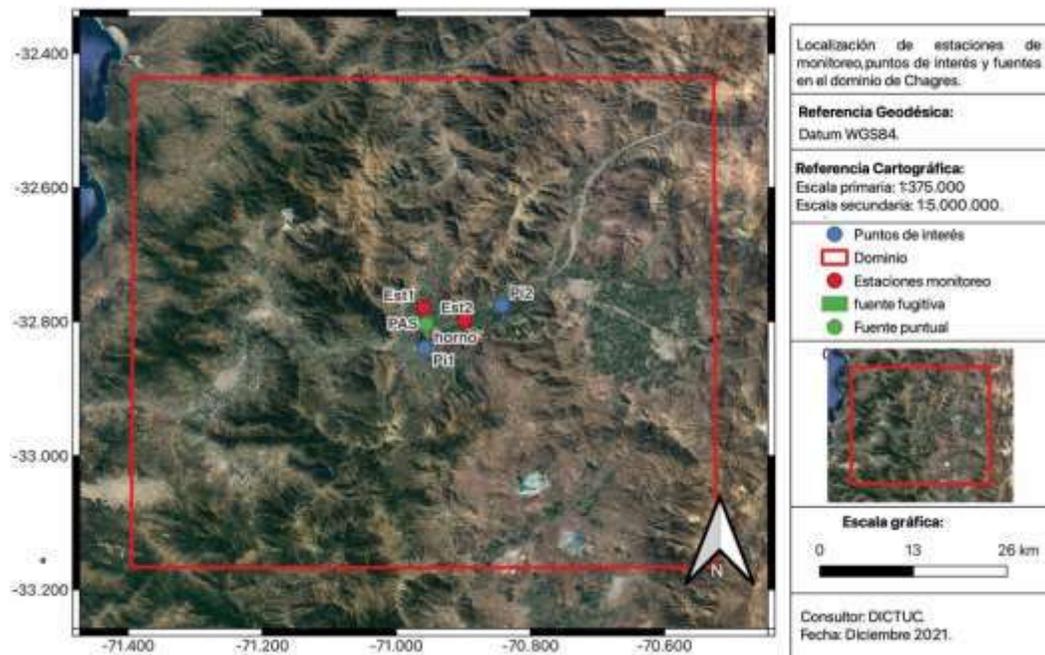
**Figura 5-6 Dominio – Fundición Potrerillos**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-7 Dominio – Fundación Hernán Videla Lira**

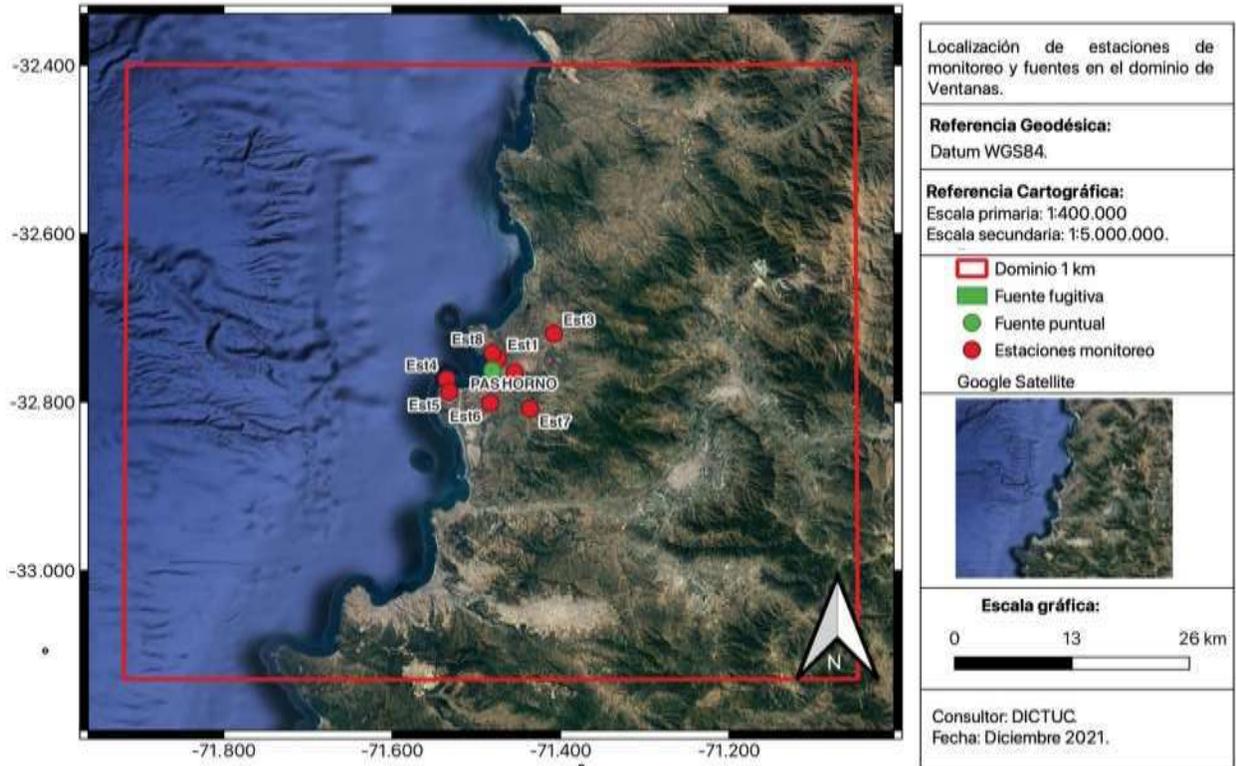
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-8 Dominio – Fundación Chagres**

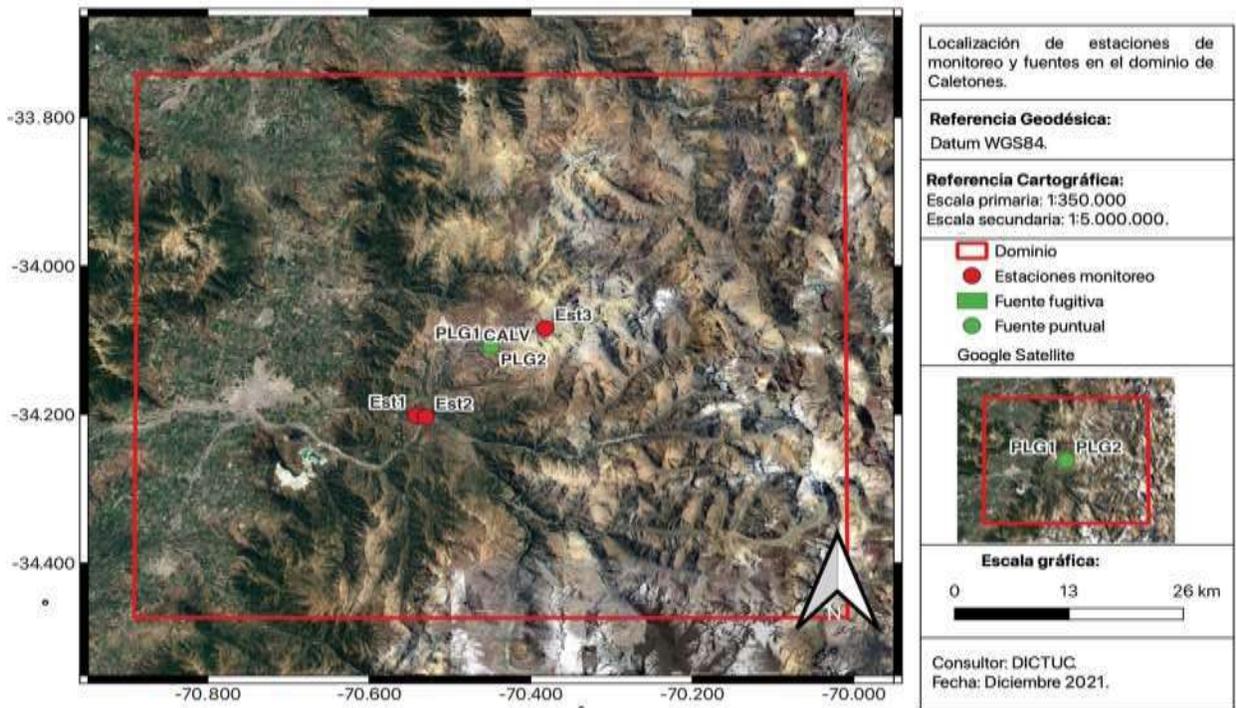
Nota: Los puntos de interés corresponden a los centroides de las áreas urbanas, Llaylay (Pi1) y Panquehue (Pi2), determinados según la información disponible en la Biblioteca del Congreso Nacional. Ver Sección 5.1.4.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-9 Dominio – Fundición Ventanas**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-10 Dominio – Fundición Caletones**

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.2 Validación de modelo meteorológico WRF con red de monitoreo nacional

La modelación de la dispersión atmosférica de arsénico se utilizará como una herramienta para establecer la relación entre la emisión procedente de las diferentes fuentes de emisión y el nivel de concentración en los receptores discretos en el entorno de las plantas.

Es por este motivo que el equipo consultor considera de alta relevancia la comprensión de las fuentes de incertidumbre, su efecto sobre los resultados y, donde sea posible, reducir dicha incertidumbre, minimizando así las posibles fuentes de error en el análisis posterior.

Para el presente estudio se considera para cada uno de los dominios de simulación donde se emplaza cada planta un año de datos meteorológicos, correspondientes al periodo de 01-01-2020 a 01-01-2021, obtenidos a partir de la aplicación del modelo de pronóstico WRF.

Con el objetivo de poder aplicar de manera fehaciente y evaluar el grado de incertidumbre asociado como únicos datos de entrada meteorológicos los proporcionados por la modelación numérica de WRF, se analizará el grado de validez de los resultados obtenidos por el modelo WRF contra las estaciones meteorológicas de observación de la red de monitoreo disponible en cada dominio. En las siguientes tablas se detallan los criterios estadísticos de bondad del comportamiento del modelo WRF, así como la descripción de cada una de las variables utilizadas.

**Tabla 5-2 Criterios estadísticos para evaluar el grado de validez de los resultados obtenidos por el modelo WRF**

Variable Meteorológica	Variable Estadística	Criterio de Validez
<b>Velocidad Viento (u10)</b>	RMSE	$\leq 2\text{m/s}$
	BIAS	$\leq \pm 0,5\text{ m/s}$
	IOA	$\geq 0,6$
<b>Dirección Viento (°)</b>	MAE	$\leq 30^\circ$
	BIAS	$\leq \pm 10^\circ$
<b>Temperatura Superficial (2 m)</b>	MAE	$\leq 2\text{K}$
	BIAS	$\leq \pm 0,5\text{K}$
	IOA	$\geq 0,8$
<b>Humedad</b>	BIAS	$\leq \pm 1\text{ g/kg}$
	MAE	$\leq 2\text{ g/kg}$
	IOA	$\geq 0,6$

Fuente: (Emery et al., 2017)

De la Tabla 5-2:

- RMSE es la raíz del error cuadrático medio (*root-mean-square deviation*), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.
- BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos. Proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable, cuantifica el error sistemático del modelo.
- IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

- MAE es el error absoluto medio. Las ecuaciones de cálculo de estos índices se presentan más adelante.

**Tabla 5-3 Criterios de tolerancia de diferencia absoluta de variables modeladas**

Variable Meteorológica	Criterio
Velocidad del viento	2,57 m/s
Dirección del viento	20°
Temperatura de rocío	1°C en superficie.
Temperatura	1°C en superficie.

Fuente: (Yáñez-Morroni, Gironás, Caneo, Delgado, & Garreaud, 2018)

Donde,

$$BIAS = \frac{1}{IJ} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (P_j^i - O_j^i)$$

$$MAE = \frac{1}{IJ} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I |P_j^i - O_j^i|$$

$$NMAE = \frac{1}{IJ} \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I |P_j^i - O_j^i|}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I |O_j^i|}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{IJ} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (P_j^i - O_j^i)^2}$$

$$NMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{IJ} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (P_j^i - O_j^i)^2}}{\frac{1}{IJ} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I O_j^i}$$

$$IOA = 1 - \frac{IJ \cdot RMSE^2}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I |P_j^i - M_o| + |O_j^i - M_o|}$$

### Ecuación 8

Siendo,

- j*: observación en un tiempo determinado.
- i*: lugar de observación.
- J*: número total de observaciones temporales.
- I*: número total de lugares de observación.
- O*: variable observada/medida.
- P*: variable predicha por el modelo WRF.
- M<sub>o</sub>*: valor promedio de las observaciones.

Por otro lado, se realizará un análisis de la variación de los parámetros estadísticos normalizados, de manera adicional, para los resultados obtenidos de la concentración de arsénico modeladas.

Este análisis permitirá evaluar el grado de bondad de la simulación de calidad del aire en función de la distancia referente a las fuentes de emisión de cada dominio. Esto se desarrolla en la sección 5.2.1.

### 5.1.3 Definición de las estaciones de monitoreo de calidad del aire

Para cada dominio se seleccionaron las estaciones de monitoreo del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) indicadas en la Tabla 5-4. Los criterios utilizados para esta selección fueron:

- Estaciones de monitoreo SINCA dentro del dominio de estudio, definido para cada fundición y planta descrito en la Sección 5.1.1.1
- Con datos disponibles de medición de arsénico para el año 2020.

**Tabla 5-4 Estaciones de monitoreo por dominio de estudio**

Dominio	ID	Nombre	Coordenadas UTM		Distancia a la fuente (m)	Altura (m.s.n.m)
			Este (m)	Norte (m)		
Chuquicamata y Ministro Hales	Est1	Estación CD 23 marzo	506.399	7.516.241	16.826	2.255
	Est2	Estación Centro Calama	507.389	7.516.053	16.710	2.267
	Est3	Estación Nueva ChiuChiu	535.952	7.529.229	24.298	2.529
	Est4	Estación Hospital El cobre	509.239	7.516.917	15.476	2.301
	Est5	Estación CPVK	506.893	7.518.227	14.739	2.266
	Est6	Estación Aukahuasi	506.480	7.531.697	5.378	2.717
Altonorte	Est1	Estación Coviefi	356.847	7.379.757	17.845	182
	Est2	Estación Inacal	366.001	7.369.267	3.680	427
	Est3	Estación Sur	366.690	7.363.604	1.106	502
Potrerillos	Est1	Estación Cine Inca	437.589	7.097.133	25.686	2.257
	Est2	Estación CAP	449.439	7.077.320	2.995	2.657
	Est3	Estación Intelec	440.479	7.094.145	21.585	2.390
	Est4	Estación Doña Inés	451.936	7.076.158	260	2.860
Hernán Videla Lira	Est1	Estación Paipote	374.322	6.967.116	1.510	448
	Est2	Estación Copiapó	368.470	6.972.981	9.673	387
	Est3	Estación San Fernando	371.592	6.969.334	4.961	421
	Est4	Estación Tierra Amarilla	374.935	6.960.255	6.395	462
Chagres	Est1	Estación Catemu	316.512	6.371.481	2.738	451
	Est2	Estación Lo Campo	322.275	6.369.529	5.440	464
Ventanas	Est1	Estación La Greda	268.185	6.373.910	1.694	16
	Est2	Estación Los Maitenes	270.073	6.372.171	2.483	41
	Est3	Estación Puchuncaví	274.317	6.377.316	8.368	45
	Est4	Estación Quintero	262.526	6.371.081	5.224	71
	Est5	Estación Quintero Centro	262.853	6.369.407	5.575	38
	Est6	Estación Sur	267.461	6.368.037	4.289	71

Dominio	ID	Nombre	Coordenadas UTM		Distancia a la fuente (m)	Altura (m.s.n.m)
			Este (m)	Norte (m)		
Caletones	Est7	Estación Valle Alegre	271.889	6.367.413	6.518	28
	Est8	Estación Ventanas	267.539	6.374.613	2.283	56
	Est1	Estación Coya Club	357.944	6.214.431	13.368	965
Caletones	Est2	Estación Coya Población	359.047	6.214.212	12.775	809
	Est3	Estación Sewell	372.504	6.227,642	6.818	2.184

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.4 Determinación de puntos de interés de estudio

En paralelo, se determinaron 2 puntos de interés para el dominio Chagres, correspondientes a las comunas de Llayllay y Panquehue, dado que ambas localidades a pesar de ser representativas no contaban con estaciones de monitoreo de calidad del aire.

**Tabla 5-5 Puntos de interés por dominio de estudio**

Dominio	ID	Nombre	Coordenadas UTM		Distancia a la fuente (m)	Altura (m.s.n.m)
			Datum WGS 84 Huso 19			
			Este (m)	Norte (m)		
Chagres	Pi1	Llayllay	316.785	6.364.770	4.015	387
	Pi2	Panquehue	327.433	6.372.066	11.101	508

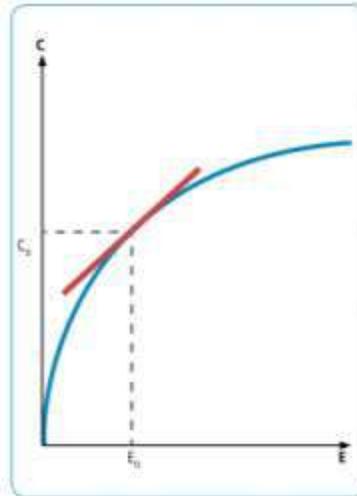
Fuente: Elaboración propia

En los anexos del estudio (Sección 10.6) se presentan las Figuras con los puntos de interés y estaciones para cada uno de los dominios.

### 5.1.5 Determinación de la relación emisión-concentración

Según la Guía Metodológica para Para la Elaboración de un Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) para Instrumentos de Gestión de Calidad del Aire, existen diferentes modelos disponibles para estimar los cambios en concentración de contaminantes como consecuencia de un cambio en las emisiones. Entre estos se encuentran los modelos de aproximación que permiten determinar la relación entre emisiones de contaminantes primarios y concentraciones resultantes de contaminantes primarios, como en este caso el arsénico.

En estos modelos se puede suponer una relación lineal entre las emisiones de un contaminante y la concentración resultante ambiental que genera, lo que permite definir los factores emisión-concentración (FEC). Este se basa en la existencia de una relación lineal en emisión-concentración, como se muestra en la siguiente figura, donde la línea azul muestra la relación teórica entre emisión y concentración. Si se asume que la variación en la concentración es pequeña en comparación con la situación base, el error que se comete asumiendo la relación lineal (línea roja) es aceptable para casos en que no exista mayor información.



**Figura 5-11 Supuesto de la relación lineal entre emisiones y concentraciones**

Fuente: Guía Metodológica para Para la Elaboración de un Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) para Instrumentos de Gestión de Calidad del Aire (MMA, 2013b)

Considerando este tipo de modelos, para obtener la relación entre los niveles de emisión procedentes de una fuente de emisión atmosférica y la concentración obtenida en un punto del espacio concreto se puede recurrir a la ecuación de advección-difusión-reacción:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \vec{u} C = \nabla \vec{K} \nabla C + \vec{S}_c$$

### Ecuación 9

En la ecuación anterior se formulan los diferentes fenómenos que afectan a la cantidad de materia del compuesto en un volumen de control, o concentración C:  $\nabla \vec{u} C$  advección,  $\nabla \vec{K} \nabla C$  difusión,  $\vec{S}_c$  emisión y/o sumidero-reacción.

La ecuación del balance de materia anterior no cuenta con una solución general, pero si se aplican algunas simplificaciones e hipótesis se puede encontrar una solución analítica particular como en el caso del modelo Calpuff<sup>56</sup>:

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \cdot g \cdot \exp\left[\frac{-d_a^2}{2\sigma_x^2}\right] \cdot \exp\left[\frac{-d_c^2}{2\sigma_y^2}\right]$$

$$g = \frac{2}{(2\pi)^{1/2}\sigma_z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left[\frac{-(H_e + 2nh)^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

<sup>56</sup> [http://www.src.com/CALPUFF/download/CALPUFF\\_UsersGuide.pdf](http://www.src.com/CALPUFF/download/CALPUFF_UsersGuide.pdf)

### Ecuación 10

Donde,

$C$ : Nivel de concentración ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$Q$ : Masa de contaminante (g) en el puff

$\sigma_x$ : Desviación estándar (m) de la distribución gaussiana en el eje x.

$\sigma_y$ : Desviación estándar (m) de la distribución gaussiana en el eje y.

$\sigma_z$ : Desviación estándar (m) de la distribución gaussiana en el eje z.

$d_a$ : Distancia del centro del puff al receptor en la dirección del viento dominante.

$d_c$ : Distancia del centro del puff al receptor en la dirección axial.

$g$ : Término vertical de la ecuación gaussiana.

$H$ : Altura efectiva del centro del puff sobre el suelo.

$h$ : Altura de la capa de mezcla.

En la expresión anterior se puede observar que el caudal másico de emisión del contaminante ( $Q$ ) presenta una relación lineal sobre la concentración en cualquier lugar del espacio ( $C$ ). Dado lo anterior, se puede establecer una función lineal que permita definir el nivel de concentración en un receptor particular de acuerdo con la contribución de las emisiones procedentes de cada fuente de emisión del siguiente modo:

$$FEC_{ij} = \left( \frac{\partial C_{ij}}{\partial E_j} \right)^{-1}$$

$$C_{ij} = \frac{E_j}{FEC_{ij}}$$

### Ecuación 11

El factor de concentración indicado en la Ecuación 11 corresponde a concentración modelada ( $Cm_{ij}$ ), por lo tanto, para análisis posteriores, se definirá como:

$$Cm_{ij} = \frac{E_j}{FEC_{ij}}$$

### Ecuación 12

Donde,

$Cm_{ij}$ : concentración modelada en el receptor  $i$  debido a la emisión de la fuente  $j$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$E_j$ : caudal de emisión másico anual procedente de la fuente  $j$  (ton As/año).

$FEC_{ij}$ : factor emisión-concentración en el receptor  $i$  debido a la emisión de la fuente  $j$  (ton As·m<sup>3</sup>/μg·año).

$i$ : receptor.

$j$ : fuente de emisión.

En los datos registrados en las estaciones del SINCA se plantea la hipótesis de que pueda existir una concentración de fondo o nivel basal, por el efecto de la resuspensión de material particulado

depositado sobre el suelo (ver sección 5.2.2). Este nivel basal, denominado  $\beta$ , genera un aporte adicional constante en la variación de la concentración observada, como indican las siguientes relaciones.

$$Co_i = \overline{Co}_i + \beta_i$$

**Ecuación 13**

$$Co_i = \sum_{j=1}^N \overline{Co}_{ij} + \beta_i$$

**Ecuación 14**

Donde,

$Co_i$ : concentración observada en el receptor  $i$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$\overline{Co}_i$ : concentración observada debida a la variación de las emisiones totales en el receptor  $i$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$\beta_i$ : concentración o nivel basal en el receptor  $i$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$\overline{Co}_{ij}$ : concentración observada debida a la variación de las emisiones de la fuente  $j$  en el receptor  $i$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$N$ : número de fuentes  $j$

$i$ : receptor.

$j$ : fuente de emisión.

Por lo que, se agrega este concepto a la metodología de cálculo del FEC, por medio del factor de corrección ( $FC'_{ij}$ ) el cual disminuirá el sesgo entre los resultados modelados y los medidos en cada receptor. Ante esto, se define al factor de corrección como:

$$FC'_{ij} = \frac{Cm_{ij}}{\overline{Co}_{ij}}$$

**Ecuación 15**

Donde,

$Cm_{ij}$ : concentración modelada en el receptor  $i$  debido a la emisión de la fuente  $j$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$\overline{Co}_{ij}$ : concentración observada debida a la variación de las emisiones de la fuente  $j$  en el receptor  $i$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$FC'_{ij}$ : factor de corrección en el receptor  $i$  debido a la emisión de la fuente  $j$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3 / \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$i$ : receptor.

$j$ : fuente de emisión.

Por su parte, se asume que la variable concentración observada para cada receptor ( $\overline{Co}_i$ ) indicada en la Ecuación 14, se distribuye según el aporte de cada fuente de emisión ( $j$ ) como se expresa en la siguiente relación:

$$\overline{Co}_{ij} = \sum_{j=1}^N d_{ij} \cdot \overline{Co}_i$$

### Ecuación 16

Donde,

$\overline{Co}_{ij}$ : concentración observada debida a la variación de las emisiones de la fuente  $j$  en el receptor  $i$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$\overline{Co}_i$ : concentración observada debida a la variación de las emisiones totales en el receptor  $i$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$d_{ij}$ : razón de distribución de la concentración modelada receptor  $i$  debido a la emisión de la fuente  $j$

$N$ : número de fuentes  $j$

$i$ : receptor.

$j$ : fuente de emisión

Esta razón de distribución ( $d_{ij}$ ) se asume equivalente a la distribución de las concentraciones modeladas, como se indica en la Ecuación 17.

$$d_{ij} = \frac{Cm_{ij}}{Cm_i}$$

### Ecuación 17

Donde,

$d_{ij}$ : razón de la concentración modelada receptor  $i$  debido a la emisión de la fuente  $j$

$Cm_{ij}$ : concentración modelada en el receptor  $i$  debido a la emisión de la fuente  $j$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$Cm_i$ : concentración modelada en el receptor  $i$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$i$ : receptor.

$j$ : fuente de emisión

Siguiendo la definición de Factor de Corrección en el receptor  $i$  ( $FC'_i$ ), según la demostración de equivalencia indicada en el Anexo 10.5, que define:

$$FC'_{ij} = \frac{Cm_{ij}}{\overline{Co}_{ij}} = FC'_i = \frac{Cm_i}{\overline{Co}_i}$$

### Ecuación 18

Donde,

$FC'_{ij}$ : factor de corrección en el receptor  $i$  debido a la emisión de la fuente  $j$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3 / \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$Cm_{ij}$ : concentración modelada en el receptor  $i$  debido a la emisión de la fuente  $j$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$\overline{Co}_{ij}$ : concentración observada corregida en el receptor  $i$  debido a la emisión de la fuente  $j$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$FC'_i$ : factor de corrección en el receptor  $i$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3 / \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$Cm_i$ : concentración modelada en el receptor  $i$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$\overline{Co}_i$ : concentración observada debida a la variación de las emisiones totales en el receptor  $i$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$i$ : receptor.

$j$ : fuente de emisión

Y, reemplazando esta nueva definición del factor  $FC'_i$  en la Ecuación 12, se puede redefinir la relación emisión concentración como:

$$Co_{ij} = \frac{E_j}{FEC_{ij}} \cdot \frac{1}{FC'_i} + \beta_i$$

$$\sum_{j=1}^N Co_{ij} = \sum_{j=i}^N \frac{E_j}{FEC_{ij}} \cdot \frac{1}{FC'_i} + \beta_i$$

### Ecuación 19

Donde,

$Co_{ij}$ : concentración observada en el receptor  $i$  debido a la emisión de la fuente  $j$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$E_j$ : caudal de emisión másico anual procedente de la fuente  $j$  (ton As/año).

$FEC_{ij}$ : factor emisión-concentración en el receptor  $i$  debido a la emisión de la fuente  $j$  (ton As·m<sup>3</sup>/μg·año).

$FC'_i$ : factor de corrección en el receptor  $i$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3 / \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$\beta_{ij}$ : concentración o nivel basal en el receptor  $i$  debido a la emisión de la fuente  $j$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$N$ : número de fuentes  $j$

$i$ : receptor.

$j$ : fuente de emisión.

Para cada fuente, se cuenta entonces con un  $FEC'_{ij}$  corregido por el factor  $FC'_i$  que da cuenta del sesgo evaluado del modelo de dispersión atmosférica frente a los datos observados, de modo que se incluya la incertidumbre asociada a la modelización meteorológica, a la estimación de emisiones, al régimen operacional de la planta y al modelo de dispersión atmosférica. A continuación, se indica la definición del  $FEC'_{ij}$ :

$$FEC'_{ij} = FEC_{ij} \cdot FC'_i$$

## Ecuación 20

Donde,

$FEC'_{ij}$ : factor emisión-concentración corregido en el receptor  $i$  debido a la emisión de la fuente  $j$  ( $\text{ton As}\cdot\text{m}^3/\mu\text{g}\cdot\text{año}$ ).

$FC'_i$ : factor de corrección en el receptor  $i$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3 / \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$FEC_{ij}$ : factor emisión-concentración en el receptor  $i$  debido a la emisión de la fuente  $j$  ( $\text{ton As}\cdot\text{m}^3/\mu\text{g}\cdot\text{año}$ ).

$i$ : receptor.

$j$ : fuente de emisión.

Para cada dominio de simulación donde se emplazan las 8 plantas, se realiza la simulación del año completo de sus emisiones atmosféricas, de acuerdo con las horas de operación correspondientes al año meteorológicamente simulado con el modelo WRF (2020). Realizando una analogía con la Ecuación 9 se asume la hipótesis que el parámetro FEC recoge la información del resto de parámetros y variables involucradas en el transporte y dispersión del arsénico emitido por cada fuente, a excepción del caudal de emisión másico, presentando un comportamiento decreciente hiperbólicamente a medida que el receptor se aleja de la fuente de emisión, es decir, se incrementa la distancia fuente de emisión - receptor.

Por lo tanto, para determinar el factor FEC, se seleccionará por dominio, una estación representativa de cada localidad (receptor), eligiendo para esto la estación con mayor concentración promedio que tuviera representatividad poblacional de MP10 o (en los dominios donde no hubiera estaciones representativas) se elegirá la que tenga más población cercana. La Tabla 5-6 indica las estaciones seleccionadas por localidad para la determinación del FEC.

**Tabla 5-6 Estaciones representativas por localidad y dominio**

Fundición	Estación representativa	Localidad
Chuquicamata	Estación CD 23 de marzo	Calama
	Estación Nueva ChiuChiu	ChiuChiu
Altonorte	Estación Inacal	La Negra
	Estación Coviefi	Antofagasta
Potrerillos	Estación Cine Inca	Salvador
	Estación CAP	Potrerillos
Hernán Videla Lira	Estación Paipote	Copiapó
	Estación Tierra Amarilla	Tierra Amarilla
Ventanas	Estación Quintero	Quintero
	Estación Puchuncaví	Puchuncaví
	Estación Ventanas	Ventanas
Chagres	Estación Lo Campo	Catemu
	-	Panquehue
	-	Llayllay
Caletones	Estación Coya Población	Coya

Fuente: Elaboración propia

Se destaca que en el Anexo de la Sección 10.9 se presenta una evaluación de la metodología de modelación y obtención del FEC, donde se concluye que la metodología propuesta para la obtención del FEC por fuente incorpora la incertidumbre asociada a los modelos aplicados, meteorológicos y de dispersión atmosférica, así como la de estimación de emisiones en la obtención del FEC.

Se puede concluir, por lo tanto, que esta metodología resulta válida siempre y cuando se trate de un valor promedio anual y no un análisis episódico (horaria o diaria) y, por ende, este enfoque metodológico es válido en el caso del arsénico dado que los riesgos a la salud de las personas están asociados a una exposición crónica y no aguda.

### 5.1.6 Determinación del aporte basal

En la siguiente sección se explica cómo se determinó la concentración basal de arsénico en MP10. Entendiendo que la concentración observada está conformada por aportes de distintas fuentes, se define como concentración basal a la concentración de arsénico atmosférico que no proviene de las fundiciones. Esto puede ser por emisiones provenientes de algunas fuentes locales menores y/o de fuentes naturales.

Dado que los alcances del presente estudio no incluyen realizar un análisis químico in situ para cada estación o realizar mediciones de ubicaciones cercanas pero ajenas a la influencia de las fundiciones, se revisaron otros métodos disponibles en la literatura. Los métodos identificados en la literatura se pueden clasificar en tres grandes grupos: filtros meteorológicos; simulaciones; y análisis estadísticos.

Los filtros meteorológicos, mediante la reconstrucción de trayectorias pasadas, permiten identificar si el aire que se observó un día particular pasó por una zona de contaminación (Gao

et al., 2019). De esta manera, se filtran solo los días sin contaminación externa para obtener la concentración basal<sup>57</sup>. El problema de este método es que requiere de una modelación meteorológica de las trayectorias pasadas y una buena delimitación de las zonas contaminadas.

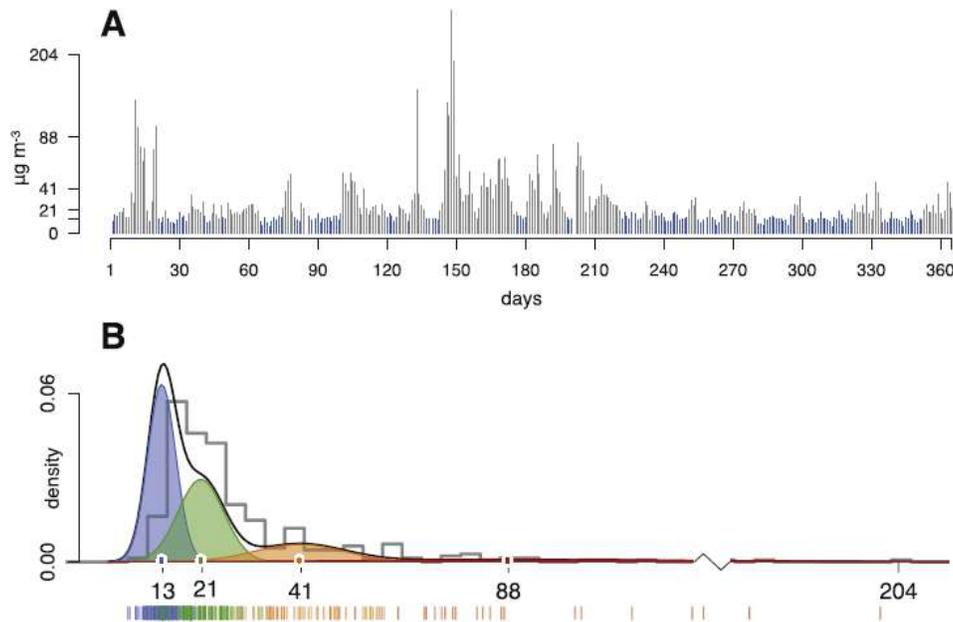
Las simulaciones también son usadas para determinar concentración basal, pero requieren gran cantidad de información y detalle sobre las fuentes de emisión menores y naturales. Es por esto que es más común ver este método aplicado a contaminantes más estudiados como el material particulado (Fang et al., 2017; Liu et al., 2017).

Por último, están los métodos estadísticos que ocupan las observaciones reales para determinar la concentración basal. Existe una gran diversidad de métodos entre los cuales se encuentran por ejemplo: análisis espectrales (Tchepel et al., 2010), filtros KZ (Gao et al., 2019), algoritmos Eckhardt (Y. Wang et al., 2019), algoritmos mAGAGE (S. H. Wang et al., 2020) y *clustering* (Giostra et al., 2011), entre otros. Estos tienen en común la ventaja que solo necesitan observaciones de concentración, lo cual es más común de disponer. Las limitaciones están asociadas a el aumento de incertidumbre cuando se cuenta con bajas cantidades de datos.

Un método estadístico de *clustering* de especial interés es el de agrupación mediante cadenas markovianas ocultas (HMM por sus siglas en inglés), el cual se destaca por su flexibilidad y fácil interpretación (Gomez-Losada et al. 2015). Las HMM realizan una agrupación de las observaciones a lo largo del tiempo en regímenes de distintas concentraciones (*clusters*). A modo de ejemplo, en la Figura 5-12 se muestran las figuras explicativas de Martín-Cruz, Vera-Castellano, & Gómez-Losada (2020), donde se observa cómo la serie de tiempo se descompone en distintos regímenes de concentración (colores) que tienen una distribución gaussiana. El algoritmo encuentra la mejor combinación de regímenes gaussianos para explicar el histograma observado.

---

<sup>57</sup> Es común realizar análisis estadísticos posteriores al filtrado.



**Figura 5-12 Ejemplo de cadena markoviana oculta para estimar concentración basal**

Fuente: (Martín-Cruz et al., 2020)

Para la determinación de las concentraciones del presente estudio se utilizó el método de HMM de una manera similar al de Gómez-Losada, Pires, & Pino-Mejías (2015). Se corrió el modelo para 3, 4 y 5 regímenes, conservándose el mejor según BIC y consistencia para cada estación. Con esto se obtuvo el promedio y desviación estándar de cada régimen, siendo el más bajo la concentración basal. Para validar estos resultados, se compararon con la concentración observada de los días en que las plantas de ácidos de las fundiciones estaban apagadas, obteniéndose resultados similares. Luego, dado que para calibrar la modelación de este estudio solo es necesario seleccionar una estación por fundición, se eligió la estación con mayor concentración promedio con representatividad poblacional en cada una de las localidades en el área de influencia de las fundiciones<sup>58</sup>.

En la Tabla 5-7 se muestran las concentraciones basales estimadas para cada estación seleccionada<sup>59</sup>, en conjunto con su intervalo de confianza y el promedio de los dos últimos años. Se puede observar valores dentro de lo esperable desde 1,7 ng/m<sup>3</sup> en la estación Paipote hasta 16,1 ng/m<sup>3</sup> en la estación La Negra-Inacal. También se observan intervalos de confianza amplios para algunas estaciones, lo que grafica la incertidumbre asociada al método.

<sup>58</sup> En las fuentes donde no hubiera estaciones representativas se eligió alguna estación en la zona que cuente con datos que podrían ser considerados representativos.

<sup>59</sup> Mayores antecedentes como estimaciones en otras estaciones o comparación con otros antecedentes se presentan en el Anexo Sección 10.4.

**Tabla 5-7 Concentración basal [ng/m3] estimada estadísticamente para calibración**

Fuente	Estación para calibración	Concentración 2019	Concentración 2020	Estimación basal	P5	P95	Número de regímenes
Chuquicamata	CD 23 de Marzo	16,1	29,4	<b>9,2</b>	2,2	16,1	5
	Nueva Chiuchiu	7,2	5,1	<b>3,7</b>	0,6	6,8	3
Altonorte	La Negra-Inacal	67,1	42,0	<b>16,1</b>	0,0	32,3	5
	Coviefi	8,1	7,8	<b>1,4</b>	0,3	2,5	4
Potrerillos	Cine Inca	3,5	5,2	<b>2,0</b>	2,0	2,0	4
	CAP	13,7	30,3	<b>5,5</b>	1,3	9,7	5
HVL	Paipote	23,6	54,2	<b>1,7</b>	0,2	3,2	5
	Tierra Amarilla	12,6	34,4	<b>2,8</b>	0,1	5,5	5
Ventanas	Quintero	48,4	50,9	<b>4,7</b>	-2,2	11,6	4
	Puchuncaví	12,1	13,3	<b>4,7</b>	-0,9	10,3	3
	Ventanas	16,0	14,2	<b>2,4</b>	-0,1	5,0	4
Chagres	Lo Campo	36,2	14,3	<b>9,4</b>	4,2	14,7	5
Caletones	Coya Población	5,1	6,4	<b>1,8</b>	0,0	3,6	4

Nota: Se presenta el percentil 5 y 95 de la distribución gaussiana estimada.

Fuente: Elaboración propia

De los resultados se observa, en general una tendencia de que algunas estaciones tiene niveles basales más altos, lo que se explicaría por la influencia del desierto. La excepción corresponde a la concentración basal de la estación Lo Campo, lo cual se explicaría por el método de medición y reporte en base a compósitos trimestrales (hasta el primer semestre del 2018) y mensualmente desde entonces. Este método, el cual permite una correcta aproximación de los valores medios, no permite visualizar la variación de los niveles de forma más precisa. Lo anterior, resulta en que un método como el presente, no sea capaz de capturar de forma correcta los regímenes, resultando en una probable sobreestimación de la contribución basal.

Es importante resaltar que este método cuenta con distintas limitaciones y parámetros sensibles. Los intervalos confianza amplios se asocian a la variabilidad de los datos, sumado a una baja cantidad de datos. El número de regímenes es un parámetro relevante que podría resultar en una sobre o sub estimación, sin embargo, como se mencionó estos fueron comparados con las concentraciones en los días de baja actividad encontrando resultados coherentes. También vale la pena resaltar que los resultados se pueden ver afectados por la persistencia del arsénico en el aire. Se recomienda en el futuro mejorar las estimaciones con datos medidos in situ, a pesar de ser estudios costosos e intensivos en tiempo y recursos.

Como antecedente adicional, en Anexos (Sección 10.4) se encuentra una comparación de estas estimaciones con los resultados del estudio de Gidhagen, Kahelinb, Schmidt-Thome & Johansson (2002), el cual estima la concentración natural de arsénico en 7 localidades rurales de Chile.

## 5.2 Estimación de relación emisión - concentración

### 5.2.1 Análisis de incertidumbre meteorológico

#### 5.2.1.1 Dominio Chuquicamata

Dentro del dominio representado en la Figura 5-3 se encuentran las estaciones de Nueva ChiuChiu, CD 23 de marzo y Hospital El Cobre con registro de datos horarios disponibles para las variables velocidad y dirección del viento a 10 m, temperatura y humedad relativa a 2 m. Estas series de datos se comparan con los resultados obtenidos con el modelo WRF para interpretar la bondad de sus resultados.

En las siguientes tablas se presentan los estadísticos obtenidos de acuerdo con la metodología descrita en la Sección 5.1.2:

**Tabla 5-8 Variables de incertidumbre – Velocidad del viento**

Estación	BIAS <sup>1</sup>	MAE <sup>2</sup>	NMAE <sup>3</sup>	RMSE <sup>4</sup>	NMSE <sup>5</sup>	IOA <sup>6</sup>
Nueva ChiuChiu	0,81	1,85	0,51	2,37	0,65	0,79
CD 23 de marzo	-0,21	0,84	0,23	1,09	0,3	0,89
Hospital el Cobre	-0,01	1,03	0,26	1,32	0,33	0,85

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-9 Variables de incertidumbre – Dirección del viento**

Estación	BIAS <sup>1</sup>	MAE <sup>2</sup>	NMAE <sup>3</sup>	RMSE <sup>4</sup>	NMSE <sup>5</sup>	IOA <sup>6</sup>
Nueva ChiuChiu	24,93	74,59	0,47	123,48	0,77	0,66
CD 23 de marzo	-14,91	33,74	0,2	58,3	0,35	0,9
Hospital el Cobre	-12,09	29,17	0,17	53,01	0,31	0,91

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-10 Variables de incertidumbre – Temperatura**

Variable	BIAS <sup>1</sup>	MAE <sup>2</sup>	NMAE <sup>3</sup>	RMSE <sup>4</sup>	NMSE <sup>5</sup>	IOA <sup>6</sup>
Nueva ChiuChiu	-4,73	5,46	0,4	6,55	0,48	0,72
CD 23 de marzo	-4,52	5,09	0,32	5,92	0,37	0,73
Hospital el Cobre	-3,82	4,68	0,3	5,5	0,35	0,75

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (*root-mean-square deviation*), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los valores obtenidos del análisis de incertidumbre y los criterios de aceptación proporcionados en la Tabla 5-2 y Tabla 5-3 se puede concluir lo siguiente:

**Velocidad del viento:**

Dependiendo de la ubicación de la estación se presentan ligeras diferencias en el BIAS, obteniéndose los valores comprendidos dentro del intervalo  $[-0.21, 0.81]$ . Al analizar el valor absoluto de las diferencias, en todas las estaciones se cumple el criterio de validez, igualmente que, con el IOA, resultando en una buena representación de la velocidad del viento por parte del modelo WRF.

**Dirección del viento:**

Los sesgos, representados por el BIAS y el MAE, presentan diferencias en su validez dependiendo de la estación. En términos absolutos, solamente la estación Hospital El Cobre cumple con el criterio, resultando en el resto de las estaciones con resultados donde esta variable no se comporta dentro de los valores esperados.

**Temperatura superficial:**

Existe un sesgo negativo y recurrente en todas las ubicaciones, manifestando una subestimación en promedio de 4 °C entre los valores simulados y los observados en las tres estaciones que cuentan con registro. Por otro lado, la variación horaria en el ciclo anual presenta una fuerte correlación, dado el alto valor del IOA, es decir, la dirección del cambio que manifiestan en el intervalo horario en las dinámicas horarias entre ambas series de datos está dentro de los criterios de validez.

**5.2.1.2 Dominio Altonorte**

Dentro del dominio representado en la Figura 5-5 se encuentran las estaciones de Coviefi, Inacal y Sur, sin embargo, dichas estaciones no cuentan con registros disponibles de las variables temperatura, humedad, velocidad o dirección del viento a 10 m, por lo tanto, no es posible interpretar la bondad de los resultados obtenidos con el modelo WRF.

**5.2.1.3 Dominio Potrerillos**

Dentro del dominio representado en la Figura 5-6 se encuentran las estaciones de Doña Inés, Intelec, Cina Inca y CAP sin embargo, dichas estaciones no cuentan con registros disponibles de las variables temperatura, humedad, velocidad o dirección del viento a 10 m, por lo tanto, no es posible con los resultados obtenidos con el modelo WRF para interpretar la bondad de sus resultados.

**5.2.1.4 Dominio Hernán Videla Lira**

Dentro del dominio representado en la Figura 5-7 se encuentran las estaciones de Paipote, Copiapó, San Fernando y Tierra Amarilla, sin embargo, dichas estaciones no cuentan con registros disponibles de las variables temperatura, humedad, velocidad o dirección del viento a 10 m, por lo tanto, no es posible con los resultados obtenidos con el modelo WRF para interpretar la bondad de sus resultados.

**5.2.1.5 Dominio Chagres**

Dentro del dominio representado en la Figura 5-9 se encuentran las estaciones de Catemu y Lo Campo con registro de datos horarios disponibles para las variables velocidad y dirección del

viento a 10 m, temperatura y humedad relativa a 2 m. Estas series de datos se comparan con los resultados obtenidos con el modelo WRF para interpretar la bondad de sus resultados.

En las siguientes tablas se presentan los estadísticos obtenidos de acuerdo con la metodología descrita en la Sección 5.1.2:

**Tabla 5-11 Variables de incertidumbre – Velocidad del viento**

Estación	BIAS <sup>1</sup>	MAE <sup>2</sup>	NMAE <sup>3</sup>	RMSE <sup>4</sup>	NMSE <sup>5</sup>	IOA <sup>6</sup>
Catemu	0,655	0,8668	0,94	1,22	1,32	0,55
Lo Campo	2,404	2,4682	2,67	3,09	3,34	0,34

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-12 Variables de incertidumbre – Dirección del viento**

Estación	BIAS <sup>1</sup>	MAE <sup>2</sup>	NMAE <sup>3</sup>	RMSE <sup>4</sup>	NMSE <sup>5</sup>	IOA <sup>6</sup>
Catemu	-11,2435	74,1628	0,49	106,56	0,71	0,51
Lo Campo	2,404	2,4682	2,67	3,09	3,34	0,34

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (*root-mean-square deviation*), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los valores obtenidos del análisis de incertidumbre y los criterios de aceptación proporcionados en la Tabla 5-2 y Tabla 5-3 se puede concluir lo siguiente:

#### **Velocidad del viento:**

Para ambas estaciones existe un sesgo positivo en la velocidad del viento indicado por el BIAS, cuyo rango se encuentra entre [0,65 y 2,4] por lo que, se puede indicar que este viene dado por las diferentes ubicaciones. En general, los parámetros cumplen con los criterios de validez de IOA y RMSE, a excepción de la estación Lo Campo, cuyo valor de RMSE supera al criterio de validez definido en 2/ms como máximo.

#### **Dirección del viento:**

Los sesgos, representados por el BIAS y el MAE, presentan diferencias en su validez dependiendo de la estación. En general, solamente la estación Lo Campo cumple con el criterio del MAE y BIAS:

#### **5.2.1.6 Dominio Ventanas**

Dentro del dominio representado en la Figura 5-9 se encuentran las estaciones de La Greda, Los Maitenes, Quintero, Quintero Centro, Sur, Valle Alegre y Ventanas con registro de datos horarios disponibles para las variables velocidad y dirección del viento a 10 m. Estas series de datos se comparan con los resultados obtenidos con el modelo WRF para interpretar la bondad de sus resultados.

En las siguientes tablas se presentan los estadísticos obtenidos de acuerdo con la metodología descrita en la Sección 5.1.2:

**Tabla 5-13 Variables de incertidumbre – Velocidad del viento**

Estación	BIAS <sup>1</sup>	MAE <sup>2</sup>	NMAE <sup>3</sup>	RMSE <sup>4</sup>	NMSE <sup>5</sup>	IOA <sup>6</sup>
La Greda	0,1359	0,7394	0,48	1	0,66	0,82
Los Maitenes	1,2582	1,3841	1,51	1,93	2,11	0,48
Quintero	1,5617	1,8556	0,86	2,43	1,13	0,71
Quintero Centro	0,7391	1,2799	0,56	1,75	0,77	0,78
4Sur	1,1113	1,3931	0,77	1,87	1,04	0,71
Valle Alegre	1,2067	1,287	1,67	1,74	2,27	0,52
Ventanas	-0,0506	0,8223	0,39	1,08	0,51	0,83

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-14 Variables de incertidumbre – Dirección del viento**

Estación	BIAS <sup>1</sup>	MAE <sup>2</sup>	NMAE <sup>3</sup>	RMSE <sup>4</sup>	NMSE <sup>5</sup>	IOA <sup>6</sup>
La Greda	6,8984	79,6726	0,45	113,62	0,64	0,65
Los Maitenes	-1,6959	68,1503	0,37	98,39	0,53	0,66
Quintero	4,2202	62,2012	0,34	92,75	0,51	0,62
Quintero Centro	-9,1446	61,8238	0,32	95,06	0,48	0,6
Sur	5,806	70,3762	0,4	103,47	0,59	0,68
Valle Alegre	37,6751	89,728	0,63	122,98	0,86	0,59
Ventanas	7,2725	78,6878	0,44	117,62	0,66	0,63

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (*root-mean-square deviation*), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los valores obtenidos del análisis de incertidumbre y los criterios de aceptación proporcionados en la Tabla 5-2 y Tabla 5-3 se puede concluir lo siguiente:

#### Velocidad del viento:

Dependiendo de la ubicación de la estación se presentan ligeras diferencias en el BIAS, obteniéndose los valores comprendidos dentro del intervalo [-0,05 y 1,56], sólo la estación Ventanas presenta un sesgo negativo. Al analizar el valor RMSE, en todas las estaciones se cumple el criterio de validez, y en la mayoría de las estaciones se obtienen valores aceptables de IOA.

#### Dirección del viento:

Los sesgos, representados por el BIAS tienden a ser sesgos positivos, y en general el MAE, se encuentra fuera del rango de validez.

### 5.2.1.7 Dominio Caletones

Dentro del dominio representado en la Figura 5-10 se encuentran las estaciones de Coya Club, Coya Población y Sewell, sin embargo, dichas estaciones no cuentan con registros disponibles de las variables temperatura, humedad, velocidad o dirección del viento a 10 m, por lo tanto, no es posible con los resultados obtenidos con el modelo WRF para interpretar la bondad de sus resultados.

## 5.2.2 Relación emisión-concentración

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de concentraciones en inmisión a partir de los inventarios de emisiones aplicados a cada una de las fuentes de emisión atmosféricas puntuales y fugitivas presentes en cada una de las 8 plantas a analizar<sup>60</sup>. Los niveles de concentración en inmisión obtenidos siguen la metodología descrita en la Sección 5.1 y se comparan los valores modelados con los observados para cada una de las estaciones con registro de valores de arsénico para el año 2020 en los Anexos (Sección 10.8), mientras que la sección posterior presenta un análisis general por dominio.

A partir de los niveles de concentración y las emisiones anuales procedentes de cada una de las fuentes se presenta para cada dominio de simulación la propuesta de la función que relaciona en nivel de concentración con el caudal másico de emisión.

### 5.2.2.1 Fundición Chuquicamata

Los resultados del análisis de las series temporales disponibles para el año 2020 muestran que existe una sobrestimación en los niveles de concentración simulados respecto a los obtenidos en 4 de las 6 estaciones de monitoreo disponibles dentro del dominio de Chuquicamata, correspondientes con Centro Calama, Nueva Chiu-Chiu, Hospital El Cobre y Aukahuasi.

Esta sobrestimación es prácticamente homogénea para cada una de las estaciones dado que el valor absoluto del BIAS y el MAE presentan diferencias muy pequeñas (Tabla 5-15), excepto en la estación Aukahuasi, lo cual indica que dicha estación presenta valores fuera de la tendencia generalizada para el resto de estaciones, de hecho, según la figura Figura 5-13 y el valor RMSE, en esta estación existe una mayor dispersión en los datos respecto al resto.

En la Tabla 5-15 el valor NMAE, que permite relativizar el error para las estaciones en estudio, indica que existen errores del mismo orden en las estaciones, excepto la estación Aukahuasi que presenta el mayor error. Por otro lado, el valor NMSE indica que las estaciones CD 23 de Marzo y Aukahuasi, presentan dispersiones similares. Por su parte, el IOA indica que para todas las estaciones existen bajas correlaciones.

---

<sup>60</sup> El detalle del inventario de emisiones modelado se presenta en los Anexos del informe (Sección 10.7)

**Tabla 5-15 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Chuquicamata**

Estación	BIAS <sup>1</sup>	MAE <sup>2</sup>	NMAE <sup>3</sup>	RMSE <sup>4</sup>	NMSE <sup>5</sup>	IOA <sup>6</sup>	Distancia (m)
<b>CD 23 de Marzo</b>	-0,0188	0,0234	0,815	0,0637	2,2201	0,14	16.827
<b>Centro Calama</b>	0,0016	0,0069	0,9856	0,0124	1,7628	0,16	16.710
<b>Nueva Chiu-Chiu</b>	0,0013	0,0051	1,0003	0,0088	1,7319	0,38	24.299
<b>Hospital El Cobre</b>	0,0021	0,0067	1,0752	0,0115	1,8249	0,13	15.477
<b>C.P.V.K</b>	-0,0077	0,017	0,8162	0,0275	1,3216	0,28	14.740
<b>Aukahuasi</b>	0,079	0,1261	1,7938	0,232	3,2998	0,18	5.379

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (*root-mean-square deviation*), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

Fuente: Elaboración propia

Si se analiza la distribución del error en intervalos y la frecuencia con la que ocurre cada uno de ellos de manera relativa, en tanto por ciento (Figura 5-14) todas las estaciones presentan una distribución de frecuencias relativamente simétrica centrada en su BIAS, mostrando nuevamente el sesgo en la sobrestimación de la concentración en la mayoría de las estaciones.

Según estos resultados, la estación más cercana (Aukahuasi a 5 km) es la que tiende a presentar la mayor incertidumbre dentro de la zona de estudio, lo cual es esperable para puntos cercanos a las fuentes de emisión, donde pequeñas diferencias, ya sea en la modelación meteorológica o en la estimación de las emisiones, se traduce en mayores diferencias en los resultados de concentración en datos modelados. El efecto contrario sucede en la estación más alejada (Nueva Chiu-Chiu a 24 km). Por lo tanto, se aprecia que los parámetros MAE, BIAS y RMSE tienen tendencias similares según la distancia.

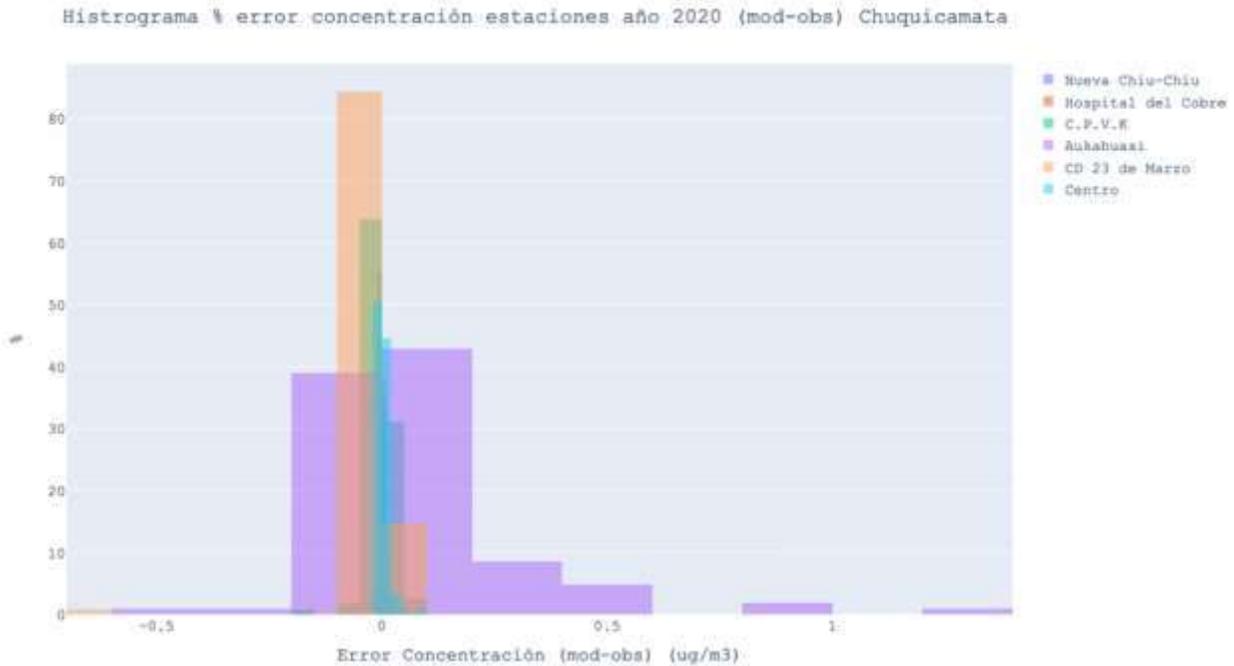
Por otra parte, si se analizan de forma comparativa las rosas de viento de cada estación (ver Anexo de la Sección 10.3)., se puede indicar que las ubicadas en Calama, conservan las direcciones de viento predominantes (oeste suroeste y este noreste), diferenciándose con las estaciones Aukahuasi y Nueva Chiu-Chiu ubicadas en zonas diferentes. En general, las estaciones de la zona de Calama presentan similar incertidumbre indicada por los valores de NMAE y NMSE.

Variación error concentración estaciones año 2020 Chuquicamata



**Figura 5-13 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundación Chuquicamata 2020**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-14 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Chuquicamata 2020**

Fuente: Elaboración propia

Como se indica en los Anexos presente en la Sección 10.5 y Sección 10.7, se observa que en el mes de julio no existen emisiones en los datos modelados, tal como se indica en el inventario de emisiones, sin embargo existe una concentración de arsénico de fondo en los datos observados, una hipótesis sobre esto se puede deber al efecto de la resuspensión de material particulado depositado sobre el suelo, este fenómeno se replica para las demás estaciones de este dominio de estudio.

#### Determinación relación emisión concentración

Como se indica en la Sección 5.1.5, se determinaron 2 estaciones representativas para este dominio de estudio en las localidades de Calama y ChiuChiu, correspondientes a las estaciones CD 23 de marzo y Nueva Chiu Chiu, respectivamente, como indica la Tabla 5-16.

**Tabla 5-16 Estación representativa por localidad – Fundición Chuquicamata**

Fundición	Estación representativa	Localidad
Chuquicamata	Estación CD 23 de marzo	Calama
	Estación Nueva ChiuChiu	ChiuChiu

Fuente: Elaboración propia

**Paso 1:** Siguiendo la metodología indicada en la Sección 5.1.5, en primer lugar, se determinará la concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\overline{C_{O_i}}$ ) a través de la Ecuación 13

y los datos de la Tabla 5-17. Los datos de concentración observada ( $C_{o_i}$ ) fueron extraídos desde el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) y corresponde al promedio observado en el año 2020.

**Tabla 5-17 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Chuquicamata**

Simbología	ITEM	Estación	
		CD 23 de marzo	Nueva ChiuChiu
$C_{o_i}$	Concentración observada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>1</sup>	0,0294	0,0051
$\beta_i$	Concentración o nivel basal ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>2</sup>	0,0092	0,0037
$\bar{C}_{o_i}$	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0202	0,0014

Nota 1: Información extraída desde Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) año 2020

Nota 2: El nivel basal se estimó a partir de la metodología presentada en la Sección 5.1.6

Fuente: Elaboración propia

**Paso 2:** En esta etapa se determinará el factor de corrección para los receptores, correspondiente a las estaciones CD 23 de marzo y Nueva ChiuChiu. Para ello, se utiliza la Ecuación 18 y los datos presentados en la Tabla 5-18.

**Tabla 5-18 Factor de corrección por receptor – Fundición Chuquicamata**

Simbología	ITEM	Estación	
		CD 23 de marzo	Nueva ChiuChiu
$\bar{C}_{o_i}$	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0202	0,0014
$C_{m_i}$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0097	0,0057
$FC'_i$	Factor de corrección	0,4815	4,0156

Fuente: Elaboración propia

**Paso 3:** Luego, se determina el factor FEC expresado desde una función lineal que permita definir el nivel de concentración en un receptor particular de acuerdo con la contribución de las emisiones procedentes de cada fuente de emisión, según la Ecuación 12 (ver Tabla 5-19 y Tabla 5-24).

**Tabla 5-19 Factor FEC por fuente – Estación CD 23 de marzo, Fundición Chuquicamata**

Simbología	ITEM	Fuente			
		PA3	PA4	PAS	Fugitiva
$C_{m_{ij}}$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,00002	0,00001	0,0000001	0,0097
$E_j$	Emisiones (ton As/año)	0,3231	0,2815	0,0229	180,17
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton As·m <sup>3</sup> / $\mu\text{g}$ ·año)	19.914,5	19.391,19	16.5941,59	18.583,04

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-20 Factor FEC por fuente – Estación Nueva ChiuChiu, Fundición Chuquicamata**

Simbología	ITEM	Fuente			
		PA3	PA4	PAS	Fugitiva
$C_{m_{ij}}$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,00001	0,00001	0,00001	0,0056
$E_j$	Emisiones (ton As/año)	0,3231	0,2815	0,0229	180,17
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton As·m <sup>3</sup> / $\mu\text{g}\cdot\text{año}$ )	23.527,27	22.707,21	1.847,23	32.026,45

Fuente: Elaboración propia

**Paso 4:** Finalmente, se calcula el factor  $FEC'$  a partir de la Ecuación 20 y los valores  $FC$  y  $FEC$  indicados en la Tabla 5-18 y Tabla 5-20, respectivamente. Los resultados se presentan en la Tabla 5-21 y Tabla 5-22.

**Tabla 5-21 Factor FEC corregido por fuente – Estación CD 23 de marzo, Fundición Chuquicamata**

Simbología	ITEM	Fuente			
		PA3	PA4	PAS	Fugitiva
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton As·m <sup>3</sup> / $\mu\text{g}\cdot\text{año}$ )	19.914,5	19.391,19	16.5941,59	18.583,04
$FC'_i$	Factor de corrección	0,4815			
$FEC'_{ij}$	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m <sup>3</sup> / $\mu\text{g}\cdot\text{año}$ )	9.588,79	9.336,84	79.900,71	8.947,71

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-22 Factor FEC corregido por fuente – Estación Nueva ChiuChiu, Fundición Chuquicamata**

Simbología	ITEM	Fuente			
		PA3	PA4	PAS	Fugitiva
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton As·m <sup>3</sup> / $\mu\text{g}\cdot\text{año}$ )	23.527,27	22.707,21	1.847,23	32.026,45
$FC'_i$	Factor de corrección	4,0156			
$FEC'_{ij}$	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m <sup>3</sup> / $\mu\text{g}\cdot\text{año}$ )	94.474,99	91.181,98	7.417,65	12.8603,91

Fuente: Elaboración propia

Para la presente zona geográfica la función de relación emisión-concentración ( $FEC$ ), quedaría del siguiente modo. Se agrega, que el procedimiento de cálculo anterior, se replica en el Anexo Digital I - Cálculos FEC por Dominio.

**Tabla 5-23 Relación FEC por receptor – Fundición Chuquicamata**

Receptor	Localidad	Relación FEC	Etiqueta
Estación CD 23 de marzo	Calama	$C_{Calama} = \frac{E_{PA3}}{9.588,79} + \frac{E_{PA4}}{9.336,84} + \frac{E_{PAS}}{7.9900,71} + \frac{E_{FUGITIVA}}{8.947,71} + 0,009$	Ecuación 21
Estación Nueva ChiuChiu	ChiuChiu	$C_{Chiu-Chiu} = \frac{E_{PA3}}{9.4474,99} + \frac{E_{PA4}}{9.1181,98} + \frac{E_{PAS}}{7.417,65} + \frac{E_{Fugitiva}}{128.603,91} + 0,0037$	Ecuación 22

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2.2 Fundición Altonorte

Los resultados del análisis de las series temporales disponibles para el año 2020 muestran que existe una sobrestimación en los niveles de concentración simulados respecto a los obtenidos en las tres estaciones de monitoreo disponibles dentro del dominio de Altonorte. Esta sobrestimación es homogénea y sistemática para cada una de las estaciones, indicado según el valor absoluto del BIAS y el MAE, que presentan diferencias muy pequeñas (Tabla 5-24).

Los valores de IOA presentados en la Tabla 5-24 indican que existe baja correlación en todas las estaciones, pero según los órdenes de magnitud de los valores NMAE y NMSE la estación con menor incertidumbre es la estación Coviefi, además según el indicador RMSE esta estación es la que presenta menor dispersión de datos y también, corresponde a la estación más alejada de las fuentes de emisión para este dominio (17 km).

**Tabla 5-24 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Altonorte**

Estación	BIAS <sup>1</sup>	MAE <sup>2</sup>	NMAE <sup>3</sup>	RMSE <sup>4</sup>	NMSE <sup>5</sup>	IOA <sup>6</sup>	Distancia (m)
Coviefi	0,0466	0,0473	6,0871	0,0584	7,5195	0,14	17.845
Inacal	1,7145	1,7145	40,8959	2,072	49,4246	0,03	4.800
Sur	5,712	5,712	56,2889	7,1283	70,245	0,02	1.106

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (root-mean-square deviation), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el caso anterior, se puede determinar que existe una relación decreciente entre los parámetros y la distancia, donde las estaciones más cercanas tienden a presentar mayor incertidumbre dentro de la zona de estudio.

Si se analiza la distribución del error en intervalos y la frecuencia con la que ocurre cada uno de ellos de manera relativa, en tanto por ciento (Figura 5-15) cada una de las estaciones presenta una distribución de frecuencias relativamente simétrica centrada en su BIAS, mostrando nuevamente el sesgo sistemático en la sobrestimación de la concentración.

Al comparar las rosas de viento obtenidas en las estaciones indicadas y presentadas en el Anexo Digital I - Cálculos FEC por Dominio, se puede determinar que las estaciones Sur e Inacal conservan el vector de dirección oeste noroeste, pero existen diferencias en las distribuciones de dirección y velocidad del viento, esto dado que ambas estaciones se ubican en diferentes zonas con respecto a las fuentes de emisión en la zona de estudio. La estación Inacal se ubica en la zona

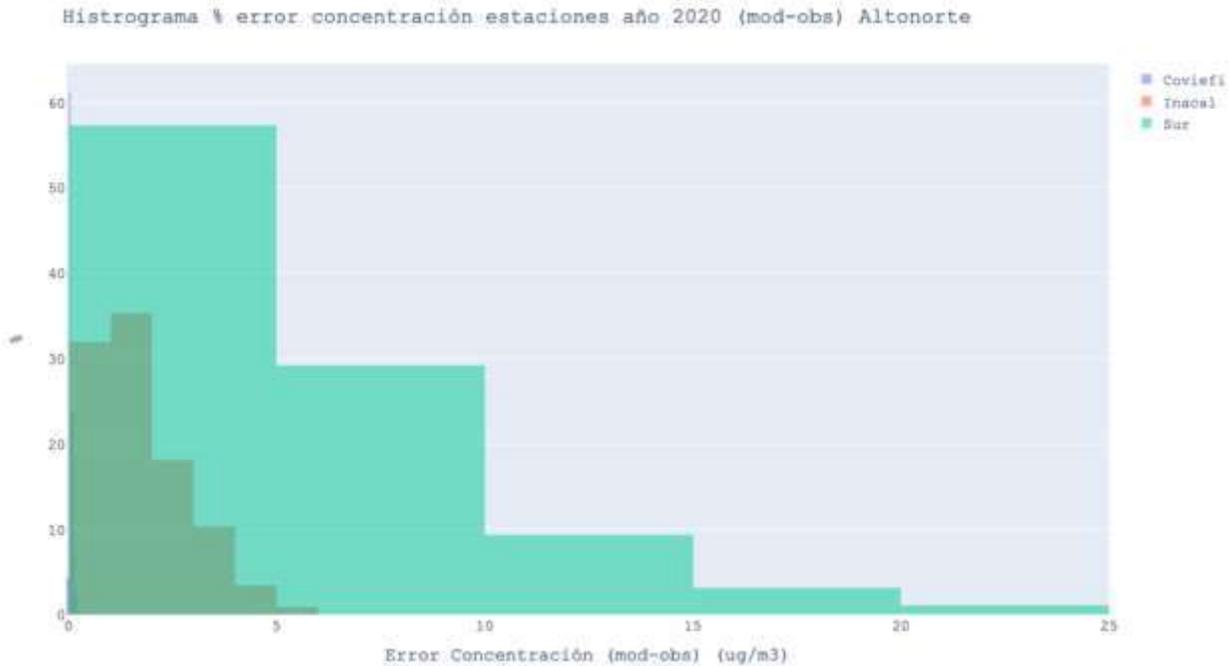
norte y la estación Sur en el sureste. A pesar de esto, ambas estaciones coinciden en que indican alta incertidumbre según los parámetros de NMAE y NMSE, además de baja correlación de datos, según el IOA.

Variación error concentración estaciones año 2020 Altonorte



**Figura 5-15 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Altonorte 2020**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-16 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Altonorte 2020**

Fuente: Elaboración propia

### Determinación relación emisión concentración

Como se indica en la Sección 5.1.5, se determinaron 2 estaciones representativas para este dominio de estudio en las localidades de La Negra y Antofagasta, correspondientes a las estaciones Inacal y Antofagasta, respectivamente, como indica la Tabla 5-25

**Tabla 5-25 Estación representativa por localidad – Fundición Altonorte**

Fundición	Estación representativa	Localidad
Altonorte	Estación Inacal	La Negra
	Estación Coviefi	Antofagasta

Fuente: Elaboración propia

**Paso 1:** Siguiendo la metodología indicada en la Sección 5.1.5, en primer lugar, se determinará la concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\overline{CO}_i$ ) a través de la Ecuación 13 y los datos de la Tabla 5-26. Los datos de concentración observada ( $CO_i$ ) fueron extraídos desde el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) y corresponde al promedio observado en el año 2020.

**Tabla 5-26 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Altonorte**

Simbología	ITEM	Estación	
		Coviefi	Inacal
$Co_i$	Concentración observada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>1</sup>	0,0078	0,0418
$\beta_i$	Concentración o nivel basal ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>2</sup>	0,0014	0,0161
$\overline{Co}_i$	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0064	0,0257

Nota 1: Información extraída desde Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) año 2020

Nota 2: El *background* se estimó a partir de la metodología presentada en la Sección 5.1.6

Fuente: Elaboración propia

**Paso 2:** En esta etapa se determinará el factor de corrección para los receptores, correspondiente a las estaciones Coviefi e Inacal. Para esto se utiliza la Ecuación 18 y los datos presentados en la Tabla 5-27.

**Tabla 5-27 Factor de corrección por receptor – Fundición Altonorte**

Simbología	ITEM	Estación	
		Coviefi	Inacal
$\overline{Co}_i$	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0064	0,0257
$Cm_i$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0543	1,7214
$FC'_i$	Factor de corrección	8,49	66,98

Fuente: Elaboración propia

**Paso 3:** Luego, se determina el factor FEC expresado desde una función lineal que permita definir el nivel de concentración en un receptor particular de acuerdo con la contribución de las emisiones procedentes de cada fuente de emisión, según la Ecuación 12 (ver Tabla 5-28 y Tabla 5-29).

**Tabla 5-28 Factor FEC por fuente – Estación Coviefi, Fundición Altonorte**

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS1	PAS3	Fugitiva
$Cm_{ij}$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,000004	0,00002	0,0543
$E_j$	Emisiones (ton As/año)	0,0155	0,0757	117,6
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración	3.813,24	3.706,37	2.164,88

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-29 Factor FEC por fuente – Estación Inacal, Fundición Altonorte**

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS1	PAS3	Fugitiva
$Cm_{ij}$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,00001	0,00004	1,721
$E_j$	Emisiones (ton As/año)	0,0155	0,0757	117,6
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton As·m <sup>3</sup> / $\mu\text{g}$ -año)	1.699,94	1.748,47	68,32

Fuente: Elaboración propia

**Paso 4:** Finalmente, se calcula el factor  $FEC'$  a partir de la Ecuación 20. Los resultados se presentan en la Tabla 5-30 y Tabla 5-31.

**Tabla 5-30 Factor FEC corregido por fuente – Estación Coviefi, Fundición Altonorte**

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS1	PAS3	Fugitiva
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton As·m <sup>3</sup> /μg·año)	3.813,24	3.706,37	2.164,88
$FC'_i$	Factor de corrección	8,49		
$FEC'_{ij}$	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m <sup>3</sup> /μg·año)	32.380,51	31.473,01	18.383,28

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-31 Factor FEC corregido por fuente – Estación Inacal, Fundición Altonorte**

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS1	PAS3	Fugitiva
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton As·m <sup>3</sup> /μg·año)	1.699,94	1.748,47	68,32
$FC'_i$	Factor de corrección	66,98		
$FEC'_{ij}$	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m <sup>3</sup> /μg·año)	113.859,95	117.110,46	4.576,01

Fuente: Elaboración propia

Para la presente zona geográfica la función de relación emisión-concentración (FEC), quedaría del siguiente modo. Se agrega, que el procedimiento de cálculo anterior, se replica en el Anexo Digital I - Cálculos FEC por Dominio.

**Tabla 5-32 Relación FEC por receptor – Fundición Altonorte**

Receptor	Localidad	Relación FEC	Etiqueta
Estación Coviefi	Antofagasta	$C_{Antofagasta} = \frac{E_{PAS1}}{32.380,51} + \frac{E_{PAS3}}{31.473,01} + \frac{E_{FUGITIVA}}{18.383,28} + 0,0014$	Ecuación 23
Estación Inacal	ChiuChiu	$C_{La Negra} = \frac{E_{PAS1}}{113.859,95} + \frac{E_{PAS3}}{117.110,46} + \frac{E_{FUGITIVA}}{4.576,01} + 0,0161$	Ecuación 24

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2.3 Fundición Potrerillos

Los resultados del análisis de las series temporales disponibles para el año 2020 muestran que, en 2 de las 3 estaciones de estudio, correspondiente a Doña Inés y Cine Inca existe una subestimación en los niveles de concentración simulados respecto a los obtenidos en las estaciones de monitoreo disponibles dentro del dominio de Potrerillos. Dado que no existen grandes diferencias entre los valores absolutos de BIAS y el MAE, se puede indicar que es una subestimación homogénea (Tabla 5-33).

Por otra parte, los valores de IOA presentados en la Tabla 5-33 indican que en la estación Cine Inca existe mayor correlación, en comparación con las demás estaciones. Al mismo tiempo, se puede identificar a esta como la estación con menor incertidumbre, por los valores de NMAE y NMSE.

**Tabla 5-33 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Potrerillos**

Estación	BIAS <sup>1</sup>	MAE <sup>2</sup>	NMAE <sup>3</sup>	RMSE <sup>4</sup>	NMSE <sup>5</sup>	IOA <sup>6</sup>	Distancia (m)
Doña Inés	-0,9399	0,9686	0,9174	2,411	2,2835	0,25	260
Cine Inca	-0,003	0,0045	0,8744	0,0084	1,6146	0,33	25.686
CAP	0,0136	0,0349	1,1545	0,0622	2,0542	0,16	2.995

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (root-mean-square deviation), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

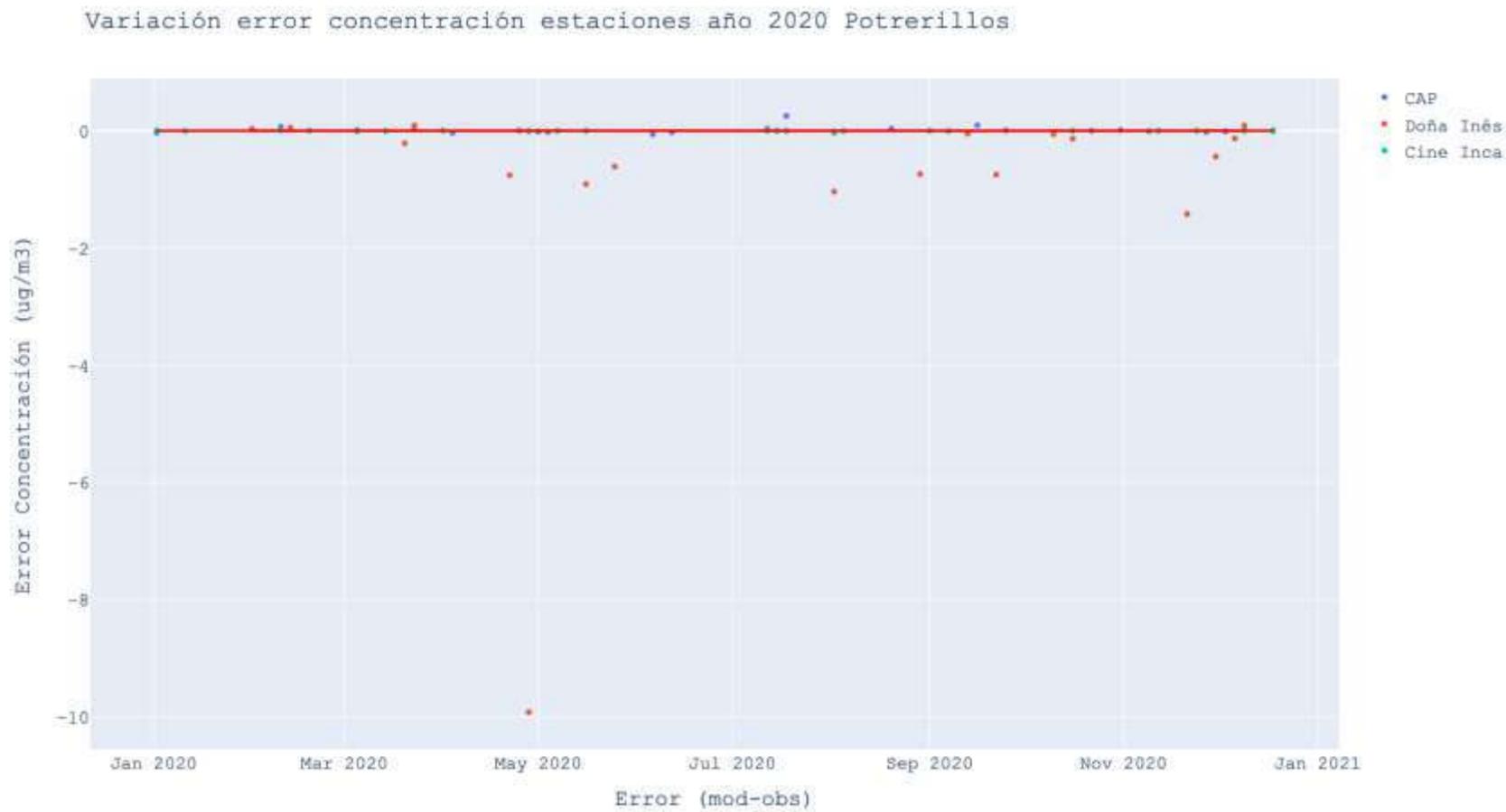
Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

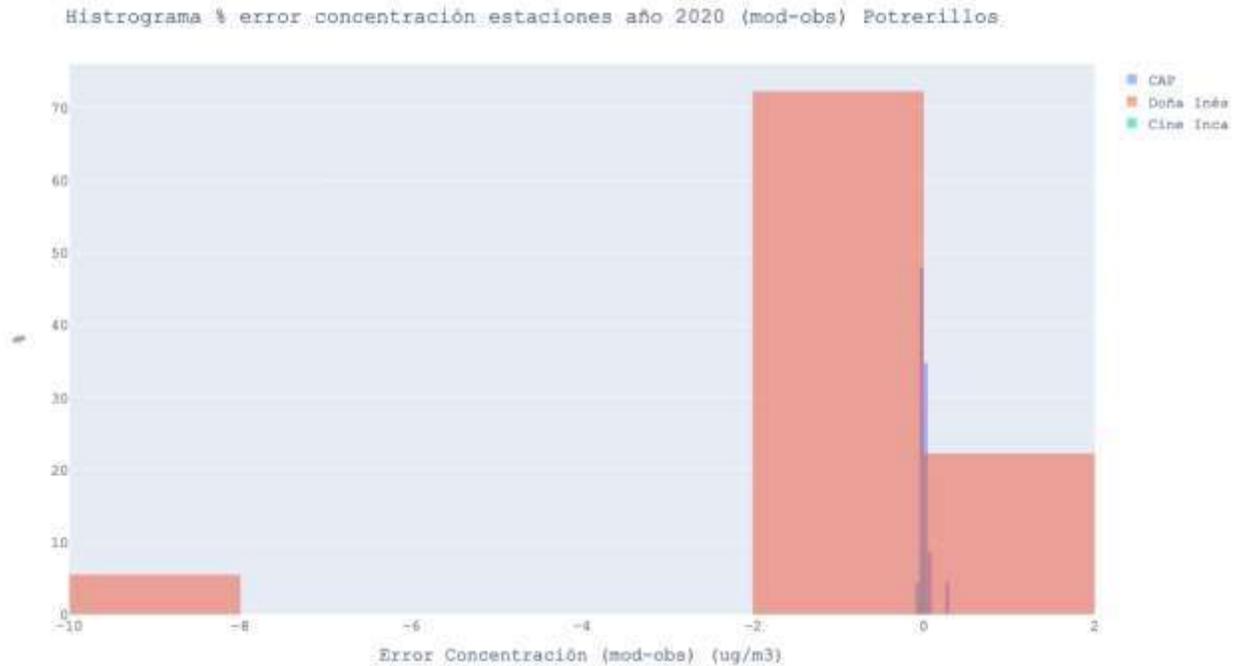
Fuente: Elaboración propia

En este dominio se replica el comportamiento entre los parámetros y la distancia, por lo que las estaciones más cercanas (Doña Inés en este caso) muestra mayor incertidumbre que las estaciones más alejadas. Por otro lado, si se analiza la distribución del error en intervalos y la frecuencia con la que ocurre cada uno de ellos de manera relativa, en tanto por ciento (Figura 5-19) cada una de las estaciones presenta una distribución de frecuencias relativamente simétrica centrada en su BIAS, mostrando nuevamente el sesgo sistemático. Desde este gráfico destaca Doña Inés, con mayor error.

Según el análisis meteorológico, específicamente las rosas de vientos, las estaciones CAP y Doña Inés conservan similitudes, como la predominancia del vector sur este, esto dado que ambas estaciones se ubican en puntos cercanos distanciadas por 2 km. Caso similar a las estaciones Cine Inca e Intelc, que conservan la predominancia del vector este noreste (ver Anexo de la Sección 10.3).



**Figura 5-17 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Potrerillos 2020**  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-18 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Potrerillos 2020**

Fuente: Elaboración propia

### Determinación relación emisión concentración

Como se indica en la Sección 5.1.5, se determinaron 2 estaciones representativas para este dominio de estudio en las localidades de Salvador y Potrerillos, correspondientes a las estaciones Cine Inca y CAP, respectivamente, como indica la Tabla 5-34.

**Tabla 5-34 Estación representativa por localidad – Fundición Potrerillos**

Fundición	Estación representativa	Localidad
Potrerillos	Estación Cine Inca	Salvador
	Estación CAP	Potrerillos

Fuente: Elaboración propia

**Paso 1:** Siguiendo la metodología indicada en la Sección 5.1.5, en primer lugar, se determinará la concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\overline{C_{O_i}}$ ) a través de la Ecuación 13 y los datos de la Tabla 5-35. Los datos de concentración observada ( $C_{O_i}$ ) fueron extraídos desde el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) y corresponde al promedio observado en el año 2020.

**Tabla 5-35 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Potrerillos**

Simbología	ITEM	Estación	
		Cine Inca	CAP
$Co_i$	Concentración observada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>1</sup>	0,0052	0,0303
$\beta_i$	Concentración o nivel basal ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>2</sup>	0,002	0,0055
$\overline{Co}_i$	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0032	0,0248

Nota 1: Información extraída desde Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) año 2020

 Nota 2: El *background* se estimó a partir de la metodología presentada en la Sección 5.1.6

Fuente: Elaboración propia

**Paso 2:** En esta etapa se determinará el factor de corrección para los receptores, correspondiente a las estaciones Coviefi e Incal. Para esto se utiliza la Ecuación 18 y los datos presentados en la Tabla 5-44.

**Tabla 5-36 Factor de corrección por receptor – Fundición Potrerillos**

Simbología	ITEM	Estación	
		Cine Inca	CAP
$\overline{Co}_i$	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0032	0,0248
$Cm_i$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0012	0,0655
$FC'_i$	Factor de corrección	0,38	2,64

Fuente: Elaboración propia

**Paso 3:** Luego, se determina el factor FEC expresado desde una función lineal que permita definir el nivel de concentración en un receptor particular de acuerdo con la contribución de las emisiones procedentes de cada fuente de emisión, según la Ecuación 12 (ver Tabla 5-37 y Tabla 5-38).

**Tabla 5-37 Factor *FEC* por fuente – Estación Cine Inca, Fundición Potrerillos**

Simbología	ITEM	Fuente	
		PAS	Fugitiva
$Cm_{ij}$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,00001	0,00120
$E_j$	Emisiones (ton As/año)	0,5459	50,5
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración	54.814,9	41.912,12

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-38 Factor *FEC* por fuente – Estación CAP, Fundición Potrerillos**

Simbología	ITEM	Fuente	
		PAS	Fugitiva
$Cm_{ij}$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,00026	0,06552
$E_j$	Emisiones (ton As/año)	0,5459	50,5
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton As·m <sup>3</sup> /μg·año)	2.109,56	770,76

Fuente: Elaboración propia

**Paso 4:** Finalmente, se calcula el factor  $FEC'$  a partir de la Ecuación 20. Los resultados se presentan en la Tabla 5-39 y Tabla 5-40.

**Tabla 5-39 Factor FEC corregido por fuente – Estación Cine Inca, Fundición Potrerillos**

Simbología	ITEM	Fuente	
		PAS	Fugitiva
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton As·m <sup>3</sup> /μg·año)	54.814,9	41.912,12
$FC'_i$	Factor de corrección	0,38	
$FEC'_{ij}$	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m <sup>3</sup> /μg·año)	20.810,15	15.911,68

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-40 Factor FEC corregido por fuente – Estación CAP, Fundición Potrerillos**

Simbología	ITEM	Fuente	
		PAS	Fugitiva
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton As·m <sup>3</sup> /μg·año)	2.109,56	770,76
$FC'_i$	Factor de corrección	2,64	
$FEC'_{ij}$	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m <sup>3</sup> /μg·año)	5.578,22	2.038,10

Fuente: Elaboración propia

Para la presente zona geográfica la función de relación emisión-concentración (FEC), quedaría del siguiente modo. Se agrega, que el procedimiento de cálculo anterior, se replica en el Anexo Digital I - Cálculos FEC por Dominio.

**Tabla 5-41 Relación FEC por receptor – Fundición Potrerillos**

Receptor	Localidad	Relación FEC	Etiqueta
Estación Cine Inca	Salvador	$C_{Salvador} = \frac{E_{PAS}}{20.810,15} + \frac{E_{FUGITIVA}}{15.911,68} + 0,002$	Ecuación 25
Estación CAP	Potrerillos	$C_{Potrerillos} = \frac{E_{PAS}}{5.578,22} + \frac{E_{Fugitiva}}{2.038,1} + 0,0055$	Ecuación 26

Fuente: Elaboración propia

#### 5.2.2.4 Fundición Hernán Videla Lira

Los resultados del análisis de las series temporales disponibles para el año 2020 muestran que existe una sobrestimación en los niveles de concentración simulados respecto a los obtenidos en las cuatro estaciones de monitoreo disponibles dentro del dominio de Hernán Videla Lira. Esta sobrestimación es homogénea y sistemática para cada estación, dado que el valor absoluto del BIAS y el MAE presentan diferencias muy pequeñas (Tabla 5-42), excepto en la estación Copiapó, donde se aprecian mayores diferencias.

Los valores de NMAE y NMSE de la Tabla 5-42, indican que la estación con menor incertidumbre es la estación Copiapó. Esta además, presenta menor dispersión de datos según el valor de RMSE y corresponde a la estación más alejada a las fuentes de emisión del dominio (distancia aproximada a 9 km). Por el contrario, la estación más cercana, correspondiente a la estación Paipote (distancia de 1 km), es la que presenta la mayor incertidumbre. Los valores de IOA en la a Tabla 5-42 indican que la estación con mejor correlación de datos corresponde también a la estación Copiapó.

**Tabla 5-42 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Hernán Videla Lira**

Estación	BIAS <sup>1</sup>	MAE <sup>2</sup>	NMAE <sup>3</sup>	RMSE <sup>4</sup>	NMSE <sup>5</sup>	IOA <sup>6</sup>	Distancia (m)
<b>Copiapó</b>	0,009	0,0251	1,3399	0,0357	1,9057	0,35	9.673
<b>San Fernando</b>	0,157	0,1595	6,6624	0,2425	10,1256	0,22	4.961
<b>Tierra Amarilla</b>	0,1101	0,1222	3,5317	0,1638	4,7329	0,14	6.396
<b>Paipote</b>	0,421	0,4388	8,0298	0,8893	16,2733	0,05	1.510

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (root-mean-square deviation), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

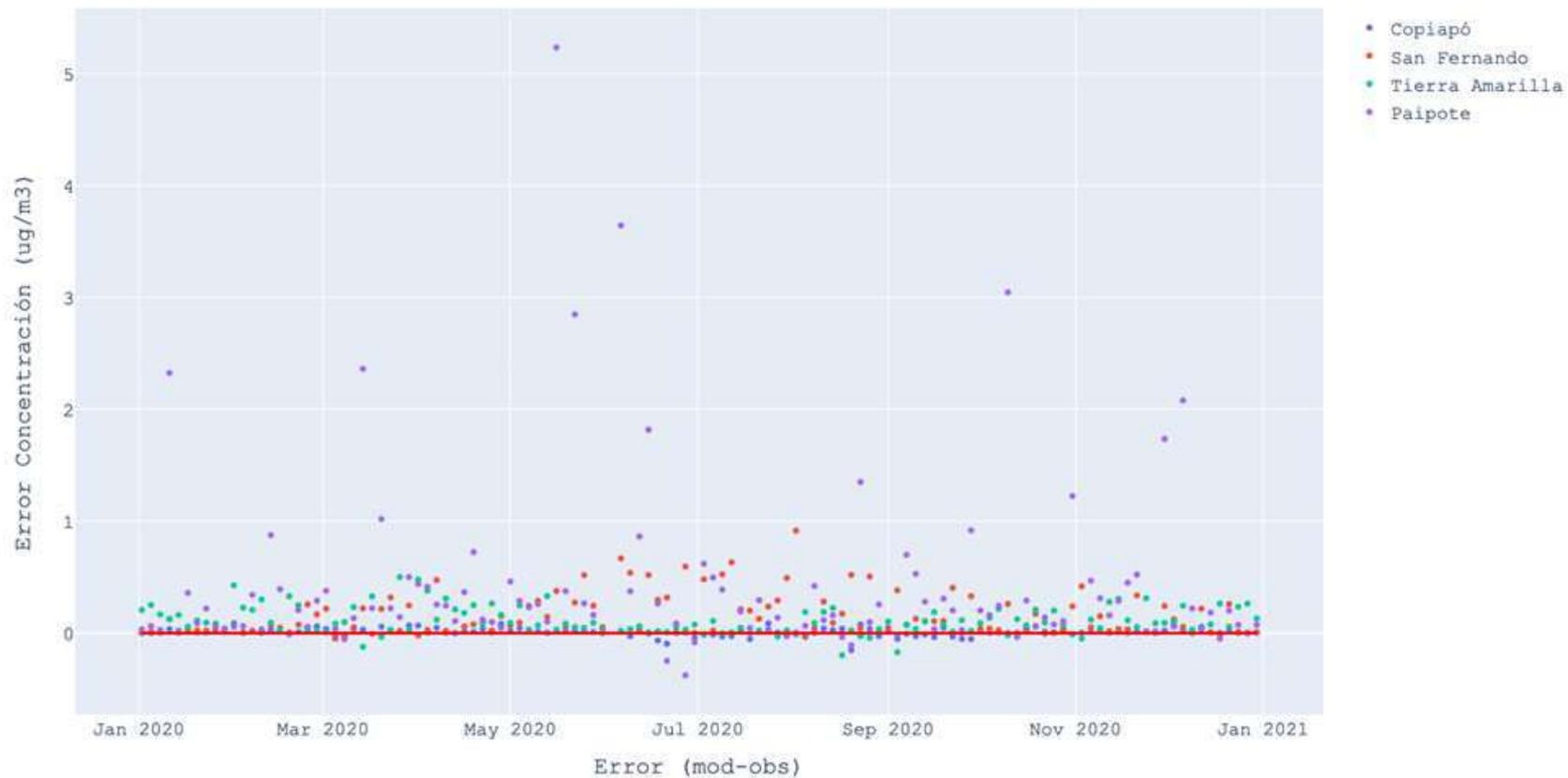
Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

Fuente: Elaboración propia

Si se analiza la distribución del error en intervalos y la frecuencia con la que ocurre cada uno de ellos de manera relativa, en tanto por ciento (Figura 5-20) todas las estaciones presentan una distribución de frecuencias relativamente simétrica centrada en su BIAS, mostrando nuevamente el sesgo sistemático en la sobrestimación de la concentración.

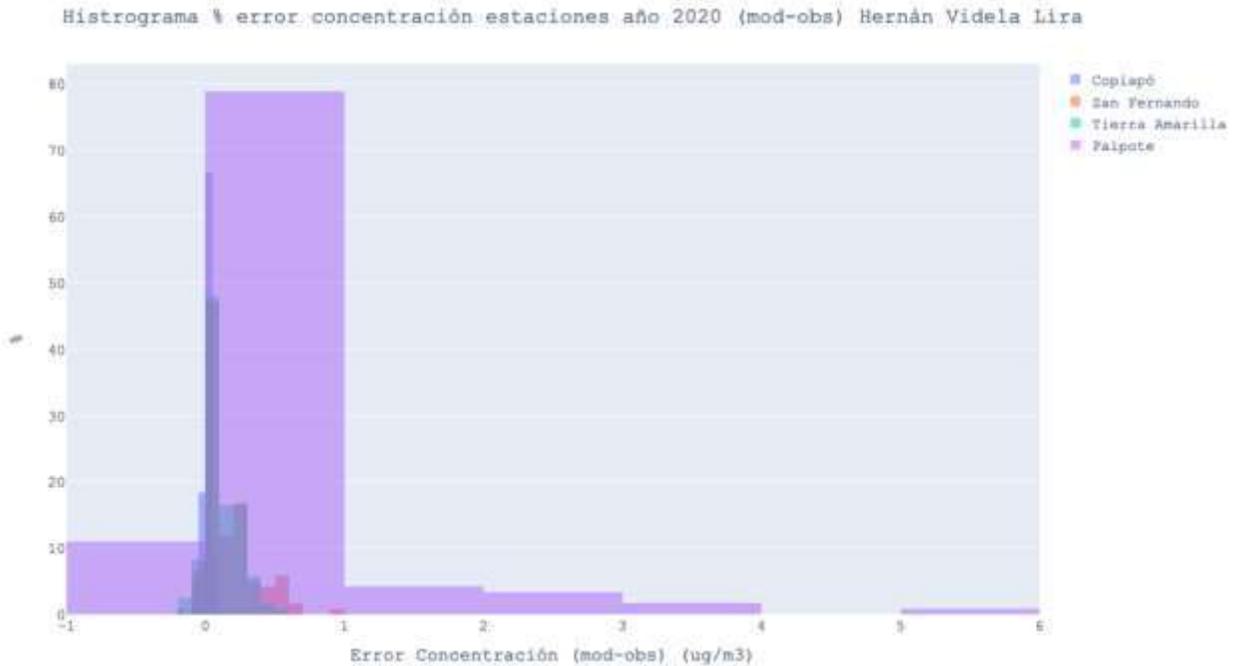
Por otro lado, si se analizan las rosas de viento (ver Anexo de la Sección 10.3), se puede apreciar que se conserva el vector predominante en las estaciones Paipote, Copiapó y San Fernando, correspondiente al vector noroeste. Del grupo de estudio se diferencia la estación Tierra Amarilla, que se encuentra en el lado sur, con respecto a las fuentes de emisión y cuyo vector predominante proviene del norte noreste.

Variación error concentración estaciones año 2020 Hernán Videla Lira



**Figura 5-19 Evolución del error de la concentración modelada versus observada - Fundición Hernán Videla Lira 2020**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-20 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Hernán Videla Lira 2020.**

Fuente: Elaboración propia

### Determinación relación emisión concentración

Como se indica en la Sección 5.1.5, se determinaron 2 estaciones representativas para este dominio de estudio en las localidades de Copiapó y Tierra Amarilla, correspondientes a las estaciones Paipote y Tierra Amarilla, respectivamente, como indica la Tabla 5-43.

**Tabla 5-43 Estación representativa por localidad – Fundición Hernán Videla Lira**

Fundición	Estación representativa	Localidad
Hernán Videla Lira	Estación Paipote	Copiapó
	Estación Tierra Amarilla	Tierra Amarilla

Fuente: Elaboración propia

**Paso 1:** Siguiendo la metodología indicada en la Sección 5.1.5, en primer lugar se determinará la concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\overline{C_{O_i}}$ ) a través de la Ecuación 13 y los datos de la Tabla 5-44. Los datos de concentración observada ( $C_{O_i}$ ) fueron extraídos desde el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) y corresponde al promedio observado en el año 2020.

**Tabla 5-44 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Hernán Videla Lira**

Simbología	ITEM	Estación	
		Paipote	Tierra Amarilla
$C_{o_i}$	Concentración observada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>1</sup>	0,0542	0,0344
$\beta_i$	Concentración o nivel basal ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>2</sup>	0,0017	0,0028
$\overline{C}_{o_i}$	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0525	0,0316

Nota 1: Información extraída desde Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) año 2020

Nota 2: El *background* se estimó a partir de la metodología presentada en la Sección 5.1.6

Fuente: Elaboración propia

**Paso 2:** En esta etapa se determinará el factor de corrección para los receptores, correspondiente a las estaciones Paipote y Tierra Amarilla. Para esto se utiliza la Ecuación 18 y los datos presentados en la Tabla 5-45.

**Tabla 5-45 Factor de corrección por receptor – Fundición Hernán Videla Lira**

Simbología	ITEM	Estación	
		Paipote	Tierra Amarilla
$\overline{C}_{o_i}$	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0525	0,0316
$C_{m_i}$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,4554	0,1452
$FC'_i$	Factor de corrección	8,67	4,59

Fuente: Elaboración propia

**Paso 3:** Luego, se determina el factor *FEC* expresado desde una función lineal que permita definir el nivel de concentración en un receptor particular de acuerdo con la contribución de las emisiones procedentes de cada fuente de emisión, según la Ecuación 12 (ver Tabla 5-46 y Tabla 5-47).

**Tabla 5-46 Factor *FEC* por fuente – Estación Paipote, Fundición Hernán Videla Lira**

Simbología	ITEM	Fuente		
		HLE	PTGC	Fugitiva
$C_{m_{ij}}$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,001	0,0001	0,4543
$E_j$	Emisiones (ton As/año)	0,344	0,0324	18,27
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración	342,21	309,31	40,22

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-47 Factor *FEC* por fuente – Estación Tierra Amarilla, Fundición Hernán Videla Lira**

Simbología	ITEM	Fuente		
		HLE	PTGC	Fugitiva
$C_{m_{ij}}$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0023	0,0002	0,1427
$E_j$	Emisiones (ton As/año)	0,3440	0,0324	18,27
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton As·m <sup>3</sup> / $\mu\text{g}$ ·año)	151,18	168,9	128,04

Fuente: Elaboración propia

**Paso 4:** Finalmente, se calcula el factor  $FEC'$  a partir de la Ecuación 20 y los valores  $FC$  y  $FEC$  indicados anteriormente. Los resultados se presentan en la Tabla 5-48 y Tabla 5-49.

**Tabla 5-48 Factor FEC corregido por fuente – Estación Paipote, Fundición Hernán Videla Lira**

Simbología	ITEM	Fuente		
		HLE	PTGC	Fugitiva
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton As·m <sup>3</sup> /μg·año)	342,21	309,31	40,22
$FC'_i$	Factor de corrección	8,67		
$FEC'_{ij}$	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m <sup>3</sup> /μg·año)	2.968,47	2.683,08	348,85

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-49 Factor FEC corregido por fuente – Estación Tierra Amarilla, Fundición Hernán Videla Lira**

Simbología	ITEM	Fuente		
		HLE	PTGC	Fugitiva
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton As·m <sup>3</sup> /μg·año)	151,18	168,9	128,04
$FC'_i$	Factor de corrección	4,59		
$FEC'_{ij}$	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m <sup>3</sup> /μg·año)	694,44	775,84	588,16

Fuente: Elaboración propia

Para la presente zona geográfica la función de relación emisión-concentración ( $FEC$ ), quedaría del siguiente modo. Se agrega, que el procedimiento de cálculo anterior, se replica en el Anexo Digital I - Cálculos FEC por Dominio

**Tabla 5-50 Relación FEC por receptor – Fundición Hernán Videla Lira**

Receptor	Localidad	Relación FEC	Etiqueta
Estación Paipote	Copiapó	$C_{Copiapó} = \frac{E_{HLE}}{2.968,47} + \frac{E_{PTGC}}{2.683,08} + \frac{E_{FUGITIVA}}{348,85} + 0,0017$	Ecuación 27
Estación Tierra Amarilla	Tierra Amarilla	$C_{Tierra Amarilla} = \frac{E_{HLE}}{694,44} + \frac{E_{PTGC}}{775,84} + \frac{E_{FUGITIVA}}{588,16} + 0,0028$	Ecuación 28

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2.5 Fundición Ventanas

Los resultados del análisis de las series temporales disponibles para el año 2020 (ver Anexo de la Sección 10.8) muestran que sistemáticamente existe una sobrestimación en los niveles de concentración simulados respecto a los obtenidos en 5 estaciones de monitoreo disponibles dentro del dominio de Ventanas. Sólo para la estación Quintero Centro, se presenta una subestimación. En algunos casos se aprecia que se tienen valores de BIAS y MAE similares, indicando una correlación sistemática, estas son las estaciones La Greda, Quintero y Ventanas.

Los valores de NMAE y NMSE de la Tabla 5-51 indican que la estación con mayor incertidumbre se corresponde con la estación la Greda, con un orden de magnitud mayor en comparación con las demás estaciones. Al mismo tiempo, su valor de RMSE indican una alta dispersión de datos y el IOA una baja correlación. Esta corresponde a la estación más cercana a las fuentes de emisión, ubicada a una distancia de 2 km.

Por otra parte, la estación con menor incertidumbre según los valores de NMAE y NMSE de la Tabla 5-51 es la estación Quintero Centro, está también presenta una baja dispersión de los datos.

La Tabla 5-51 muestra la variación de los parámetros normalizados según la distancia, en donde se aprecia que las estaciones más cercanas tienden a presentar mayor BIAS e incertidumbre dentro de la zona de estudio, lo cual es esperable para puntos cercanos a las fuentes de emisión, donde pequeñas diferencias, ya sea en la modelación meteorológica o en la estimación de las emisiones, se traduce en mayores diferencias en los resultados de concentración en datos modelados.

**Tabla 5-51 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Ventanas**

Estación	BIAS <sup>1</sup>	MAE <sup>2</sup>	NMAE <sup>3</sup>	RMSE <sup>4</sup>	NMSE <sup>5</sup>	IOA <sup>6</sup>	Distancia (m)
La Greda	0,4368	0,4373	31,7944	0,7081	51,4812	0,03	1.694
Los Maitenes	0,0825	0,1054	3,5361	0,1554	5,2127	0,12	2.483
Puchuncaví	0,0081	0,0199	1,4759	0,0285	2,1096	0,25	8.368
Quintero	0,0062	0,067	1,3285	0,1024	2,0289	0,46	5.224
Quintero Centro	-0,013	0,063	1,1992	0,0825	1,57	0,29	5.575
Sur	0,0411	0,0675	3,0706	0,0938	4,2647	0,1	4.289
Valle Alegre	0,0159	0,026	2,2245	0,0396	3,3787	0,12	6.518
Ventanas	0,1476	0,1483	10,4879	0,2269	16,05	0,1	2.283

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (root-mean-square deviation), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

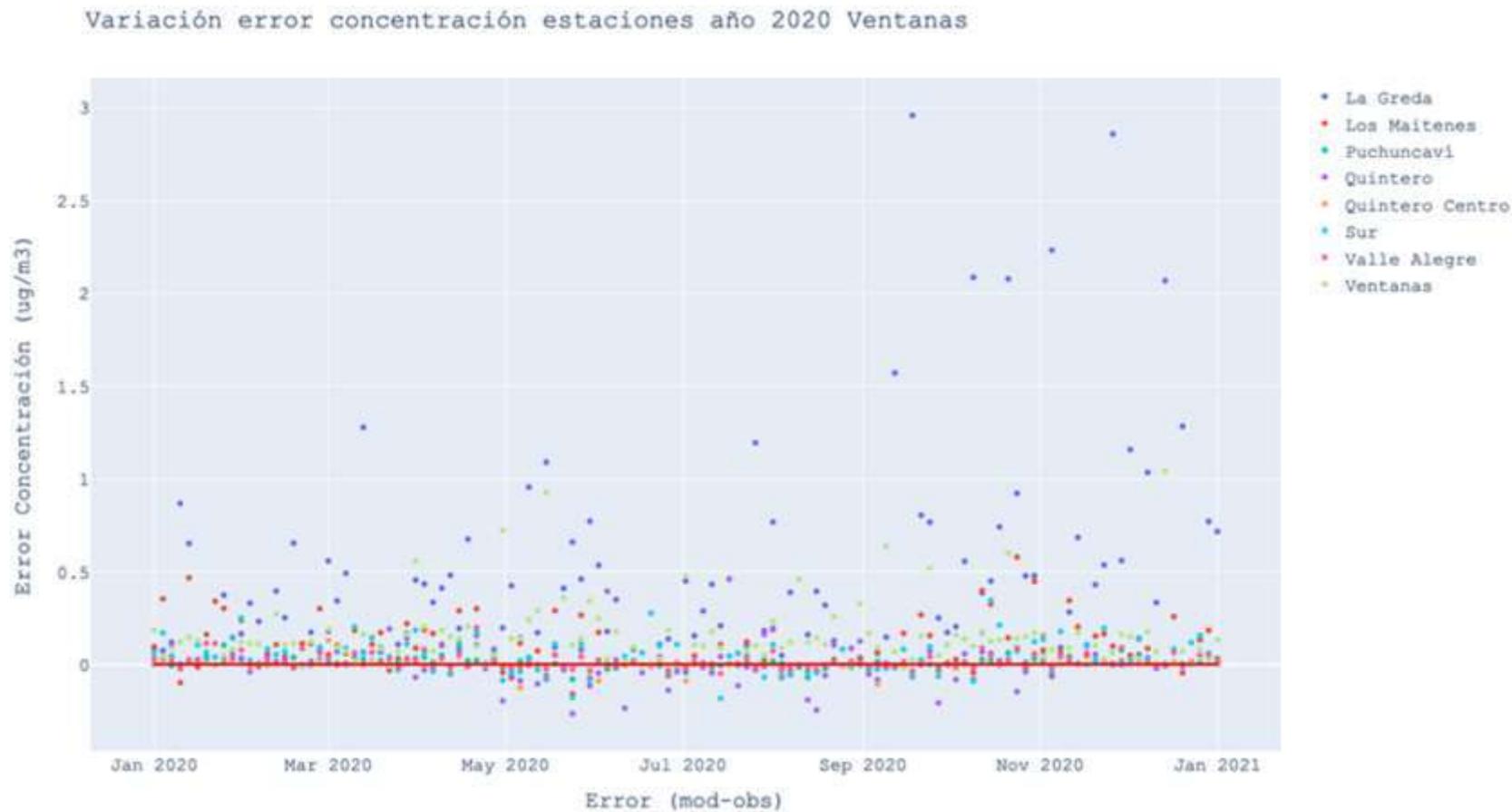
Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

Fuente: Elaboración propia

Si se analiza la distribución del error en intervalos y la frecuencia con la que ocurre cada uno de ellos de manera relativa, en tanto por ciento (Figura 5-22) la mayoría las estaciones presentan una distribución de frecuencias relativamente simétrica centrada en su BIAS, mostrando nuevamente el sesgo sistemático de la concentración.

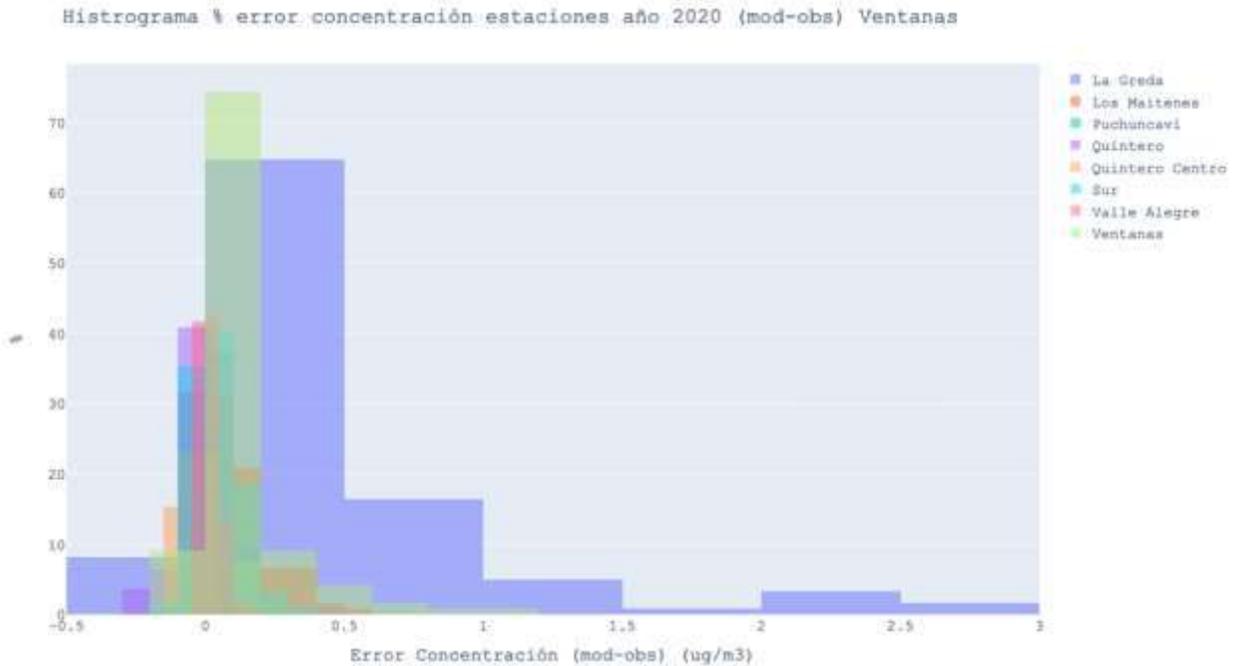
Con respecto a las rosas de viento (ver Anexo de la Sección 10.3), las estaciones Quintero y Quintero Centro, ubicadas a distancia de 2 km aproximadamente, conservan la predominancia del vector sur suroeste, al mismo tiempo ambas estaciones presentan valores NMAE y NMSE muy similares, por lo que tienen similar incertidumbre. Por otro lado, las estaciones La Greda y Ventanas separadas por 1 km, conservan la predominancia de los vectores suroeste y oeste suroeste, sin embargo, la estación Ventanas se ubica en una zona más abierta en comparación con la estación urbana de La Greda, por lo que difieren en algunos de sus parámetros de

incertidumbre, presentando ciertas similitudes en el orden de datos, como el valor NMAE y NMSE, con alta incertidumbre.



**Figura 5-21 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Ventanas 2020**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-22 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Ventanas 2020**

Fuente: Elaboración propia

### Determinación relación emisión concentración

Como se indica en la Sección 5.1.5, se determinaron 3 estaciones representativas para este dominio de estudio en las localidades de Quintero, Puchuncaví y Ventanas, correspondientes a las estaciones del mismo nombre, como indica la Tabla 5-52.

**Tabla 5-52 Estación representativa por localidad – Fundición Ventanas**

Fundición	Estación representativa	Localidad
Ventanas	Estación Quintero	Quintero
	Estación Puchuncaví	Puchuncaví
	Estación Ventanas	Ventanas

Fuente: Elaboración propia

**Paso 1:** Siguiendo la metodología indicada en la Sección 5.1.5, en primer lugar, se determinará la concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\overline{C_{O_i}}$ ) a través de la Ecuación 13 y los datos de la Tabla 5-53. Los datos de concentración observada ( $C_{O_i}$ ) fueron extraídos desde el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) y corresponde al promedio observado en el año 2020.

**Tabla 5-53 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Ventanas**

Simbología	ITEM	Estación		
		Puchuncaví	Quintero	Ventanas
$Co_i$	Concentración observada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>1</sup>	0,0136	0,0504	0,0142
$\beta_i$	Concentración o nivel basal ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>2</sup>	0,0047	0,0047	0,0024
$\overline{Co}_i$	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0089	0,0457	0,0118

Nota 1: Información extraída desde Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) año 2020

Nota 2: El *background* se estimó a partir de la metodología presentada en la Sección 5.1.6

Fuente: Elaboración propia

**Paso 2:** En esta etapa se determinará el factor de corrección para los receptores, correspondiente a las estaciones Puchuncaví, Quintero y Ventanas. Para esto se utiliza la Ecuación 18 y los datos presentados en la Tabla 5-54.

**Tabla 5-54 Factor de corrección por receptor – Fundición Ventanas**

Simbología	ITEM	Estación		
		Puchuncaví	Quintero	Ventanas
$\overline{Co}_i$	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0089	0,0457	0,0118
$Cm_i$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0236	0,0513	0,1610
$FC'_i$	Factor de corrección	2,64	1,12	13,64

Fuente: Elaboración propia

**Paso 3:** Luego, se determina el factor *FEC* expresado desde una función lineal que permita definir el nivel de concentración en un receptor particular de acuerdo con la contribución de las emisiones procedentes de cada fuente de emisión, según la Ecuación 12 (ver Tabla 5-55, Tabla 5-56 y Tabla 5-57).

**Tabla 5-55 Factor *FEC* por fuente – Estación Puchuncaví, Fundición Ventanas**

Simbología	ITEM	Fuente		
		HTE	PAS	Fugitiva
$Cm_{ij}$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,00004	0,0001	0,0234
$E_j$	Emisiones (ton As/año)	0,0936	0,2240	50
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración	2.115,07	1.693,54	2.139,03

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-56 Factor *FEC* por fuente – Estación Quintero, Fundición Ventanas**

Simbología	ITEM	Fuente		
		HTE	PAS	Fugitiva
$Cm_{ij}$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,00004	0,0001	0,0512
$E_j$	Emisiones (ton As/año)	0,0936	0,2240	50
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton As·m <sup>3</sup> / $\mu\text{g}$ ·año)	2.233,62	1.923,8	977,10

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-57 Factor FEC por fuente – Estación Ventanas, Fundición Ventanas**

Simbología	ITEM	Fuente		
		HTE	PAS	Fugitiva
$C_{m_{ij}}$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0005	0,0015	0,1590
$E_j$	Emisiones (ton As/año)	0,0936	0,2240	50
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton As·m <sup>3</sup> / $\mu\text{g}$ ·año)	196,29	148,21	314,44

Fuente: Elaboración propia

**Paso 4:** Finalmente, se calcula el factor  $FEC'$  a partir de la Ecuación 20 y los valores  $FC$  y  $FEC$  indicados anteriormente. Los resultados se presentan en la Tabla 5-58, Tabla 5-59 y Tabla 5-60.

**Tabla 5-58 Factor FEC corregido por fuente – Estación Puchuncaví, Fundición Ventanas**

Simbología	ITEM	Fuente		
		HTE	PAS	Fugitiva
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton As·m <sup>3</sup> / $\mu\text{g}$ ·año)	2.115,07	1.693,54	2.139,03
$FC'_i$	Factor de corrección	2,64		
$FEC'_{ij}$	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m <sup>3</sup> / $\mu\text{g}$ ·año)	5.597	4.481,52	5.660,4

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-59 Factor FEC corregido por fuente – Estación Quintero, Fundición Ventanas**

Simbología	ITEM	Fuente		
		HTE	PAS	Fugitiva
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton As·m <sup>3</sup> / $\mu\text{g}$ ·año)	2.233,62	1.923,8	977,10
$FC'_i$	Factor de corrección	1,12		
$FEC'_{ij}$	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m <sup>3</sup> / $\mu\text{g}$ ·año)	2.506,6	2.158,91	1.096,52

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-60 Factor FEC corregido por fuente – Estación Ventanas, Fundición Ventanas**

Simbología	ITEM	Fuente		
		HTE	PAS	Fugitiva
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton As·m <sup>3</sup> / $\mu\text{g}$ ·año)	196,29	148,21	314,44
$FC'_i$	Factor de corrección	13,64		
$FEC'_{ij}$	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m <sup>3</sup> / $\mu\text{g}$ ·año)	2.678,19	2.022,16	4.290,27

Fuente: Elaboración propia

Para la presente zona geográfica la función de relación emisión-concentración (FEC), quedaría del siguiente modo. Se agrega, que el procedimiento de cálculo anterior, se replica en el Anexo Digital I - Cálculos FEC por Dominio

**Tabla 5-61 Relación FEC por receptor – Fundición Ventanas**

Receptor	Localidad	Relación FEC	Etiqueta
Estación Puchuncaví	Puchuncaví	$C_{Puchuncaví} = \frac{E_{HTE}}{5.597} + \frac{E_{PAS}}{4.481,52} + \frac{E_{FUGITIVA}}{5.660,4} + 0,0047$	Ecuación 29
Estación Quintero	Quintero	$C_{Quintero} = \frac{E_{HTE}}{2.506,6} + \frac{E_{PAS}}{2.158,91} + \frac{E_{FUGITIVA}}{1.096,52} + 0,0047$	Ecuación 30
Estación Ventanas	Ventanas	$C_{Ventanas} = \frac{E_{HTE}}{2.678,19} + \frac{E_{PAS}}{2.022,16} + \frac{E_{FUGITIVA}}{4.290,27} + 0,0024$	Ecuación 31

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2.6 Fundición Chagres

A diferencia de otros dominios en esta ubicación solamente se reportaron valores mensuales de concentraciones en las estaciones, por lo tanto, solamente hay doce valores anuales de observación. Los resultados del análisis de las series temporales disponibles para el año 2020 muestran que para la estación Lo Campo existe una subestimación en los niveles de concentración simulados respecto a los obtenidos mientras que para la estación Catemu existe una sobrestimación de los datos modelados.

Para la estación Lo Campo, esta subestimación es prácticamente homogénea dado que el valor absoluto del BIAS y el MAE presentan diferencias muy pequeñas (Tabla 5-62), casi similar a la estación Catemu con sobrestimación homogénea. Según los valores de NMAE y NMSE de la Tabla 5-62, la estación con mayor incertidumbre es la estación Catemu, superando en un orden a la estación de Lo Campo. También se indica, que Catemu presenta alta dispersión de por su valor RMSE y una deficiente correlación por el valor indicado en el parámetro IOA. La estación Lo Campo, por otro lado, presenta la menor incertidumbre, baja dispersión y mejor correlación, correspondiendo a la estación más alejada de las fuentes de emisión del dominio de estudio a una distancia aproximada de 5 km.

Si se analiza la distribución del error en intervalos y la frecuencia con la que ocurre cada uno de ellos de manera relativa, en tanto por ciento (Figura 5-24) ambas estaciones presentan una distribución de frecuencias relativamente simétrica centrada en su BIAS, mostrando nuevamente un sesgo sistemático.

Ambas estaciones se ubican en zonas diferentes con respecto a las fuentes de emisión, la estación Catemu se encuentra en el lado norte, mientras que la estación Lo Campo se ubica en el este. A pesar de esto, ambas rosas de viento conservan ciertas similitudes, como la presencia de vientos de dirección este sur-este y sureste, aunque estos no son los vectores predominantes.

**Tabla 5-62 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Chagres**

Estación	BIAS <sup>1</sup>	MAE <sup>2</sup>	NMAE <sup>3</sup>	RMSE <sup>4</sup>	NMSE <sup>5</sup>	IOA <sup>6</sup>	Distancia (m)
<b>Catemu</b>	0,1138	0,1151	11,184	0,2034	19,7552	0,04	2.738
<b>Lo Campo</b>	-0,0081	0,0086	0,5462	0,0119	0,7546	0,54	5.440

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

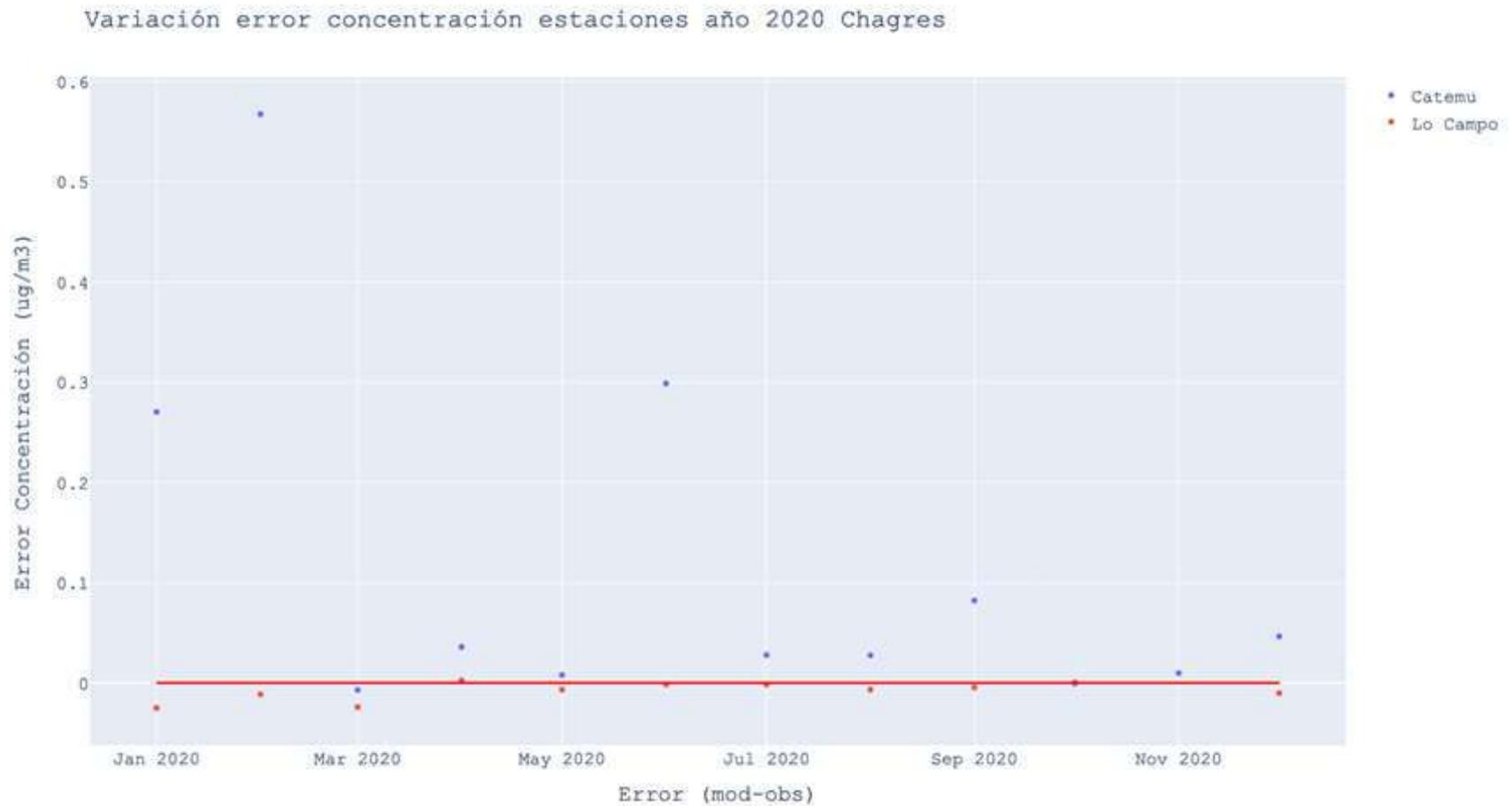
Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (root-mean-square deviation), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

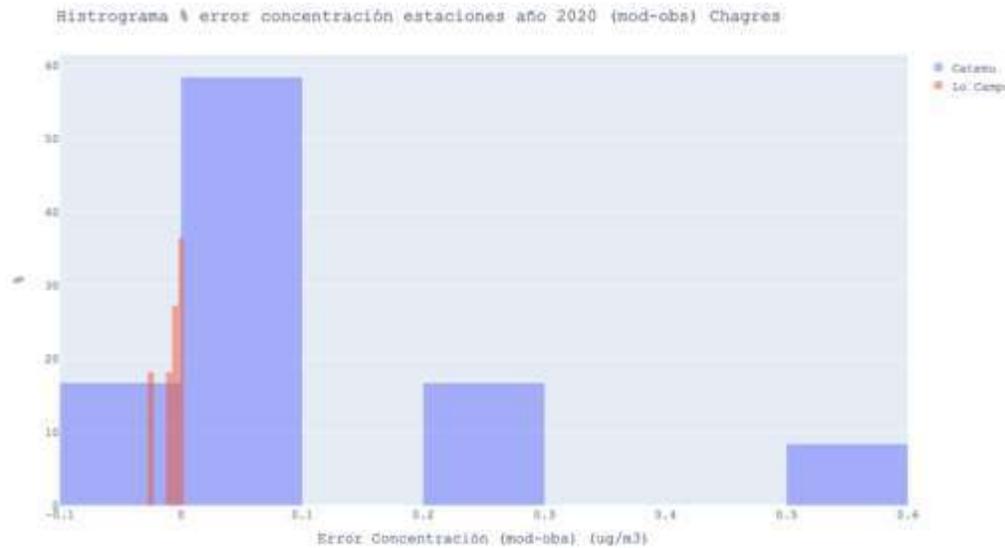
Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-23 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Chagres 2020**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-24 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Chagres 2020**

Fuente: Elaboración propia

### Determinación relación emisión concentración

Como se indica en la Sección 5.1.5 se determinaron 3 estaciones representativas, 2 de las cuales corresponden a puntos de interés, es decir, centros poblados sin estación de monitoreo. Para este dominio de estudio se abarcan las localidades de Catemu, Panquehue y Llayllay, , como indica la Tabla 5-63.

**Tabla 5-63 Estación representativa por localidad – Fundición Chagres**

Fundición	Estación representativa	Localidad
Chagres	Estación Lo Campo	Catemu
	-	Panquehue
	-	Llayllay

Fuente: Elaboración propia

**Paso 1:** Siguiendo la metodología indicada en la Sección 5.1.5, en primer lugar, se determinará la concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\overline{C_{O_i}}$ ) a través de la Ecuación 13 y los datos de la Tabla 5-64. Los datos de concentración observada ( $C_{O_i}$ ) fueron extraídos desde el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) y corresponde al promedio observado en el año 2020. Dado que los puntos de interés no cuentan con datos de concentración observada ( $C_{O_i}$ ), se considerarán un nivel basal ( $\beta_i$ ) equivalente al de la Estación Lo Campo.

**Tabla 5-64 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Chagres**

Simbología	ITEM	Estación	Punto de interés	Punto de interés
		Lo Campo	Llayllay	Panquehue
$C_{O_i}$	Concentración observada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>1</sup>	0,0158	-	-
$\beta_i$	Concentración o nivel basal ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>2</sup>	0,0094	0,0094	0,0094
$\overline{C_{O_i}}$	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0064	-	-

Nota 1: Información extraída desde Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) año 2020

Nota 2: El nivel basal se estimó a partir de la metodología presentada en la Sección 5.1.6

Fuente: Elaboración propia

**Paso 2:** En esta etapa se determinará el factor de corrección para los receptores, correspondiente a la estación Lo Campo. Para esto se utiliza la Ecuación 18 y los datos presentados en la Tabla 5-65. Para los puntos de interés, se asume el factor de corrección de Lo Campo.

**Tabla 5-65 Factor de corrección por receptor – Fundición Chagres**

Simbología	ITEM	Estación	Punto de interés	
		Lo Campo	Llayllay	Panquehue
$\overline{C_{O_i}}$	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0064	-	-
$C_{m_i}$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0097	0,0043	0,0077
$FC'_i$	Factor de corrección	1,52	1,52	1,52

Fuente: Elaboración propia

**Paso 3:** Luego, se determina el factor FEC expresado desde una función lineal que permita definir el nivel de concentración en un receptor particular de acuerdo con la contribución de las emisiones procedentes de cada fuente de emisión, según la Ecuación 12 (ver Tabla 5-66, Tabla 5-67 y Tabla 5-68).

**Tabla 5-66 Factor FEC por fuente – Estación Lo Campo, Fundición Chagres**

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS	Horno	Fugitiva
$C_{m_{ij}}$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0001	0,0008	0,0089
$E_j$	Emisiones (ton As/año)	0,0607	0,3636	8,22
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración	829,64	477,01	926,41

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-67 Factor FEC por fuente – Punto de interés Llayllay, Fundición Chagres**

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS	Horno	Fugitiva
$C_{m_{ij}}$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,00003	0,0003	0,004
$E_j$	Emisiones (ton As/año)	0,0607	0,3636	8,22
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración	1.779,16	1.202,59	2.074,19

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-68 Factor FEC por fuente – Punto de interés Panquehue, Fundición Chagres**

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS	Horno	Fugitiva
$Cm_{ij}$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0002	0,0010	0,0065
$E_j$	Emisiones (ton As/año)	0,0607	0,3636	8,22
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración	394,18	346,53	1.266,32

Fuente: Elaboración propia

**Paso 4:** Finalmente, se calcula el factor  $FEC'$  a partir de la Ecuación 20 y los valores FC y FEC indicados anteriormente. Los resultados se presentan en la Tabla 5-69.

**Tabla 5-69 Factor FEC corregido por fuente – Estación Lo Campo, Fundición Chagres**

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS	Horno	Fugitiva
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton $\text{As}\cdot\text{m}^3/\mu\text{g}\cdot\text{año}$ )	829,64	477,01	926,41
$FC'_i$	Factor de corrección	1,52		
$FEC'_{ij}$	Factor emisión-concentración corregido (ton $\text{As}\cdot\text{m}^3/\mu\text{g}\cdot\text{año}$ )	1.258,51	723,59	1.405,30

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-70 Factor FEC corregido por fuente – Punto de interés Llayllay, Fundición Chagres**

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS	Horno	Fugitiva
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton $\text{As}\cdot\text{m}^3/\mu\text{g}\cdot\text{año}$ )	1.779,16	1.202,59	2.074,19
$FC'_i$	Factor de corrección	1,52		
$FEC'_{ij}$	Factor emisión-concentración corregido (ton $\text{As}\cdot\text{m}^3/\mu\text{g}\cdot\text{año}$ )	2.698,86	1.824,25	3.146,41

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-71 Factor FEC corregido por fuente – Punto de interés Panquehue, Fundición Chagres**

Simbología	ITEM	Fuente		
		PAS	Horno	Fugitiva
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton $\text{As}\cdot\text{m}^3/\mu\text{g}\cdot\text{año}$ )	394,18	346,53	1.266,32
$FC'_i$	Factor de corrección	1,52		
$FEC'_{ij}$	Factor emisión-concentración corregido (ton $\text{As}\cdot\text{m}^3/\mu\text{g}\cdot\text{año}$ )	597,94	525,66	1.920,92

Fuente: Elaboración propia

Para la presente zona geográfica la función de relación emisión-concentración (FEC), quedaría del siguiente modo, donde además se considera el mismo nivel basal ( $\beta_i$ ) para los puntos de interés. Se agrega, que el procedimiento de cálculo anterior, se replica en el Anexo Digital I - Cálculos FEC por Dominio.

**Tabla 5-72 Relación FEC por receptor – Fundición Chagres**

Receptor	Localidad	Relación FEC	Etiqueta
Estación Lo Campo	Lo Campo	$C_{Lo\ Campo} = \frac{E_{PAS}}{1.258,51} + \frac{E_{HORNO}}{723,59} + \frac{E_{FUGITIVA}}{1.405,3} + 0,0094$	Ecuación 32
Punto de interés Llayllay	Llayllay	$C_{Llayllay} = \frac{E_{PAS}}{2.698,86} + \frac{E_{HORNO}}{1.824,25} + \frac{E_{FUGITIVA}}{3.146,41} + 0,0094$	Ecuación 33
Punto de interés Panquehue	Panquehue	$C_{Panquehue} = \frac{E_{PAS}}{597,94} + \frac{E_{HORNO}}{525,66} + \frac{E_{FUGITIVA}}{1.920,92} + 0,0094$	Ecuación 34

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2.7 Fundición Caletones

Los resultados del análisis de las series temporales disponibles para el año 2020 muestran que existe una sobrestimación en los niveles de concentración simulados respecto a los obtenidos en 2 estaciones de las 3 disponibles dentro del dominio de Caletones. Sólo la estación Sewell presenta subestimación en los resultados.

Esta sobrestimación es prácticamente homogénea para cada una de las estaciones dado que el valor absoluto del BIAS y el MAE presentan diferencias muy pequeñas (Tabla 5-73).

Según los parámetros indicados en la Tabla 5-73 la estación con menor incertidumbre es la estación Sewell (con referencia en los valores de NMAE y NMSE). Además, presenta menos dispersión de datos (según el valor RMSE) y una mayor correlación (según valor IOA). A diferencia de casos anteriores, esta estación corresponde a la más cercana a las fuentes de emisión, sin embargo, esta distancia es de aproximadamente 7 kilómetros, por lo tanto, se puede definir como un punto de referencia alejado.

Si se analiza la distribución del error en intervalos y la frecuencia con la que ocurre cada uno de ellos de manera relativa, en tanto por ciento (Figura 5-26) todas las estaciones presentan una distribución de frecuencias relativamente simétrica centrada en su BIAS, mostrando nuevamente el sesgo sistemático de la concentración.

A pesar de que las estaciones Coya Club y Población tengan ubicaciones cercanas, separadas por 1 km, la configuración de las rosas de vientos difiere, coincidiendo solamente en la presencia de vientos de dirección oeste. Esto podría deberse a que la estación Coya Población corresponde a una estación urbana. La rosa de vientos de la estación Sewell en cambio, coincide en la presencia del vector norte con la estación Coya Club, a pesar de que esta estación se ubica en un punto más alejado con respecto a las demás estaciones. En general, las estaciones de Coya son las que indican mayor incertidumbre según los valores de NMAE y NMSE.

**Tabla 5-73 Estadísticos análisis datos modelados versus observados concentración de arsénico – Fundición Caletones**

Estación	BIAS <sup>1</sup>	MAE <sup>2</sup>	NMAE <sup>3</sup>	RMSE <sup>4</sup>	NMSE <sup>5</sup>	IOA <sup>6</sup>	Distancia (m)
<b>Coya Club</b>	0,1389	0,1393	13,447	0,1728	16,6787	0,08	13.368
<b>Coya Población</b>	0,056	0,0569	8,9427	0,0796	12,5183	0,06	12.776
<b>Sewell</b>	-0,0411	0,0543	0,8104	0,0701	1,0468	0,47	6.819

La fórmula y significado de cada variable se indica en la sección 5.1.2.

Nota 1: BIAS o sesgo es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 2: MAE es el error absoluto medio.

Nota 3: NMAE corresponde a la variable MAE normalizada.

Nota 4: RMSE es la raíz del error cuadrático medio (root-mean-square deviation), es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

Nota 5: NMSE corresponde a la variable RMSE normalizada

Nota 6: IOA es el índice de ajuste (*index of agreement*), que aporta a la información sobre el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones.

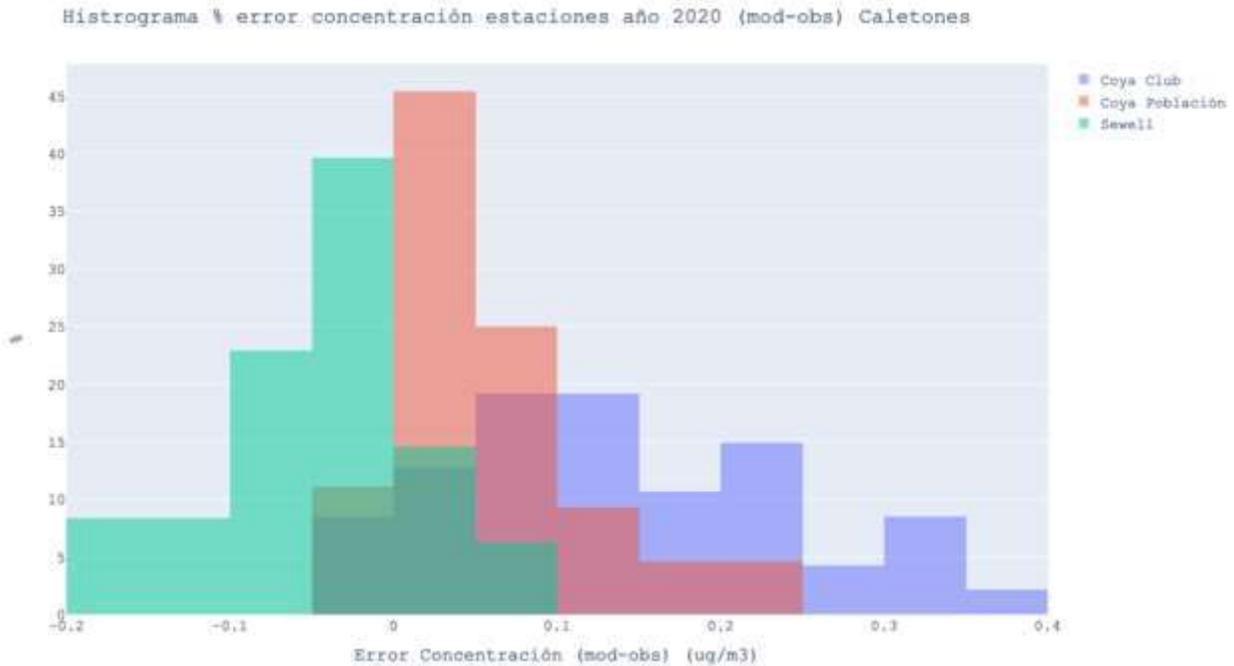
Fuente: Elaboración propia

Variación error concentración estaciones año 2020 Caletones



**Figura 5-25 Evolución del error de la concentración modelada versus observada – Fundición Caletones 2020**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-26 Histograma de distribución del error para cada estación – Fundición Caletones 2020**

Fuente: Elaboración propia

### Determinación relación emisión concentración

Como se indica en la Sección 5.1.5, se determinó una estación representativa para este dominio de estudio en la localidad de Coya, como indica la Tabla 5-74.

**Tabla 5-74 Estación representativa por localidad – Fundición Caletones**

Fundición	Estación representativa	Localidad
Caletones	Estación Coya Población	Coya

Fuente: Elaboración propia

**Paso 1:** Siguiendo la metodología indicada en la Sección 5.1.5, en primer lugar se determinará la concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\overline{C_{O_i}}$ ) a través de la Ecuación 13 y los datos de la Tabla 5-75. Los datos de concentración observada ( $C_{O_i}$ ) fueron extraídos desde el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) y corresponde al promedio observado en el año 2020.

**Tabla 5-75 Concentración observada corregida por receptor – Fundición Caletones**

Simbología	ITEM	Estación
		Coya Población
$Co_i$	Concentración observada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>1</sup>	0,0064
$\beta_i$	Concentración o nivel basal ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>2</sup>	0,0018
$\overline{Co}_i$	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0046

Nota 1: Información extraída desde Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) año 2020

Nota 2: El nivel basal se estimó a partir de la metodología presentada en la Sección 5.1.6

Fuente: Elaboración propia

**Paso 2:** En esta etapa se determinará el factor de corrección para los receptores, correspondiente a la estación Coya Población. Para esto se utiliza la Ecuación 18 y los datos presentados en la Tabla 5-76.

**Tabla 5-76 Factor de corrección por receptor – Fundición Caletones**

Simbología	ITEM	Estación
		Coya Población
$\overline{Co}_i$	Concentración observada debida a la variación de las emisiones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0046
$Cm_i$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0643
$FC'_i$	Factor de corrección	14,09

Fuente: Elaboración propia

**Paso 3:** Luego, se determina el factor FEC expresado desde una función lineal que permita definir el nivel de concentración en un receptor particular de acuerdo con la contribución de las emisiones procedentes de cada fuente de emisión, según la Ecuación 12 (ver Tabla 5-77).

**Tabla 5-77 Factor FEC por fuente – Estación Coya Población, Fundición Caletones**

Simbología	ITEM	Fuente		
		PLG1	PLG2	Fugitiva
$Cm_{ij}$	Concentración modelada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,0001	0,0001	0,0640
$E_j$	Emisiones (ton As/año)	0,4017	0,3636	66,27
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración	2.933	4.120,45	1.034,77

Fuente: Elaboración propia

**Paso 4:** Finalmente, se calcula el factor  $FEC'$  a partir de la Ecuación 20 y los valores FC y FEC indicados anteriormente. Los resultados se presentan en la Tabla 5-78.

**Tabla 5-78 Factor FEC corregido por fuente – Estación Puchuncaví, Fundición Caletones**

Simbología	ITEM	Fuente		
		PLG1	PLG2	Fugitiva
$FEC_{ij}$	Factor emisión-concentración (ton As·m <sup>3</sup> /μg·año)	2.933	4.120,45	1.034,77
$FC'_i$	Factor de corrección	14,09		
$FEC'_{ij}$	Factor emisión-concentración corregido (ton As·m <sup>3</sup> /μg·año)	41.337,77	58.073,75	14.584

Fuente: Elaboración propia

Para la presente zona geográfica la función de relación emisión-concentración (FEC), quedaría del siguiente modo. Se agrega, que el procedimiento de cálculo anterior, se replica en el Anexo Digital I - Cálculos FEC por Dominio.

**Tabla 5-79 Relación FEC por fuente – Fundición Caletones**

Receptor	Localidad	Relación FEC	Etiqueta
Estación Coya Población	Coya	$C_{Coya} = \frac{E_{PLG1}}{41337,77} + \frac{E_{PLG2}}{58073,75} + \frac{E_{FUGITIVA}}{14584} + 0,0018$	Ecuación 35

Fuente: Elaboración propia

## 6. Propuestas regulatorias para la elaboración de una norma primaria de calidad del aire para arsénico

En el presente Capítulo se realiza una revisión de antecedentes internacionales (Sección 6.1 y Sección 6.2), así como de los riesgos asociados al arsénico (Sección 6.3 y Sección 6.4) para proponer tres alternativas regulatorias.

### 6.1 Escenario regulatorio internacional

En esta Sección se realiza una comparación de los diferentes niveles de concentración límite encontrados para arsénico. Dentro de estas concentraciones límites se incluyen tanto símiles de NPCA, pero también valores de referencia que no son normados como una NPCA, sino que operan como valores objetivos. En la mayor parte de los casos los límites son planteados considerando sus riesgos en salud, expresados como el riesgo individual incremental asociado a la exposición (ver Sección 6.3), pero también consideran las limitaciones técnicas y la diversidad territorial de los niveles de arsénico.

En la Tabla 6-1, se presentan los valores límites y tipos de denominaciones de estos límites recopilados en las normas internacionales revisadas<sup>61</sup>, donde se observa que todos ellos corresponden a estándares anuales cuyo enfoque es la protección de la salud a través del establecimiento de concentraciones límites de contaminantes en el aire como el As. Salvo en el caso de Massachusetts, EEUU, la mayoría de estos valores son iguales o cercanos a 6 ng/Nm<sup>3</sup>, lo que corresponde al “valor objetivo” establecido por la Directiva 2004/107/EC de la UE desde el año 2004 (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004). Al usar el término “valor objetivo”, esta directiva no lo define de manera específica pero deja claro que corresponde a un nivel de contaminante que, “con el fin de reducir al mínimo los efectos perjudiciales para la salud humana, prestando particular atención a los sectores vulnerables de la población, y el medio ambiente en su conjunto, del arsénico atmosférico, del cadmio, del níquel y de los hidrocarburos aromáticos policíclicos presentes en el aire, [...] deberá alcanzarse en la medida de lo posible”, en un periodo determinado (Apartado 4 de esta directiva). Además, en el caso de esta norma europea, el valor límite que se fija<sup>62</sup> para As corresponde al contenido promedio de este elemento como fracción de MP10 durante un año. Adicionalmente, esta directiva define

---

<sup>61</sup> De las normas revisadas, se seleccionó a un subconjunto de regulaciones de interés, priorizando regulaciones aplicables en territorios con fundiciones de cobre, así como de países con mayor nivel de desarrollo en la gestión ambiental. En particular, se profundizan los casos de los siguientes países/regiones donde existen estándares de calidad de aire para arsénico: Canadá, China, Estados Unidos, y la UE. Para complementar este análisis sobre estándares de calidad del aire para As, se agregaron los casos de India, Israel y Nueva Zelanda (estos países no se consideran en el análisis de normas de emisiones internacionales porque, de acuerdo con las estadísticas analizadas, no cuentan con fundiciones de cobre).

<sup>62</sup> Este valor aplica para todos los Estados Miembros de la UE, como Alemania, país que está entre los 15 mayores fundidores de cobre primario en el mundo y que está incluido en el análisis de la normativa internacional sobre emisión en el marco de este estudio.

métodos y criterios comunes de evaluación de las concentraciones de arsénico en el ambiente. Este mismo valor ha sido posteriormente establecido como estándar de calidad de aire para As por otros países en sus normativas respectivas (e.g. Israel, India). La diferencia entre los valores considerados dan cuenta de diferentes niveles de riesgos *aceptables* lo cual se profundiza con mayor detalle en la Sección 6.5.

Además, cabe destacar que estos estándares corresponden a valores de referencia, donde, en la mayoría de estas, se indica posibles exenciones o flexibilidad para las zonas o casos donde no se logran cumplir dichos estándares. Por ejemplo, en el caso de la regulación china (MEP, 2012) el valor se presenta de forma referencial y permite cierta flexibilidad para las ciudades que no pueden cumplir el estándar de calidad del aire para As, mediante la elaboración de un plan específico de gestión. De forma análoga, en la norma europea (2004) se establece que se informe toda superación anual del “valor objetivo” fijado para el As en esta, sin no obstante fijar ningún tipo de sanción en caso de no cumplimiento, dejando esta tarea a los Estados Miembros de la UE<sup>63</sup>. La normativa exige que para las zonas donde se supere el valor objetivo, los Estados miembros deberán detallar las zonas e identificar las fuentes que contribuyen, además de “demostrar que aplican todas las medidas necesarias que no generen costos desproporcionados, dirigidas en partículas a las fuentes de emisión principales, para alcanzar los valores objetivos” (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004 Art.3).

**Tabla 6-1 Tipos y valores límites anuales de concentración de As en el aire de fuentes internacionales [ng/Nm<sup>3</sup>]**

<b>País/Región</b>	<b>Valor límite [ng/Nm<sup>3</sup>]</b>	<b>Tipo de límite</b>	<b>Fuente</b>
<b>UE</b>	6,0	<i>Target Value (TV)</i>	(Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004)
<b>China</b>	6,0	<i>Concentration Limit</i>	(MEP, 2012)
<b>EEUU, Massachusetts</b>	0,3	<i>Allowable Ambient Limit (AAL)</i>	(Massachusetts, 2011)
<b>India</b>	6,0	<i>Time-Weighted Average Concentration (TWA)</i>	(MOEF & CC & Government of India, 2019)
<b>Israel</b>	6,0	<i>Maximum Allowable Concentration (MAC)</i>	(Government of Israel, 2011)
<b>Nueva Zelanda</b>	5,5	<i>Ambient Air Quality Guideline</i>	(Ministry for the Environment & Government of New Zealand, 2002)

Nota: Dado que la mayoría de las regulaciones recopiladas se analizaron en idioma inglés, los tipos de límites presentados en esta tabla se proporcionan en este idioma, estos corresponden en la mayoría de los casos a su denominación original.

Fuente: Elaboración propia

<sup>63</sup> El artículo 9 de la regulación europea establece que “los Estados miembros establecerán las sanciones aplicables en caso de infracción de las disposiciones nacionales adoptadas con arreglo a la presente Directiva, y adoptarán todas las medidas necesarias para garantizar su cumplimiento. Las sanciones previstas deberán ser eficaces, proporcionadas y disuasorias” (2004).

En la Tabla 6-2 se presentan mayores detalles respecto de las normas para los países seleccionados. De ellas se destaca que sólo dos estados canadienses cuentan con valores límites para el arsénico en un periodo diferente al anual: de 24 horas. La justificación para la selección de este horizonte más corto sería por riesgos asociados a efectos no cancerígenos. En la Tabla 6-2, se profundizan los casos de los países/regiones seleccionados para este análisis sobre estándares de calidad del aire para As, a saber, Canadá, China, EEUU, la UE, y la India, Israel y Nueva Zelanda.

**Tabla 6-2 Estándares de calidad del aire primarios de normativas internacionales para arsénico, según periodo de evaluación [ng/Nm<sup>3</sup>]**

Periodo	Territorio	Valor límite [ng/Nm <sup>3</sup> ]	Información sobre el límite	Nombre y referencia de la regulación
24 h	Canadá, Manitoba	300,0	<i>Ambient Air Quality Guideline</i> que corresponde a la concentración de As en el aire que protege contra los efectos adversos para la salud, el medio ambiente o la estética (límite similar al límite de Ontario descrito a continuación pero no hizo el objeto de una revisión posteriormente al año 2005).	(Government of Manitoba, 2005)
	Canadá, Ontario	300,0	<i>Ambient Air Quality Criteria</i> (AAQC) que corresponde a la concentración de As en el aire que protege contra los efectos adversos para la salud, el medio ambiente o la estética.  Este tipo de límite se utiliza para evaluar la calidad general del aire resultante de todas las fuentes de un contaminante del aire, más comúnmente en evaluaciones ambientales, estudios especiales que utilizan datos de monitoreo del aire ambiental, evaluación de la calidad general del aire en una comunidad e informes anuales sobre la calidad del aire en toda la provincia.  Nota: Dado que los AAQC se basan en una revisión de información científica sobre los efectos de los contaminantes en la salud y el medio ambiente, pueden modificarse ocasionalmente en función de información científica nueva o relevante.	(MECP-Ontario, 2020)
Anual	UE	6,0	Valor objetivo de aire ambiental en contenido total en la fracción MP <sub>10</sub> . La misma ley indica que se debe informar toda superación anual del valor objetivo del arsénico fijado por esta, indicando las causas de la superación y la zona afectada así como una breve evaluación en relación con el valor objetivo, y datos pertinentes sobre los efectos en la salud y sobre el impacto en el medio ambiente.	Directive 2004/107/EC (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004)
	China	6,0	Esta norma es de carácter obligatorio, sin embargo, se indica que <u>las ciudades clave para la prevención y el control de la contaminación del aire</u> que no cumplan con este estándar podrán obtener ciertas flexibilidades (ver nota). El valor límite establecido aplica para todo tipo de área, y corresponde a la media aritmética de la concentración media de cada día en un año natural.  Nota: En caso de no poder cumplir, se deberá formular un plan para alcanzar el estándar dentro de un límite de tiempo, en el que se podrá adoptar medidas más estrictas de conformidad con la autorización o reglamentos aplicables para alcanzar la norma a tiempo.	Tabla A.1 Límites de concentración de referencia de cadmio, mercurio, arsénico, cromo hexavalente y fluoruro en el aire ambiente. (MEP, 2012)

Período	Territorio	Valor límite [ng/Nm <sup>3</sup> ]	Información sobre el límite	Nombre y referencia de la regulación
	EEUU, Massachusetts	0,3	<i>Allowable Ambient Limit</i> (AAL, por sus siglas en inglés) establecido en base a fuentes oficiales como valor referencial para proteger a la población en general, incluidas las poblaciones sensibles, de los efectos adversos para la salud de la inhalación del As en el aire.  Nota: No se encontraron casos de exenciones asociados a la aplicación de este estándar.	(Massachusetts, 2011)
	India	6,0	Media aritmética anual de un mínimo de 104 mediciones en un año en un sitio particular tomadas dos veces por semana, durante 24 horas a intervalos uniformes. No queda claro cómo se manejan los casos de no cumplimiento.	(MOEF & CC & Government of India, 2019)
	Israel	6,0	“Valor ambiental” de concentración máxima permitida de As en material particulado de menos de 10 micrómetros suspendido en el aire. Esta se debe calcular promediando valores de concentraciones promedio diarias (al menos 18 valores de concentraciones máximas diarias promedio). En este caso se permite una serie de anomalías por año. Este reglamento tiene vigencia hasta el 22 de marzo de 2027.	(Government of Israel, 2011)
	Nueva Zelanda	5,5	Valor referencial ambiental basado en un valor de riesgo aceptable de 1 en 100.000 para un carcinógeno de alto nivel. Valor de referencia que debe usarse para dirigir la gestión de cuencas atmosféricas y evaluar los resultados del monitoreo de la calidad del aire ambiental. En general, cuando los niveles de contaminantes excedan los valores de referencia, se deben realizar evaluaciones más detalladas de los riesgos para la salud y tenerlas en cuenta en la planificación de actividades.	(Ministry for the Environment & Government of New Zealand, 2002)

(\*) Los umbrales presentados en esta tabla determinan el uso exclusivo de técnicas de modelización o estimación objetiva para evaluar la calidad del aire ambiente.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6-3, se presentan países/regiones donde existen límites de concentración anuales de arsénico en el aire que contribuyen a regular la calidad del aire a través de condiciones que aplican para la construcción, modificación y/o operación de fuentes emisoras de contaminantes como el As. En esta comparación se incorporó al caso de como país latinoamericano y limítrofe con Chile, a pesar de no ser un actor mundial relevante de la fundición de cobre.

Se destaca que los valores límites recopilados son variables de un país al otro; el rango de estos valores se sitúa entre 0,20 ng/Nm<sup>3</sup> (Michigan, y Rhode Island, EEUU) y 50 ng/Nm<sup>3</sup> (Bolivia). En particular, se destaca un grupo de valores límites bajos que se sitúan entre 0,20 ng/Nm<sup>3</sup> y 0,30 ng/Nm<sup>3</sup> que aplican en estados de EEUU (Michigan, Rhode Island, Vermont, Washington), donde 0,20 ng/Nm<sup>3</sup> corresponde al mayor nivel de exigencia existente a la fecha en materia de arsénico en el aire en los países estudiados. A su vez, el caso de Bolivia corresponde al menos exigente en la materia. Asimismo, es interesante notar que Alberta, Canadá, y New Hampshire, EEUU, poseen estándares de As en el aire que son de un orden de magnitud comparable al de Bolivia (10 y 24 ng/Nm<sup>3</sup> respectivamente). Estos valores se relacionan directamente con los coeficientes de riesgo de inhalación (IUR – ver Sección 6.3) considerados y el nivel de riesgo *aceptable* (mayor detalle en la Sección 6.5).

También, como ejemplo interesante, se recopiló el caso de Michigan, EEUU donde las *Michigan's Air Toxic Rules* del *Michigan Department of Environment, Great Lakes, and Energy* (EGLE, por sus siglas en inglés) establecen que, cualquier unidad o unidades de emisión nuevas o modificadas, para las que se requiere una solicitud de permiso de instalación y que emiten algún contaminante tóxico del aire<sup>64</sup> como el As, están sujetas a los requisitos de la regulación sobre sustancias tóxicas del aire. Esta incluye dos requisitos básicos, primero, cada fuente debe aplicar la mejor tecnología de control disponible para tóxicos (abreviada T-BACT en dicha norma), y luego de la aplicación de la T-BACT, las emisiones del contaminante tóxico del aire no pueden resultar en una concentración ambiental máxima que exceda el nivel de detección basado en la salud aplicable.

Para el As, existen dos tipos de límites establecidos en Michigan, que son el Nivel de detección de riesgo inicial (*Initial Risk Screening Level*, IRSL, por sus siglas en inglés) y el Nivel de detección de riesgo secundario (*Secondary Risk Screening Level*, SRSL, por sus siglas en inglés). El IRSL corresponde al nivel de detección basado en la salud para los efectos cancerígenos que se define como un aumento del riesgo de cáncer de uno en un millón (10<sup>-6</sup>), mientras que el SRSL corresponde al nivel de detección basado en la salud para los efectos cancerígenos que se define como un aumento del riesgo de cáncer de uno en cien mil (10<sup>-5</sup>). El IRSL aplica solo para fuentes nuevas o modificadas sujetas a la solicitud del permiso. Si el solicitante no puede demostrar que las emisiones de As cumplen con el IRSL, puede optar por demostrar el cumplimiento del límite

---

<sup>64</sup> Estos se definen como cualquier contaminante del aire para el cual no existe un estándar nacional de calidad del aire ambiental y que es o puede llegar a ser dañino para la salud pública o el ambiente cuando está presente en la atmósfera exterior en cantidades y duración suficientes.

SRSL, sin embargo, en este caso debe incluir todas las fuentes de ese contaminante tóxico del aire emitido por la planta, no solo la unidad de emisión en cuestión.

Adicionalmente, es interesante observar que Carolina del Norte, EEUU, posee también un enfoque en torno al cumplimiento de los límites de concentración de contaminantes del aire por las fuentes emisoras. Sin embargo, en dicho caso, si bien el estándar de calidad del aire para arsénico es un nivel ambiental aceptable (AAL, por sus siglas en inglés), hay instalaciones, fundiciones de cobre incluidas, que no están afectas al estándar de calidad de arsénico en el aire establecido.

**Tabla 6-3 Valores límites de contribución a la concentración anual de As en el aire con enfoque entorno a las fuentes emisoras de contaminantes [ng/Nm<sup>3</sup>]**

País, Región	Valor límite [ng/Nm <sup>3</sup> ]	Tipo de Límite	Información sobre el límite	Nombre y fuente de la regulación
EEUU, Carolina del Norte	2,10	Allowable Ambient Limit (AAL)	Nivel ambiental aceptable. Si existe una evidencia por escrito de que una fuente que emite As presenta un riesgo inaceptable para la salud humana según los AAL de la norma o estudios epidemiológicos, se requiere que el propietario u operador de la fuente presente una solicitud de permiso operar. En el caso contrario las fuentes emisoras no requieren realizar dicho trámite.	(Government of North Carolina, 2018)
EEUU, Michigan	0,20	Initial Risk Screening Level (IRSL)	Nivel de detección basado en la salud para los efectos cancerígenos que se define como un aumento del riesgo de cáncer de uno en un millón (10 <sup>-6</sup> ). El solicitante de unidades emisoras debe demostrar el cumplimiento de este límite ante las autoridades.	(EGLE, 2004)
EEUU, Michigan	2,00	Secondary Risk Screening Level (SRSL)	Nivel de detección basado en la salud para los efectos cancerígenos que se define como un aumento del riesgo de cáncer de uno en cien mil (10 <sup>-5</sup> ). El solicitante de unidades emisoras puede optar por demostrar el cumplimiento del límite SRSL cuando no puede demostrar que las emisiones del contaminante tóxico del aire cumplen con el IRSL. En este caso, el solicitante debe incluir todas las fuentes de As emitido al aire por la planta, y no solo la unidad de emisión permitida.	(EGLE, 2004)
EEUU, Luisiana	20,00	Ambient Air Standard (AAS)	Valor con base en factores de riesgo unitarios y un riesgo residual de uno en diez mil, u otros datos que la autoridad administrativa determine superiores. En casos particulares, los dueños/operadores de instalaciones pueden obtener autorizaciones de exceder el estándar de aire, cuando logren demostrar alternativamente que: <ul style="list-style-type: none"> <li>- El cumplimiento de un estándar de aire ambiente sería económicamente inviable;</li> <li>- No se puede esperar razonablemente que las emisiones de la fuente supongan una amenaza para la salud pública o el medio ambiente;</li> <li>- Las emisiones de la fuente serían controladas a un nivel que sea la tecnología de control máxima alcanzable (norma LAC 33 :III.5109.B).</li> </ul> Nota: La autoridad administrativa deberá publicar un aviso público y celebrar una audiencia pública sobre cualquier posible autorización asociada, la cual estará sujeta a revisión cada cinco años o en cualquier otro momento que la autoridad administrativa considere apropiado.	(Government of Luisiana, 2004)

País, Región	Valor límite [ng/Nm <sup>3</sup> ]	Tipo de Límite	Información sobre el límite	Nombre y fuente de la regulación
<b>EEUU, New Hampshire</b>	24,00	Allowable Ambient Limit (AAL)	Límite de aire ambiente. Si el propietario u operador de un proceso o dispositivo existente no puede demostrar el cumplimiento de los AAL, entonces el propietario u operador deberá cumplir con otras regulaciones (Env-A 1405.04 y Env-A 1406.02). En particular, esta regulaciones indica que quedan exentas las emisiones de un contaminante atmosférico peligroso (HAP), de un proceso o dispositivo, siempre y cuando dicho proceso o dispositivo use el equipo de control de contaminación necesario para cumplir con una norma nacional de emisión para HAP según lo codificado en 40 CFR 61 (esta norma incluye las funciones de cobre).	(Government of New Hampshire, 2004)
<b>EEUU, Rhode Island</b>	0,20	Allowable Ambient Limit (AAL)	El Nivel Ambiental Aceptable es la concentración máxima en el aire ambiente de As que puede ser aportado por una fuente estacionaria, en o más allá de la línea de propiedad de esa instalación, promediada durante un año. Nota: En Rhode Island existe además un Nivel Ambiental Aceptable horario igual a 200 ng/m <sup>3</sup> .	<i>Rhode Island Air Toxics. Guideline</i> (DEM-RI, 2008)
<b>EEUU, Vermont</b>	0,23	Hazardous Ambient Air Standard (HAAS)	Límite basado en un nivel estimado para corresponder a un riesgo carcinogénico adicional durante la vida de uno en un millón, suponiendo una exposición continua por inhalación. Es un “Estándar de impacto de aire peligroso de fuente estacionaria”, correspondiente a una concentración en el aire de As atribuible a los impactos en la calidad del aire de una fuente estacionaria, junto con los impactos de otras fuentes estacionarias. Se establece que no se podrá causar, ni permitir la descarga de ningún contaminante peligroso del aire de una fuente estacionaria que cause o contribuya a concentraciones en el aire ambiente que excedan dicho estándar. Nota: Las autoridades pueden requerir que el propietario u operador de una fuente fija presente una evaluación de impacto en la calidad del aire. Si se determina, a través del monitoreo de la calidad del aire, que la concentración anual de As ha excedido su estándar de aire ambiente peligroso, se deberá adoptar un Plan de Acción Tóxica (TAP) para el contaminante. Cada TAP deberá contener una estrategia para reducir las concentraciones del contaminante en el aire.	(Government of Vermont, 2018)

País, Región	Valor límite [ng/Nm <sup>3</sup> ]	Tipo de Límite	Información sobre el límite	Nombre y fuente de la regulación
<b>EEUU, Washington</b>	0,30	Acceptable source impact analysis (ASIL)	<p>Concentración de detección de As emitido por fuentes en el aire. Esta norma (capítulo WAC 173-460-010) exige el control sistemático de fuentes nuevas o modificadas que emiten contaminantes atmosféricos tóxicos (TAP) como el As, con el fin de prevenir la contaminación del aire, reducir las emisiones en la medida de lo razonablemente posible y mantener tales niveles de calidad del aire con el fin de proteger la salud humana y la seguridad.</p> <p>Se establece la necesidad de cumplir con tres requisitos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizar la mejor tecnología disponible para el control de sustancias tóxicas (BAT, por sus siglas en inglés);</li> <li>- Cuantificación de las emisiones de contaminantes atmosféricos tóxicos;</li> <li>- Demostración de protección de la salud y seguridad humana.</li> </ul>	(Government of Washington, 2004)
<b>Canadá, Alberta</b>	10,00	Ambient Air Quality Objectives (AQOs)	<p>Valor objetivo de calidad del aire adoptado de Texas, con el propósito de ser utilizado para determinar la adecuación del diseño de las instalaciones industriales, para establecer las alturas requeridas de las chimeneas y otras condiciones de liberación, y para evaluar el cumplimiento y evaluar el desempeño de las instalaciones.</p> <p>Nota: Este valor objetivo fue establecido en base a una evaluación de factores científicos, sociales, técnicos y económicos.</p>	(Government of Alberta, 2005)
<b>Canadá, Quebec</b>	2,00	Initial Concentration (Ci)	<p>Valor de concentración inicial (Ci) establecido por defecto.</p> <p>Nota: Este valor se usa como Ci de As en la atmósfera en el caso de la construcción o modificación de una fuente estacionaria de contaminación, o de un aumento de producción, solo si no se dispone de resultados de muestreos realizados o validados por las autoridades para la totalidad o parte de los 3 años previos a la construcción o modificación de dicha fuente estacionaria, y tomados en el lugar de la fuente o en un entorno comparable.</p>	<i>Schedule K, Air Quality Standards and Schedule G, Metals and Metalloids in Air</i> (Government of Quebec, 1979)

País, Región	Valor límite [ng/Nm <sup>3</sup> ]	Tipo de Límite	Información sobre el límite	Nombre y fuente de la regulación
	3,00	Limit Value (LV)	<p>Concentración límite (promedio en 1 año), calculada de la base del Ci calculada o por defecto.</p> <p>En el caso de la construcción o modificación de una fuente estacionaria de contaminación o un aumento en la producción de un bien o servicio, la concentración de As en el aire debe respetar este límite. Si se determina que es probable que este límite se sobrepase, entonces se prohíbe la construcción, modificación de una fuente estacionaria, o aumento en la producción.</p> <p>Nota: Dicha concentración de As en la atmósfera se calcula sobre la base de la concentración inicial (ver Ci), para un punto fuera de los límites del predio ocupado por la fuente de contaminación y fuera de un sector zonificado para fines industriales, o en una zona de amortiguamiento adyacente a dicho sector, según lo establecido por las autoridades municipales competentes.</p>	(Government of Quebec, 1979)
<b>Bolivia</b>	50,00	Maximum Allowable Concentration (MAC)	<p>Valor referencial durante cinco años, a partir de lo cual entrará en vigor como valor límite permisible de calidad del aire para contaminante específico. En las zonas donde se dicho límite, las fuentes fijas deben elaborar un programa calendarizado de medidas para lograr niveles de emisión compatibles con los objetivos de calidad de aire. Se admite una variación del valor de hasta +10%.</p>	(Gobierno de Bolivia, 1995)

Fuente: Elaboración propia

Como producto de las comparaciones anteriores, cabe destacar que EEUU no cuenta con un estándar de calidad del aire para arsénico a nivel federal, aunque en ciertos estados del país si existen normas de este tipo. Se destaca, sin embargo, en las regiones donde se ubican las fundiciones de cobre, no se encontraron regulaciones de este tipo. Entre los estados que sí tienen valores límites de calidad del aire para arsénico, con enfoque en torno a las fuentes emisoras contaminantes de As, se destaca por ejemplo Rhode Island donde el valor establecido como estándar de As en el aire al año corresponde a  $0,20 \text{ ng/m}^3$ . Tal como mencionado anteriormente, se observa el mismo valor en el estado de Michigan, y un valor parecido en Vermont ( $0,23 \text{ ng/m}^3$ ), o de un orden de magnitud muy cercano como en Washington ( $0,30 \text{ ng/m}^3$ ).

También hay menos un caso donde el estándar de arsénico en el aire es sustancialmente mayor a los valores descritos anteriormente como en Luisiana ( $20 \text{ ng/m}^3$ ) y New Hampshire ( $24 \text{ ng/m}^3$ ). Además, en EEUU, se destaca el caso de Massachusetts cuyo estándar tiene un orden de magnitud parecido a los estados que establecen estándares exigentes para el As en el aire pero que no posee un enfoque entorno a fuentes emisoras de contaminantes, sino que está solo orientado a la obtención de un aire ambiente limpio para proteger la salud de las personas.

## 6.2 Comparación de beneficios estimados en evaluaciones internacionales

En cuanto a evaluaciones internacionales de regulaciones de la concentración ambiental de arsénico, en la propuesta de la Directiva 2004/107/CE<sup>65</sup> relativa al arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente, se realizó una evaluación económica de los límites propuestos. Para realizar este análisis, la Comisión Europea pidió a una empresa consultora que realizara el estudio *“Economic evaluation of air quality targets for heavy metals”* (Entec UK Limited, 2001). En este documento se evalúa específicamente la posible definición de valores límite para las concentraciones de arsénico, cadmio y níquel en el aire<sup>66</sup>. A continuación, se detalla la metodología utilizada para la estimación de los beneficios.

---

<sup>65</sup> En esta sección se revisa la propuesta y el reporte final de la evaluación económica realizado por Entec UK Limited, dado que los antecedentes que justifican la directiva definitiva no se detallan en la Directiva final, pero sí en la propuesta.

<sup>66</sup> Cabe destacar la propuesta desarrollada por la CE consideraba múltiples contaminantes atmosféricos asociados a la operación de diversas fuentes emisoras, no solo aquellas relacionadas con la producción de cobre. Específicamente, respecto a las emisiones de arsénico, en la propuesta de la Directiva 2004/107/CE se indica que para 1990 se calcularon 575 toneladas de arsénico emitidas, de las cuales 86% serían de fuentes fijas, sin embargo, estas emisiones no afectarían de manera relevante las concentraciones en el aire ambiente, por ser liberadas mediante chimeneas suficientemente altas. Por el contrario, las emisiones fugitivas de arsénico, provenientes principalmente de la industria del hierro y acero, del cobre y del plomo, son las más importantes para la calidad del aire ambiente, aun cuando representan el 9% de las emisiones.

En el documento mencionado se afirma que los efectos negativos más importantes de la exposición prolongada al arsénico son cánceres de pulmón y piel, donde se afirma que tienen mayor importancia los efectos cancerígenos por inhalación que aquellos asociados a la ingesta. Por lo anterior, los efectos cancerígenos por inhalación son los principales considerados en la estimación de los beneficios en salud de los límites definidos por la regulación.

Bajo el supuesto de que el arsénico es un cancerígeno genotóxico para los humanos —es decir, que puede dañar el ADN—, la evaluación del riesgo para la salud humana debiera realizarse según el enfoque de riesgo unitario, dado que no existiría un nivel umbral por debajo del cual no existirían efectos. Considerando el valor de riesgo unitario propuesto por la OMS para el arsénico,  $1,5 \times 10^{-3} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$  el riesgo adicional de contraer cáncer de pulmón si se está expuesto de forma continuada a  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  durante toda la vida<sup>67</sup>, este se traduce en una concentración media anual de  $0,66 \text{ ng}/\text{m}^3$  (para mayor profundización sobre los riesgos unitarios, ver la Sección 6.3). Sin embargo, dada la probable existencia de un umbral, el grupo de trabajo consideró que el enfoque del riesgo unitario sobrestimaría el verdadero riesgo, y la mayoría de los miembros apoyaron el uso de un enfoque de "pseudoumbral" y concluyeron que concentraciones medias anuales totales de arsénico inferiores a una franja de 4 a  $13 \text{ ng}/\text{m}^3$  reducirían al mínimo los efectos perjudiciales para la salud humana.

En el análisis realizado, se calcularon los costes y beneficios para lograr cinco niveles de concentración posibles:  $20 \text{ ng}/\text{m}^3$ ,  $13 \text{ ng}/\text{m}^3$ ,  $5 \text{ ng}/\text{m}^3$ ,  $4 \text{ ng}/\text{m}^3$ , y  $1 \text{ ng}/\text{m}^3$ . Para el menor nivel se consideró técnicamente imposible en casi todos los emplazamientos para el año objetivo 2010. En dos casos, una instalación de producción de cobre y una de producción de plomo, el cierre de las plantas se consideró la única forma de lograr incluso el más elevado de estos valores,  $20 \text{ ng}/\text{m}^3$ . Como referencia en la Tabla 6-4 se muestran los costos estimados para cada caso, específicamente para la industria de producción de cobre.

---

<sup>67</sup> Se asume una longevidad promedio de 70 años.

**Tabla 6-4 Costos estimados del cumplimiento de los valores límite de arsénico propuestos, para la industria de producción de cobre, y cantidad de sitios en que se espera que se pueda cumplir el límite indicado [millones EUR/año]**

Escenario	20 ng/m <sup>3</sup>	13 ng/m <sup>3</sup>	5 ng/m <sup>3</sup>	4 ng/m <sup>3</sup>	1 ng/m <sup>3</sup>
<b>BAU</b>	Se espera que este límite lo cumplan 2 sitios de los 4 para los cuales se tienen antecedentes (1 de Suecia o Finlandia, y uno de Alemania, no especificados).	Se espera que este límite lo cumpla 1 sitio de los 4 para los cuales se tienen antecedentes (1 de Bélgica).	S/I	S/I	S/I
<b>Con inversión adicional a BAU</b>	Es poco probable que se pueda lograr para al menos 1 de 9 instalaciones (no especificada).	16 (tasa descuento 2%) 17 (tasa descuento 4%) 19 (tasa descuento 6%)  Se espera que este límite lo cumplan 3 sitios de los 4 para los cuales se tienen antecedentes (no especificados).	Para todas las instalaciones es poco probable que se pueda lograr este límite.	Para todas las instalaciones es poco probable que se pueda lograr este límite.	Para todas las instalaciones es poco probable que se pueda lograr este límite.

Nota 1: Las cifras son las mejores estimaciones. Las estimaciones superiores son +50%; las estimaciones más bajas son -50%.

Nota 2: Las cifras se estiman como totales para los 9 sitios identificados, a partir de antecedentes disponibles para 3 de ellos.

Nota 3: En la evaluación se toma el supuesto de que hay 150 mil personas en el área de influencia de cada sitio.

Fuente: (Entec UK Limited, 2001)

Para valorizar los beneficios asociados a los efectos cancerígenos, en el documento de Entec UK Limited (2001) se estimó el beneficio de prevenir una fatalidad estadística (VPF, por su sigla en inglés). Para esto, se parte del resultado de una valoración contingente de prevenir un fallecimiento estadístico por accidente de tránsito, 1 millón de euros, con rango de valores entre 0,65 millones de euros y 2,5 millones de euros. Este valor se debe ajustar según si la población afectada incluye todas las edades (que se ajustaría con un factor de 1,43) o si corresponde a adultos mayores. Adicionalmente, se agrega un 50% extra al valor, asociado a que las personas pueden estar dispuestas a pagar más para reducir el riesgo de morir de cáncer que para reducir el riesgo de sufrir un ataque cardíaco fatal, porque la muerte por cáncer puede estar precedida por un largo período de enfermedad grave. También se realiza un ajuste, asumiendo que habría una espera de 10 años para empezar a observar estos impactos. El resultado obtenido se trae al presente con una tasa de descuento de 4%, realizando un análisis de sensibilidad con 2%. De este modo, obtienen valores de VPF de 1,8 millones de euros, entre un rango desde 0,9 millones de euros a 4,4 millones de euros. Respecto a la aplicabilidad de este método, los autores indican que, dado que este método se basa en pequeños cambios en el riesgo en grandes poblaciones, se reducirá su aplicabilidad a este estudio, por no tratarse de poblaciones tan grandes. Adicionalmente, destacan que la disposición a pagar por parte de una población más pequeña para reducir el riesgo de fatalidad puede superar las cifras de VPF obtenidas en esta estimación.

En la evaluación económica de la Directiva 2004/107/CE, junto con los beneficios en salud por cáncer, también se consideran los efectos no cancerígenos del arsénico debido a la absorción oral y por inhalación. En particular, para definir niveles límite de concentración atmosférica para prevenir los efectos no cancerígenos, se utilizan tres valores:

1. LOAEL (nivel más bajo de efectos adversos observados, por su sigla en inglés): Es la concentración más baja a la que se ha observado un efecto adverso.
2. NOAEL (nivel sin efecto adverso observado, por su sigla en inglés): Es una concentración teórica a la que no se producirá ningún efecto adverso. El valor en sí no se puede medir en realidad, por lo que se calcula a partir del LOAEL utilizando factores de seguridad basados en la experiencia y el juicio.
3. Valor límite: El valor límite en sí se deriva del NOAEL, nuevamente utilizando factores de seguridad basados en la experiencia y el juicio.

De este modo, si bien los valores límite de efectos no cancerígenos se han establecido para proteger la salud humana, es el NOAEL el que se considera más apropiado para cuantificar los efectos reales sobre la salud humana, y es probable que sea considerablemente más cercano al nivel umbral de los efectos. El valor límite incorpora un factor de incertidumbre adicional para proteger a la población general por un margen.

Para los efectos no cancerígenos asociados a las concentraciones atmosféricas de arsénico se define un LOAEL igual a  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , basado en efectos cardiovasculares y neuropatía periférica en trabajadores. Luego, el NOAEL se estima en  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , basado en el promedio de LOAEL para la población general (factor de 5) y la consideración de los efectos vasculares del arsénico (factor de 10). Finalmente, el valor límite resultante es  $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , basado en un factor de seguridad para tener en cuenta la variación intraespecie (factor de 10).

Sin embargo, las concentraciones ambientales en las proximidades de los sitios de interés se consideran, en casi todos los casos, por debajo de los umbrales críticos de efectos no carcinogénicos para la salud, por lo que estos beneficios no se percibirían en la población afectada según los autores.

Otros posibles beneficios asociados al cumplimiento de los valores límites identificados, pero no cuantificados ni valorizados, incluyen los siguientes:

- reducción de los efectos adversos para la salud debido a la reducción de la exposición a otros metales (como plomo, mercurio, entre otros);
- efectos reducidos de mortalidad y morbilidad debido a reducciones en la exposición a MP10;
- reducción de impactos adversos en ecosistemas y cultivos; y
- exposición ocupacional reducida a contaminantes metálicos cancerígenos (potencialmente importante donde se logra un mejor control sobre las emisiones fugitivas).

Por lo tanto, sobre la base de las consideraciones anteriores, los beneficios cuantificados presentados pueden ser subestimaciones significativas de los beneficios totales. De esto modo, si bien los costos superan los beneficios cuantificables específicos de la reducción de cánceres debido a la exposición al arsénico, cadmio y níquel, habrá otros importantes beneficios ambientales secundarios al mejorar la calidad del aire de estos metales, aunque estos no se hayan podido valorizar.

En la siguiente Tabla 6-5 se resumen los beneficios considerados en la evaluación económica de la propuesta de la Directiva 2004/107/CE. Se observa que en el documento revisado se cuantifica y valoriza el beneficio en reducción de cáncer por inhalación de arsénico, pero no los beneficios por reducción de cáncer u otras enfermedades asociadas a la exposición a otros metales u MP10, donde el impacto en cáncer se valoriza para la población residente cercana a las fundiciones, pero no en los trabajadores de estas; estos últimos beneficios mencionados solo se identifican. Se destaca que, si bien se cuantifica e incluso da un valor monetario a los efectos no cancerígenos por exposición a crónica a arsénico en los residentes, por considerarse que la población beneficiada es muy pequeña para utilizar el método encontrado, no se estima un beneficio total asociado a este efecto. Junto con lo anterior, cabe destacar que no fueron identificados beneficios por reducción de efectos agudos en salud por exposición a arsénico, ni tampoco por reducir la exposición a MP2,5.

**Tabla 6-5 Síntesis de estado de cuantificación y valorización de cada beneficio identificado en la evaluación económica de la Directiva 2004/107/CE**

Motivo	Efecto	Identificación	Cuantificación	Valorización
<b>Exposición crónica a arsénico</b>	Cáncer de pulmón por inhalación en población residente	✓	✓	✓
	Efectos no cancerígenos en población residente	✓	✓	x
	Exposición ocupacional, principalmente por emisiones fugitivas	✓	x	x
<b>Exposición aguda a arsénico</b>	Enfermedades varias	x	x	x
<b>Exposición a otros metales</b>	Enfermedades varias por exposición a plomo, mercurio, entre otros metales	✓	x	x
<b>Exposición a MP10</b>	Enfermedad y morbilidad	✓	x	x
<b>Exposición a MP2,5</b>	Enfermedad y morbilidad	x	x	x
<b>Exposición a arsénico en ecosistemas</b>	Impactos adversos en ecosistemas y cultivos	✓	x	x

Fuente: Elaboración propia

La evaluación económica total se realizó bajo la hipótesis de que la aplicación de las mejores técnicas disponibles (BAT, por su sigla en inglés) en las nueve refineras de cobre más importantes

de la Europa de los 15<sup>68</sup> podía lograr concentraciones máximas en el aire ambiente de entre 10 y 20 ng/m<sup>3</sup>. Por una parte, se estimó en 19 millones de euros anuales el coste de alcanzar el nivel de la franja en el sector del cobre. Por otra parte, los beneficios resultantes del descenso de la mortalidad debido al logro de un nivel de concentración entre 4 y 13 ng/m<sup>3</sup> se calculó equivalente a 0,1 millones de euros al año. Por lo anterior, el estudio concluyó que “en los lugares donde podrían aplicarse técnicas para lograr el cumplimiento, los costes contrarrestaban claramente los beneficios específicos cuantificables”. De hecho, la propuesta estipula en sus objetivos que “no existen medidas rentables para lograr en todo lugar los niveles de concentración que no causen efectos perjudiciales para la salud humana”.

### 6.3 Coeficientes de riesgo unitario para concentración de arsénico en el aire

El efecto crítico a la salud por la exposición al arsénico en el aire es el cáncer de pulmón, y su caracterización se realiza mediante la estimación del riesgo incremental de cáncer que corresponde al incremento en la probabilidad de un individuo de desarrollar cáncer por la exposición a un compuesto cancerígeno. El riesgo de cáncer individual estimado se expresa como el límite superior de la probabilidad de que una persona pueda desarrollar cáncer a lo largo de su vida como resultado de exposición.

Este riesgo pronosticado es el **riesgo incremental de cáncer**<sup>69</sup> a partir de la exposición que se estima está por encima del riesgo base (asociado a problemas no relacionados con los tóxicos del aire) que ya tienen los individuos de la población (US-EPA, 2004). El valor de dosis-respuesta del cáncer por inhalación es obtenido por extrapolación lineal y corresponde al riesgo unitario de cáncer (IUR por su sigla en inglés *inhalation unit risk*). Este se presenta como una estimación del límite superior del exceso de riesgo de cáncer resultante de toda una vida de exposición continua a un agente en una concentración de 1 µg/m<sup>3</sup> en el aire.

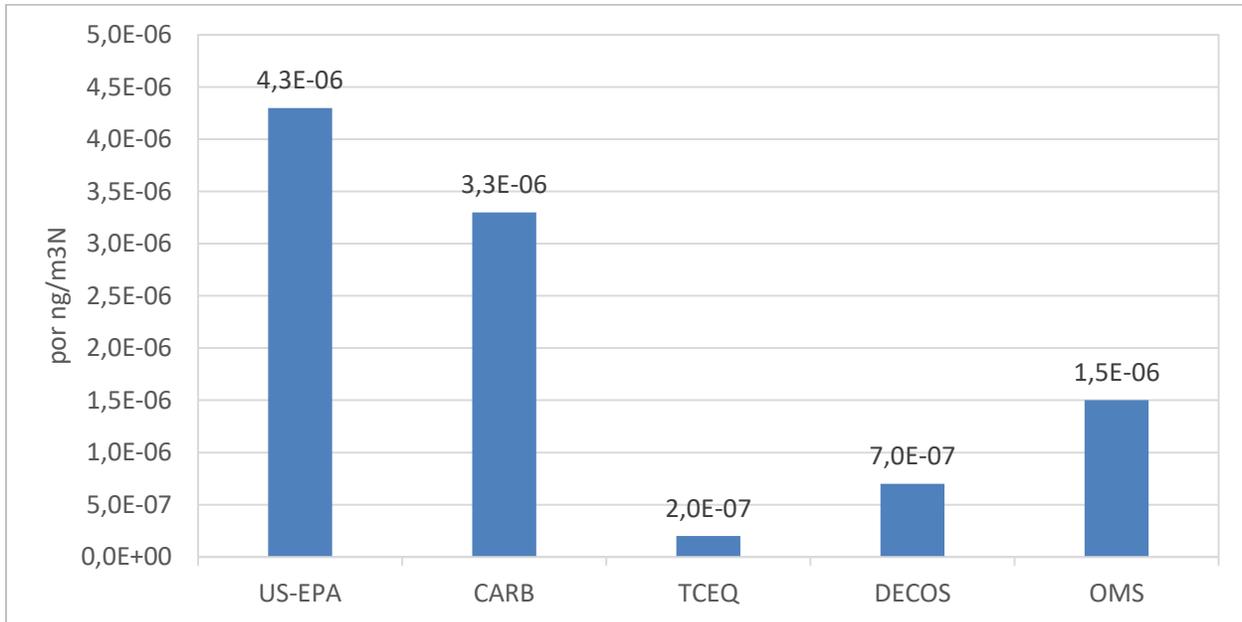
Debido a la naturaleza de las suposiciones en su derivación, los riesgos de IUR generalmente se consideran estimaciones de potencia de "límite superior plausible". Como tal, los riesgos calculados suelen ser una estimación conservadora (US-EPA, 2004).

En la Sección 4.3, tras presentar la evidencia existente de los efectos en salud del arsénico, se presentan coeficientes de riesgo recomendados por diferentes instituciones. Los valores recomendados van entre 0,2e-6 a 4,3e-6 por cada ng/m<sup>3</sup>N adicional de arsénico.

---

<sup>68</sup> La Europa de los 15 incluye Francia, Alemania, Italia, Bélgica, Holanda y Luxemburgo, Dinamarca, Reino Unido, Irlanda, Grecia, España, Portugal, Suecia, Finlandia y Austria.

<sup>69</sup> El Riesgo incremental de cáncer (*incremental lifetime cancer risk*) se define como el nivel de riesgo para compuestos cancerígenos y corresponde al incremento en la probabilidad de un individuo de desarrollar cáncer por la exposición a un compuesto cancerígeno.

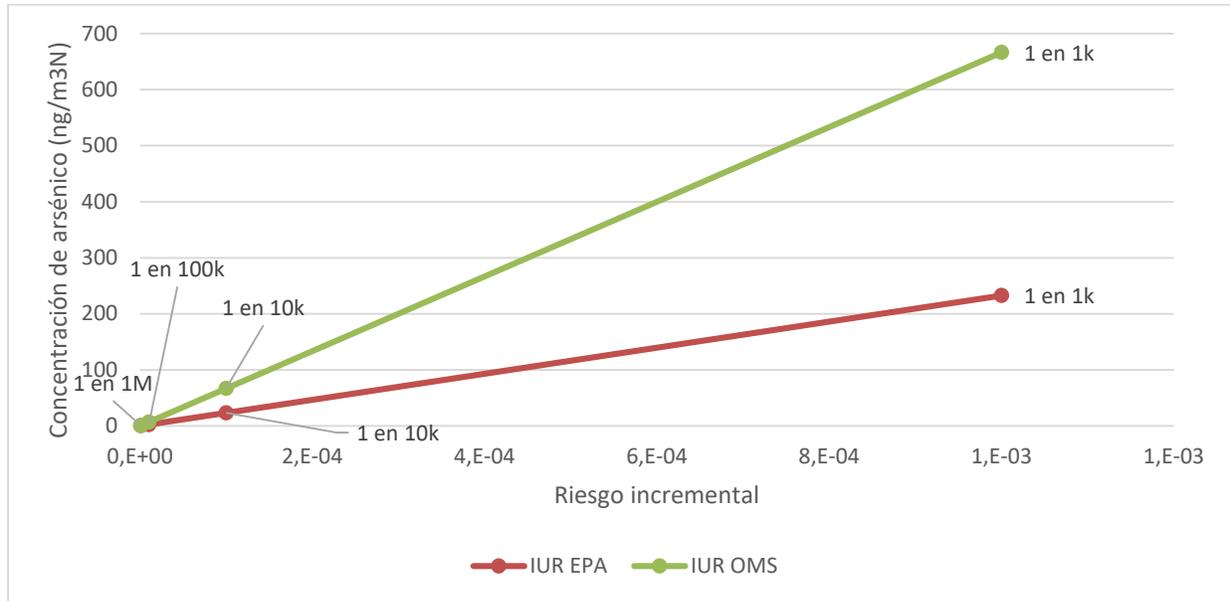


**Figura 6-1 Coeficientes de riesgos para cáncer identificados**

Fuente: Elaboración propia en base a fuentes especificadas en Tabla 4-25

Para los coeficientes considerados esta relación es lineal y se ilustra en la Figura 6-2 para los coeficientes de riesgo de la EPA y de la OMS. De esta forma se observa que para un riesgo dado el coeficiente recomendado por la OMS permite estimar un nivel de concentración ~3 veces mayor ( $4,3/1,5=2,87$ ) que el valor estimado considerando el coeficiente de riesgo de la US-EPA.

Es relevante destacar que para el arsénico ninguno de los antecedentes presentados recomienda un umbral sobre el cual no existe riesgo, sino que la relación entre riesgo y concentraciones de arsénico se considera lineal para cualquier concentración de arsénico en el aire.



**Figura 6-2 Relación entre riesgo incremental y concentraciones de arsénico para coeficientes de riesgo de US-EPA y de la OMS**

Fuente: Elaboración propia

Respecto a cuál valor utilizar para la evaluación a nivel local, se preseleccionan previamente los valores recomendados por la US-EPA y la OMS, pues son presentados por instituciones con amplia reputación cuyas estimaciones se derivan del metanálisis de múltiples estudios. De ellos se selecciona el valor recomendado por la US-EPA por las siguientes razones:

- El valor se deriva de un metanálisis de artículos científicos desarrollados en dos fundiciones de cobres en EE.UU. (US-EPA, 1988). En una de las fundiciones se cuenta con dos estudios que tienen una media geométrica de  $7,2e-6$  por  $ng/m^3N$ , mientras que en la segunda fundición la media geométrica fue de  $2,6e-6$  por  $ng/m^3N$ .
- La actual norma de fundición plantea límites de emisión de arsénico equivalentes a los límites de arsénico establecidos en la normativa de Estados Unidos, los cuales fueron evaluados con dicho valor.
- Los coeficientes de riesgos utilizados para la evaluación de otros riesgos en salud en Chile se han basado tradicionalmente en los valores utilizados por la US-EPA (MMA, 2013b)
- Al tratarse de un valor más alto que el coeficiente de la OMS, es también un valor más conservador evita subestimar el riesgo asociado a un elemento tóxico como el arsénico.

El coeficiente de la OMS también se basa en estudios en fundiciones, actualizando los valores de los estudios utilizados por la US-EPA y complementando con valores desarrollados en una fundición en Suecia (World Health Organisation, 2000). Por esta razón se propone sensibilizar los resultados con este coeficiente de forma de complementar el entendimiento de los resultados del presente estudio.

## 6.4 Metodología para calcular los efectos en salud por la reducción en concentración marginal

La Ecuación 36 presenta la ecuación con que se estima el riesgo de cáncer por inhalación el cual depende del nivel de exposición y el coeficiente de riesgo (IUR). Cabe destacar, que la concentración de arsénico en el aire es considerada como la dosis de exposición inhalatoria. De esta forma, la exposición corresponde directamente al nivel concentración promedio durante toda la vida al que se expone una población. Por su parte, el IUR considerado corresponde a 4,3e-6 (por ng/m<sup>3</sup>N) equivalente al recomendado por la US-EPA (ver Sección 6.3).

$$\text{Riesgo de cáncer} = \text{Concentración promedio de exposición durante la vida} * \text{IUR}$$

### Ecuación 36 Estimación del riesgo de cáncer por inhalación

Si bien la Ecuación 36 permite estimar el riesgo de cáncer incremental individual durante toda la vida frente a una concentración promedio, para la estimación de los efectos en salud en el contexto de la evaluación de la norma de calidad es necesario aproximar al riesgo de cáncer incremental anual. Este riesgo se estima según lo presentado en la Ecuación 37, y es equivalente a dividir el riesgo de cáncer de una persona que durante toda su vida tiene una exposición promedio igual a la concentración anual promedio, por su esperanza de vida. Como antecedente de este último parámetro cabe destacar que el INE estimaba que para el año 1992 la esperanza de vida al nacer era de un hombre era de 71 años, mientras que para una mujer era de 77. De la misma forma para el año 2016 la esperanza de vida al nacer de un hombre era de 77, mientras que para una mujer es de 83 años. Como supuesto se toma una esperanza de vida promedio de 75 años.

$$\text{Riesgo de cáncer de un año} = \frac{\text{Riesgo de cancer (concentración anual promedio)}}{\text{Esperanza de vida}}$$

### Ecuación 37 Estimación de riesgo anual de cáncer por inhalación

Dado que tanto la Ecuación 36 como Ecuación 37 son lineales, y dado que en el caso del arsénico no hay un umbral donde no se observen efectos cancerígenos, se puede estimar la variación del riesgo anual de cáncer a partir de la variación de la concentración anual según la Ecuación 38. En esta ecuación se observa que la variación del riesgo anual de cáncer es proporcional a la variación de la concentración de arsénico en el aire, donde las variaciones son respecto de un escenario contrafactual, usualmente un escenario donde se considera la proyección de las concentraciones anuales promedios sin nuevas medidas de gestión de la calidad del aire.

$$\Delta \text{Riesgo anual de cáncer} = \frac{\Delta \text{Concentración promedio anual} * \text{IUR}}{\text{Esperanza de vida}}$$

### Ecuación 38 Estimación de cambio de riesgo anual de cáncer por cambio en concentraciones

La variación del riesgo anual de cáncer estimado en la Ecuación 38 corresponde a la variación individual, es decir, es la variación en el riesgo para cada una de las personas expuestas. Para estimar los beneficios anuales en términos de variación en el número esperado de casos anuales, es necesario multiplicar el resultado de la Ecuación 38 por la población expuesta. Al respecto se destaca que dada la forma en que se estima el IUR, el cual se estima por una exposición media durante toda la vida, y por la forma en que se aproxima al riesgo anual (ver Ecuación 37), se considera que el riesgo se distribuye uniformemente en toda la población sin hacer distinciones por edad, sexo u otros parámetros.

$$\Delta \text{Casos anuales} = \Delta \text{Riesgo anual de cáncer} (\Delta \text{Concentración}) * \text{Población}$$

### **Ecuación 39 Estimación de cambio en casos anuales por cambios en concentración**

De la Ecuación 22 se desprende una consideración relevante a la hora de interpretar los resultados, al momento de evaluar los beneficios de la norma, a pesar de que las poblaciones tengan un riesgo individual equivalente, los resultados van a estar ponderados por la población expuesta. De esta forma, dos zonas con mismo riesgo individual final pueden tener asociado beneficios diferentes dependiendo tanto del cambio en las concentraciones, y por lo tanto en cambio del riesgo individual, como también del tamaño de la población expuesta.

Para estimar los beneficios anuales de la reducción de la concentración anual, se deben definir el valor unitario de cada uno de los casos evitados. Al respecto, se considera una aproximación a partir del Valor de la Vida Estadística (VVE), estimado a partir de la disposición a pago, ponderado por la esperanza de supervivencia de cáncer pulmonar<sup>70</sup>. Vale destacar que el VVE representa el valor que se asocia a un bien público que en el margen evita un a muerte estadística, de esta forma no implica la valoración de la vida humana, sino que la valoración de riesgos pequeños de muerte (Ministerio de Desarrollo Social, 2017). La forma de cálculo mediante la agregación de riesgos pequeños coincide con la aproximación necesaria para la valoración de la reducción de pequeños riesgos individuales, los cuales se agregan a nivel poblacional.

En línea con los últimos Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) desarrollados por el MMA, el VVE considerado para el año 2022 corresponde a 18.837 UF basado en la mediana del valor estimado por Iragüen & Ortúzar (2004). Por su parte, la esperanza de supervivencia se considera 10,6%, en línea con los presentado por el MINSAL (2018) (ver nota al pie 70). Con estos parámetros se puede estimar el valor unitario de cada caso, por lo que, multiplicándolo por la variación esperada en los casos anuales, se puede obtener el beneficio anual según lo indicado en la Ecuación 40.

---

<sup>70</sup> El efecto crítico para el cual se calcula el IUR corresponde a cáncer pulmonar. Para la esperanza de supervivencia se considera la supervivencia relativa de tumores en órganos respiratorios e intratorácicos (CIE10: C30-C38) reportada en el Plan Nacional de Cáncer 2018-2028 (MINSAL, 2018).

*Beneficio anual*

$$= \Delta \text{Casos anuales } (\Delta \text{Concentración}) * (1 - \text{Esperanza Sobrevida}) * VVE$$

#### **Ecuación 40 Estimación beneficios por reducción en concentración de arsénico**

## **6.5 Escenarios regulatorios propuestos y sus beneficios**

De acuerdo a la Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente (Ley 19.300), una Norma Primaria de Calidad Ambiental (NPCA) “establece los valores de las concentraciones y periodos, máximos o mínimos permisibles de elementos ... cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población” (artículo 2° de la Ley 19.300). De esta forma la NPCA se debe fijar enfocado en el riesgo a la salud de la población del contaminante a normar.

En el caso del arsénico y sus efectos en la salud humana, es necesario tener en cuenta dos consideraciones especiales:

1. El riesgo para los niveles observados de arsénico atmosférico observado (ver Sección 2.3), se asocia a riesgos crónicos de largo plazo.
2. No existe un umbral de concentraciones de arsénico donde no haya riesgo para la salud humana.

La primera consideración tiene como efecto de que la NPCA debe responder a concentraciones de largo plazo, en este sentido y considerando otras normativas chilenas, la NPCA debiera regular concentraciones promedio anuales<sup>71</sup>. De esta forma, dado los riesgos de salud identificados y asociados a los niveles de arsénico atmosféricos (ver Sección 4.3), la NPCA a considerar en los escenarios regulatorios es una norma que regula el promedio de las concentraciones anuales.

Los efectos de la segunda consideración es que los niveles de la NPCA no pueden ser tal que anulen completamente el riesgo para la salud humana. De esta forma, la NPCA para arsénico en lugar de buscar eliminar el riesgo para la salud de la población, establece un nivel tal que su riesgo asociado sea *aceptable*. La definición de *riesgo aceptable* no es única y puede responder a diferentes criterios, aunque una definición usualmente utilizada corresponde a un riesgo que cae bajo una probabilidad definida, por ejemplo,  $1e-6$ <sup>72</sup>.

A nivel nacional no existe una definición del riesgo de cáncer aceptado. Como una referencia se considera el nivel de riesgo asociado a las concentraciones de arsénico permitidas en las normas de agua potable. En la norma actual se permite una concentración de arsénico máxima de 10  $\mu\text{g/L}$ , lo cual considerando el *Drinking Water Unit Risk*<sup>73</sup> recomendado por la US-EPA ( $5e-5$  per

---

<sup>71</sup> Eventualmente podrían ser concentraciones promedios en períodos más largos, los beneficios se estiman de forma análoga.

<sup>72</sup> En la literatura de riesgo en cancerígenos usualmente se usa notación científica para presentar los niveles de riesgo, de esta forma  $1e-6$  corresponde a un riesgo equivalente a  $1/1.000.000$ , es decir, 1 en un millón.

<sup>73</sup> Análogo al IUR en el caso de la exposición atmosférica

ug/L) y supuestos tradicionales de exposición, se traduce en un riesgo de  $2e-4$ . Es decir, en el caso del arsénico en agua potable, el riesgo *aceptado* corresponde a 2 en 10 mil.

En comparación, en Estados Unidos se suele usar como riesgo cancerígeno aceptado entre  $1e-4$  y  $1e-6$ . Considerando el IUR recomendado por la EPA, estos niveles de riesgos *aceptables* son equivalente a un rango de concentraciones de arsénico entre 0,2 y 23,6 ng/m<sup>3</sup>N, lo cual se refleja en los valores que han adoptado los diferentes estados (ver Tabla 6-6). Análogamente, el valor objetivo europeo corresponde a 6 ng/m<sup>3</sup>N, el cual considerando el IUR recomendado por la OMS - más permisivo que el de EPA - representa un nivel de riesgo *aceptable* equivalente cercano a  $1e-5$  o 1 en 100 mil.

**Tabla 6-6 Normas de calidad anual en EEUU y nivel de riesgo equivalente**

País	Estado	Límite (ng/m <sup>3</sup> )	Nivel de riesgo equivalente
Estados Unidos	Carolina del Norte	2,1	$1e-5$
	Luisiana	20	$1e-4$
	Massachusetts	0,2	$1e-6$
	Michigan	2	$1e-5$
	New Hampshire	24	$1e-4$
	Rhode Island	0,2	$1e-6$
	Texas	10	$5e-4$
	Vermont	0,23	$1e-6$
	Washington	0,23	$1e-6$

Fuente: Elaboración propia

Tal como se presenta en la Sección 6.1 actualmente existen normas que se relacionan con la calidad del aire que se mueven en el rango de entre 0,2 ng/m<sup>3</sup> hasta los 50 ng/m<sup>3</sup>. Este rango considera las características propias de cada zona, sus fuentes de emisión y el riesgo considerado aceptable. Se observa que, si bien el grueso de las normativas internacionales se asocia al valor objetivo europeo, 6 ng/m<sup>3</sup>, en general estas normativas no funcionan como una NPCA absoluta, pues en general presentan condiciones de flexibilidad. En particular, la directiva europea que da pie a los valores objetivos utilizados como referencia en gran parte del resto de las regulaciones, explícita en su considerando número 5 que:

*“Los valores objetivos no exigirán medidas que supongan costos desproporcionados. En lo que respecta a las instalaciones industriales, dichos valores no implicarán la adopción de medidas que vayan más allá de la aplicación de las mejores técnicas disponibles (BAT), tal como establece la Directiva 96/6/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación y, en particular, o conducirán al cierre de ninguna instalación. Ahora bien, exigirán que los Estados miembros adopten todas las medidas de reducción rentables necesarias en los sectores afectados”* - Directiva 2004/107/CE (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004).

De la misma forma el Considerando siguiente de la misma norma (Considerando n°6) explícita que los *“los valores objetivos de la presente Directiva no se consideran normas de calidad medioambiental ... (las cuales) requieren condiciones más estrictas que las alcanzables mediante*

*la aplicación de las BAT*” (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004). Flexibilidades como la recién mencionada son parte de las diferentes regulaciones internacionales, observándose también en lugares como China que, al igual que Europa, también tienen fundiciones de Cobre. Se observa que otros lugares con fundiciones de cobre, notablemente en Estados Unidos, se ha optado por establecer normas de emisiones y exigencias tecnológicas a las fundiciones de cobre observándose NPCA sólo en estados que no cuentan con este tipo de industrias.

Con estos antecedentes conviene volver a observar la situación base, correspondiente a la concentración proyectada en un escenario con la misma regulación vigente. Esta proyección considera el aumento de emisiones proyectado en la Sección 3.4, y la relación emisión concentración estimada en la Sección 5.1.6. La proyección presentada en la Figura 6-3 corresponde a los niveles esperados para el 2035 y distingue el aporte basal estimado estadísticamente según lo descrito en la Sección 5.1.6. A cada localidad presentada se le asigna una estación, privilegiando las estaciones con representatividad de MP10, y aquellas que tengan los valores más altos de concentración de arsénico el año 2020.

Se observa que la situación es variada en las diferentes localidades presentadas, tanto en términos de concentración total proyectada y a la contribución basal. De esta forma se observa localidades, como ChiuChiu, El Salvador o Coya con niveles de concentración de arsénico similares al valor objetivo de la UE. En el caso contrario, Calama, La Negra, Copiapó y Quintero superan en 6 veces el valor objetivo de la UE. Más aún hay localidades donde sólo el aporte basal estimado supera los niveles de valor objetivo, por lo que incluso sin el efecto de las fuentes emisoras no se alcanzaría el nivel de calidad atmosférica objetivo de la UE.

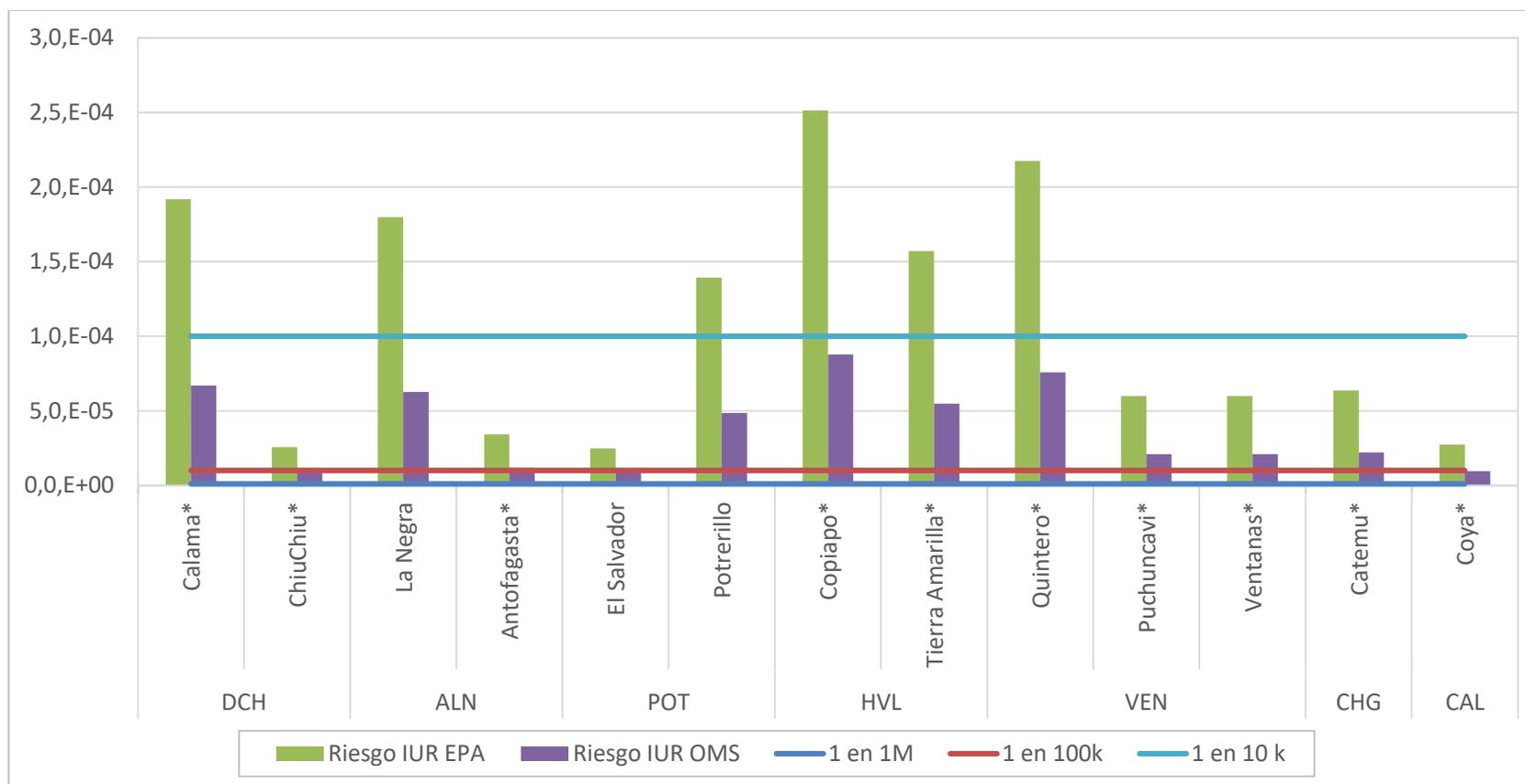


\* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10

**Figura 6-3 Proyección base de concentración de Arsénico en MP10 [ng/m3N] al 2035**

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6-4 se presenta la equivalencia en término de riesgo de las concentración proyectadas presentadas en la Figura 6-3. Se observan los riesgos estimados con el IUR de la US-EPA y de la OMS, comparando contra estándares de  $1e-6$  (1 en 1M),  $1e-5$  (1 en 100k) y  $1e-4$  (1 en 10k). Se observa que para el IUR recomendado por la EPA los valores de riesgos esperados oscilan entre  $2,5e-5$  (2,5 en 100 mil) y  $2,5e-4$  (2,5 en 10 mil), mientras que con el IUR de la OMS el riesgo oscila entre  $1e-5$  y  $1e-4$ . Cabe destacar que una parte relevante del riesgo proyectado responde al riesgo asociado a la contribución basal, pero que según lo observado en la Figura anterior varía de forma relevante entre las diferentes localidades.



\* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10

**Figura 6-4 Riesgo incremental individual de cáncer para proyección base 2035**

Fuente: Elaboración propia

### 6.5.1 Escenarios regulatorios

En vista de los antecedentes de los niveles proyectados de riesgo base, los niveles y riesgos asociados en normas y valores objetivos internacionales, así como los antecedentes nacionales se proponen tres escenarios normativos, que regulan la concentración anual promedio de arsénico como una forma de controlar efectos crónicos sobre la salud de la población. De las regulaciones internacionales, se destaca la regulación europea, que tal como se ha presentado anteriormente no establece una NPCA, sino que un valor objetivo el cual entrega cierta flexibilidad basado en la capacidad de alcanzar el valor objetivo sin “costes desproporcionados” o que “conduzcan al cierre de ninguna instalación” (Directiva 2004/107/CE).

La amplia variedad de las concentraciones observadas en las diferentes zonas del país, así como de la contribución basal estimada en cada localidad, dificulta el establecimiento de niveles límites homogéneos para todo el territorio. De esta forma, un nivel de exigencia alto, comparable con los valores objetivos europeos, sólo podrían alcanzarse con esfuerzos muy significativos de las fundiciones de cobre de las zonas, incluyendo posibles reducciones de operación. Este tipo de esfuerzos, incluso podría ser insuficiente considerando que, en la estimación estadística de la contribución basal, se estimaron aportes basales superior al valor objetivo europeo. Lo mismo sucede con valores aún más ambiciosos como los observados en algunas de las regulaciones de estados de los Estados Unidos, donde su cumplimiento se ve beneficiado por tratarse de zonas sin fundiciones y con niveles basales de arsénico más bajos que los chilenos.

Adicionalmente a lo anterior, los valores límites a establecer en una NPCA se asocian a los efectos del contaminante en la salud de la población expuesta. Dado que el arsénico no cuenta con un umbral de concentración en el que no tenga efecto en la salud, la definición del valor límite guarda relación con cuál es el nivel de riesgo aceptado. De esta forma un valor límite más exigente se refleja en una mayor protección de la salud de la población expuesta.

De esta forma, los escenarios normativos se diferencian sólo por el límite establecido, los cuales se relacionan con un determinado riesgo incremental *aceptable*. En particular los escenarios son:

- Escenario 2 en 10k (46,6): Escenario donde el riesgo incremental aceptado es equivalente a  $2e-4$ , es decir, 2 casos en 10k durante toda la vida. Este escenario implica un riesgo incremental de cáncer similar al aceptado en las concentraciones de arsénico permitidas en el agua potable. Este riesgo incremental es equivalente a una concentración promedio anual de 46,6 ng/m<sup>3</sup>N de arsénico en MP10, considerando el IUR de la US-EPA.
- Escenario 1 en 10k (23,3): Escenario donde el riesgo incremental aceptado es equivalente a  $1e-4$ , es decir, 1 caso en 10k durante toda la vida. Este escenario implica un nivel de riesgo incremental similar a la parte alta del rango del riesgo aceptado normalmente en EE.UU. Este riesgo incremental es equivalente a una concentración promedio anual de 23,3 ng/m<sup>3</sup>N de arsénico en MP10, considerando el IUR de la US-EPA.
- Escenario contribución limitada (15,0): Escenario de mayor ambición donde la contribución de las fundiciones es limitada. Para estimar el valor límite homogéneo se

consideró que las contribuciones basales más altas están en torno a 9 ng/m<sup>3</sup>, sobre lo cual se consideró el valor objetivo de la normativa europea, alcanzando una concentración promedio anual permitida de 15 ng/m<sup>3</sup>. El resultado de esta norma, es que en aquellas zonas cuya contribución basal sea de 9 ng/m<sup>3</sup>, el aporte de las fuentes de emisión no pueda superar el valor objetivo europeo. Los 15 ng/m<sup>3</sup> representan un riesgo incremental aceptado equivalente a 6,7e-5, es decir, 0,67 casos en 10k durante toda la vida

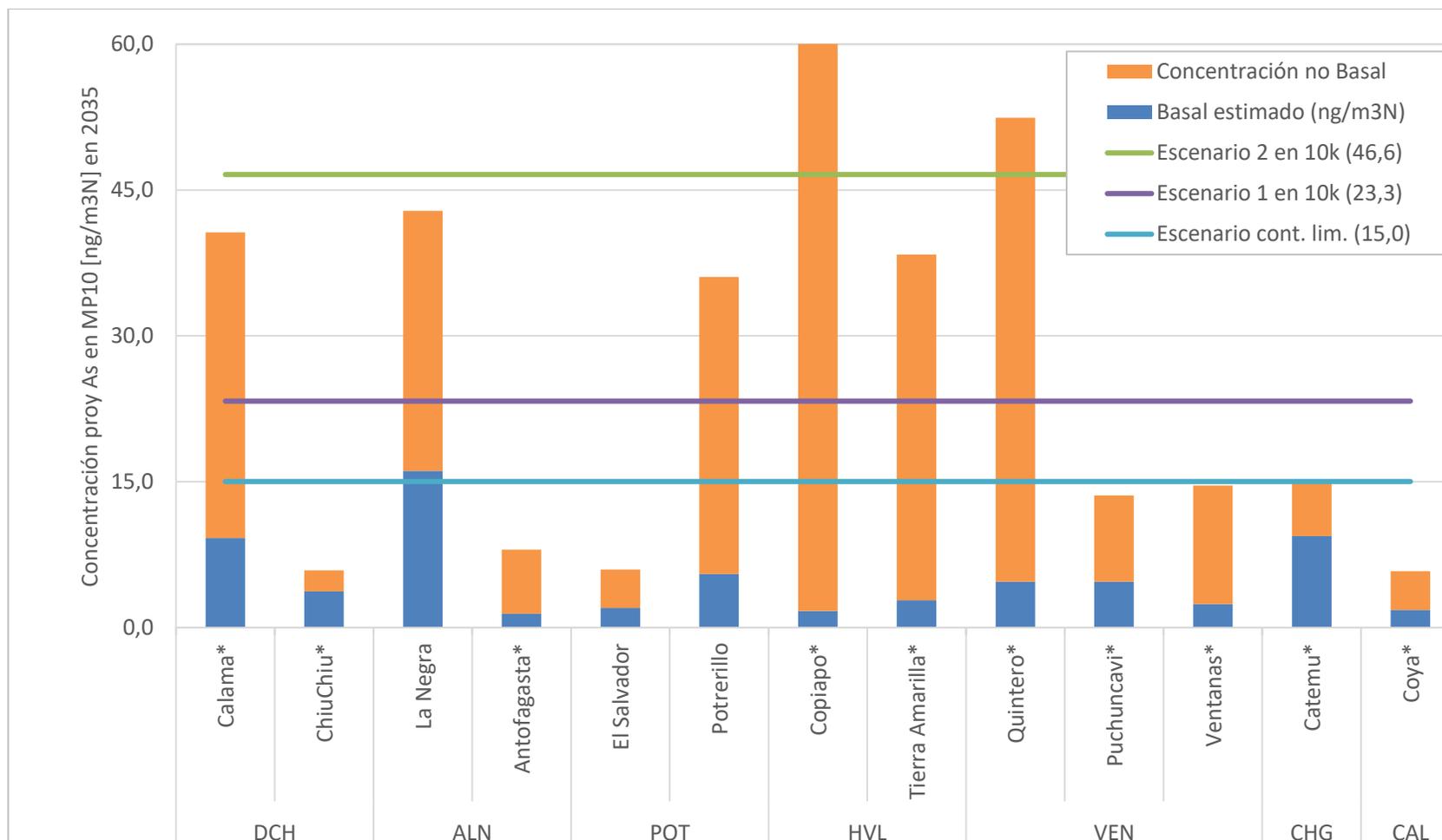
Se destaca que el diseño del modelo de evaluación de los diferentes escenarios normativos fue creado, para facilitar la exploración de otras alternativas, incluyendo alternativas actualmente no disponibles en la regulación chilena, como considerando flexibilidad y/o valores diferenciados según localidad.

Los escenarios regulatorios propuestos pueden ser observados gráficamente en la Figura 6-5. En ella se observa que para el escenario 2 en 10k, sólo dos localidades superarían la norma: Copiapó y Quintero. Por su parte, para el escenario 1 en 10k, se suman las localidades de Calama, La Negra, Potrerillo y Tierra Amarilla. De estas, cabe destacar que Potrerillo, representada por las concentraciones medida en la estación CAP, y La Negra, por su estación Inacal, no tienen representatividad poblacional de MP10. En el último escenario, se suman las localidades de Catemu, además de ser más exigente en los cambios requeridos en términos de concentraciones de As en MP10.

Respecto a la evaluación de la superación de la norma se recomienda mantener los objetivos de calidad de los datos y requisitos de los mismos establecidos en el Anexo IV de la Directiva 2004/107/CE (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004). En ella se plantea que los valores de arsénico se deben desprender desde el análisis de la fracción de MP10<sup>74</sup>, con una normalización de los valores para un volumen de muestreo a condiciones ambientales. Asimismo, las mediciones deben ser tal que se cumpla con un 95% de la incertidumbre expandida para la media anual, conforme a la norma "ISO 11222:2002 – *Determinación de la incertidumbre en medias temporales para mediciones de calidad del aire*", proponiéndose un valor objetivo de 50% de mediciones, distribuidas equilibradamente durante el año para evitar el sesgo de los datos. Lo anterior es equivalente a toma de muestras cada dos días. Sin perjuicio del valor objetivo, se da la posibilidad de que las muestras sean menos, en la medida que se cumple el objetivo de incertidumbre del valor medio, y el número sea mayor a 14% equilibradas durante el año, es decir, cerca de 1 medición semanal. Asimismo, se solicita que la recogida de datos válidos sea superior al 90% de las muestras.

---

<sup>74</sup> La metodología utilizada para la medición de arsénico en MP10 corresponde a la espectroscopía de absorción atómica, normada por el método estándar 3050B de la US-EPA código 3114B, o el método estándar TMECC 04.14, 2001 y TMECC 04.12-B del US Composting Council.



\* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10

**Figura 6-5 Escenarios regulatorios propuestos**

Fuente: Elaboración propia

Considerando la forma de medición anterior, así como el efecto de largo plazo de la exposición del contaminante, se propone que se entienda la norma como sobrepasada cuando el promedio trianual de las concentraciones anuales sea mayor que el valor límite anual propuesto, en cualquiera de las estaciones calificada como EMRP para MP10 y/o MP2,5. De la misma forma, respecto a los sitios de medición se sugiere mantener los mismos criterios utilizados para el MP10 y/o MP2,5, bajo la lógica que el As atmosférico es parte de ellos.

Respecto a posibles valores críticos que deriven en situaciones de emergencia ambiental, se destaca que el arsénico es una sustancia la cual, en el orden de magnitud que se encuentra normalmente en Chile, tiene efectos crónicos sin observarse episodios agudos. Si bien, es posible que niveles anormalmente altos puedan tener consecuencias agudas, estos debieran ser controlados por los episodios críticos de MP10 y/o MP2,5, de los cuales el arsénico forma parte. Cabe destacar que alcanzar niveles de arsénico tan altos, requeriría no sólo de condiciones meteorológicas particularmente adversas, sino que también de alguna falla o una eventualidad puntual en las fuentes emisoras que resultará en una emisión anormal, lo cual por su naturaleza no es posible de pronosticar con la exactitud requerida para prever situaciones de emergencia ambiental. Aun así, como un valor de referencia para considerar una eventual situación crítica, se propone como referencia un valor de 300 ng/m<sup>3</sup>, utilizado como referencia de norma diaria en dos estados en Canadá, basado en posibles efectos no cancerígenos del arsénico sobre la salud humana.

### 6.5.2 Evaluación de beneficios

La evaluación de los beneficios de una NCPA en general se realiza a partir de la comparación entre un caso contrafactual y un escenario regulatorio, donde las concentraciones del contaminante que superan los niveles alcanzan el nivel precisado por el escenario regulatorio. Este diferencial en las concentraciones implica cambios en (ver Sección 6.4):

- (1) Niveles de riesgos individuales
- (2) Riesgo poblacional (casos evitados esperados)
- (3) Beneficios valorizados

En línea con los análisis de impacto regulatorio (RIA) desarrollados a nivel internacional<sup>75</sup>, se realiza un enfoque temporal asado en un año de evaluación. Con este enfoque se comparan los beneficios de un año con los costos anualizados asociados a la implementación del escenario regulatorio, donde el año a seleccionar corresponde a un año donde se haya alcanzado los niveles descritos en la normativa.

---

<sup>75</sup> En el “Estudio de metodologías para la evaluación de normas de calidad y complemento a estimación de beneficios en salud derivados de la contaminación atmosférica” (GreenLab, 2018) desarrollado para el MMA, se estudian 11 análisis internacionales, de los cuales 9 utilizan un año de referencia donde la norma ya este implementada en lugar de un horizonte de evaluación continuo.

Al respecto, si bien el método de flujos y valor presente es más informativo en la medida que plantea un cronograma de implementación de las medidas, es también más intensivo en el uso de recursos, e incorpora incertidumbres adicionales asociadas a supuestos de modelación, tales como la definición del horizonte de evaluación y tiempos de implementación de las medidas necesarias. En contraste un enfoque como el propuesto, permite obtener resultados igualmente válidos, pero con menor dependencia de los supuestos de modelación. En la evaluación de las NPCA este enfoque tiene aún más sentido en la medida que no se conocen a priori las medidas y cronograma de implementación, a diferencia de, por ejemplo, un plan de descontaminación.

En particular, para el presente estudio se considera como año de referencia para la evaluación el 2035, que corresponde al último año con una proyección de inventario. Asimismo, considerando los tiempos regulatorios y de implementación de las medidas, parece un horizonte razonable para que se hayan establecidos los límites, impulsados los instrumentos que apunten al cumplimiento de los niveles, diseñado el detalle e implementado las medidas necesarias para dar cumplimiento a los escenarios regulatorios.

De esta forma los beneficios presentados a continuación corresponden a los beneficios anuales para un año de referencia donde las exigencias de los diferentes escenarios normativos ya fueron alcanzadas, que se representa como el año 2035. En la Tabla 6-7 se presentan las proyecciones para el año de referencia de los diferentes escenarios regulatorios, incluyendo la proyección base.

Se observa que el hecho de que una localidad supere la norma propuesta, tiene efecto sobre otras localidades que se ven influenciadas por la misma fuente. Por ejemplo, la localidad de Calama en el escenario 1 en 10k, supera el nivel propuesto por la norma de 23,3 ng/m<sup>3</sup>N. Alcanzar este nivel implica una reducción de la concentración de 17,4 ng/m<sup>3</sup>N, lo cual se lograría reduciendo las emisiones en la zona las cuales también tienen efecto en la calidad del aire de otra localidad en la zona: ChiuChiu. De esta forma, ChiuChiu también tiene una reducción en sus concentraciones proyectadas (1,2 ng/m<sup>3</sup>N), a pesar de que cumplía con los niveles de arsénico exigidos en el escenario regulatorio. Esta situación se repite en Copiapó-Tierra Amarilla, en Quintero-Puchuncaví/Ventanas y en Catemu-Panquehue/Llayllay. Otros casos de interés corresponden a aquellos casos donde se supera la norma en localidades sin estación con representatividad, como en La Negra y Potrerillo. Ante la falta de representatividad se considera que estas zonas no se verían afectadas por la NPCA. Sin perjuicio de esto, la modelación anexa trae como posibilidad considerar estas estaciones en futuros análisis.

**Tabla 6-7 Concentraciones [ng/m<sup>3</sup>N] de arsénico en MP10 proyectadas en el año de referencia para escenarios normativos**

Localidades	Proyección			
	Base	Esc 2 en 10k	Esc 1 en 10k	Esc Cont lim
<b>Valor límite</b>	<b>n/a</b>	<b>46,6</b>	<b>23,3</b>	<b>15,0</b>
Calama*	40,7	40,7 (-)	23,3 (-17,4)	15,0 (-25,7)
ChiuChiu*	5,9	5,9 (-)	4,7 (-1,2)	4,1 (-1,8)
La Negra	42,9	42,9 (-)	42,9 (-)	42,9 (-)
Antofagasta*	8,0	8,0 (-)	8,0 (-)	8,0 (-)
El Salvador	5,9	5,9 (-)	5,9 (-)	5,9 (-)
Potreriillo	36,1	36,1 (-)	36,1 (-)	36,1 (-)
Copiapó*	60,8	46,6 (-14,2)	23,3 (-37,5)	15,0 (-45,8)
Tierra Amarilla*	38,4	30,0 (-8,4)	16,1 (-22,2)	11,2 (-27,2)
Quintero*	52,4	46,6 (-5,8)	23,3 (-29,1)	15,0 (-37,4)
Puchuncaví*	13,6	12,5 (-1,1)	8,2 (-5,4)	6,6 (-6,9)
Ventanas*	14,6	13,1 (-1,5)	7,2 (-7,4)	5,1 (-9,5)
Catemu*	15,0	15,0 (-)	15,0 (-)	15,0 (0,0)
Panquehue**	5,8	5,8 (-)	5,8 (-)	5,8 (0,0)
Llayllay**	3,2	3,2 (-)	3,2 (-)	3,2 (0,0)
Coya*	6,6	6,6 (-)	6,6 (-)	6,6 (-)

Nota: En paréntesis se muestra la reducción alcanzada respecto del escenario base

\* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10

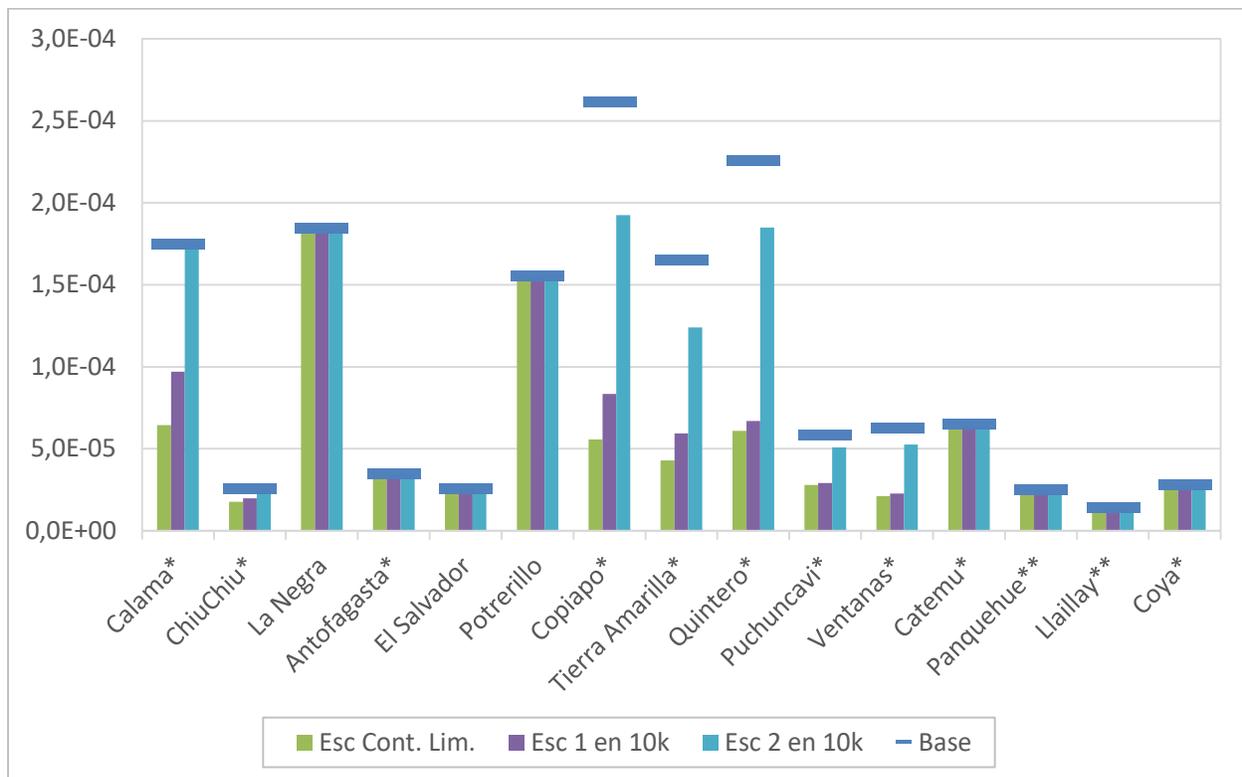
\*\* Localidad no cuenta con mediciones de As, resultados provienen sólo de la modelación de dispersión

Fuente: Elaboración propia

### Cambios en riesgos individuales

La variación en los niveles de arsénico se pueden asociar a una variación en los riesgos incrementales individuales de cáncer, de acuerdo a lo planteado en la Ecuación 36. En la Figura 6-6 se presentan los riesgos estimados para cada uno de los escenarios en comparación con los niveles de riesgo asociados a la proyección base presentados como una línea horizontal para cada localidad, y que son los mismos a los presentados en la Figura 6-4 calculados considerando el IUR recomendado por la US-EPA.

Se observa que los principales cambios de riesgo se observan en la zona de Copiapó/Tierra Amarilla, seguido por Quintero/Puchuncaví/Ventanas. En la Tabla 6-8 se puede observar que la variación en el riesgo en los escenarios más ambiciosos pueden ser del orden de 1e-4. Asimismo, se observa que algunas zonas no tendrían variaciones en sus niveles de riesgo individuales, al respecto cabe destacar que mientras Coya está por debajo de los niveles propuesto, las localidades de La Negra y Potrerillos no tienen variaciones por no contar con representatividad poblacional. De contar con representatividad poblacional, la reducción del riesgo individual se daría también en las otras localidades afectadas por las fuentes de emisión, es decir, en Antofagasta y El Salvador. Se destaca, que estas dos últimas localidades cumplen con los límites propuestos en todos los escenarios normativos.



\* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10

\*\* Localidad no cuenta con mediciones de As, resultados provienen sólo de la modelación de dispersión

**Figura 6-6 Riesgo individual incremental por escenario y comparación con proyección base, para años referencial**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-8 Variación en los niveles de riesgo para escenarios normativos, para año referencial**

Localidad	Escenario 2 en 10k (46,6)	Escenario 1 en 10k (23,3)	Escenario cont. lim. (15,0)
Calama*	-	7,8E-05	1,1E-04
ChiuChiu*	-	5,4E-06	7,6E-06
La Negra	-	-	-
Antofagasta*	-	-	-
El Salvador	-	-	-
Potrerillo	-	-	-
Copiapó*	6,9E-05	1,8E-04	2,1E-04
Tierra Amarilla*	4,1E-05	1,1E-04	1,2E-04
Quintero*	4,1E-05	1,6E-04	1,6E-04
Puchuncaví*	7,5E-06	2,9E-05	3,0E-05
Ventanas*	1,0E-05	4,0E-05	4,2E-05
Catemu*	-	-	2,9E-06
Panquehue**	-	-	3,0E-06
Llaylay**	-	-	1,7E-06
Coya*	-	-	-

\* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10

\*\* Localidad no cuenta con mediciones de As, resultados provienen sólo de la modelación de dispersión

Fuente: Elaboración propia

### **Cambios en riesgo poblacional**

En la Tabla 6-9 se presenta el riesgo poblacional de cada uno de los escenarios, el cual se expresa en el número de casos estadísticos esperados de cáncer por exposición de la población a los niveles de concentración de arsénico proyectados. Estos valores se estiman de forma análoga a la Ecuación 39, donde se relacionan los niveles observados de arsénico, el IUR, la esperanza de vida y la población expuesta.

Para estimar la población se consideró el reporte del INE respecto a la población censada en 2017 en las “Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos” (INE, 2019a). Esta población fue proyectada hasta el año 2035 considerando la tasa de crecimiento poblacional comunal implícita en las proyecciones oficiales del INE (2019b) las cuales proyectan la población comunal hasta el año 2035. Se destaca que de las localidades identificadas, Potrerillo no tendría población asociada (INE, 2019a).

De los resultados presentados en la Tabla 6-9 se observa que la diferencia entre los distintos resultados se explica más por la variación en la población expuesta que por el delta de concentraciones. Por ejemplo, se observa que Antofagasta pese a tener una variación comparativamente menor en los niveles de arsénico (ver Tabla 6-7) representa una fracción relevante de los beneficios en términos de casos esperados evitados.

**Tabla 6-9 Riesgo poblacional proyectado por escenario para año referencial, en casos esperados por año**

Localidad	Población proy 2035 (hab)	Base 2035	Escenario 2 en 10k (46,6)	Escenario 1 en 10k (23,3)	Escenario cont. lim. (15,0)
Calama*	184.185	0,43	0,43	0,25	0,16
ChiuChiu*	376	0,00	0,00	0,00	0,00
La Negra	405	0,00	0,00	0,00	0,00
Antofagasta*	430.521	0,20	0,20	0,08	0,03
El Salvador	5.397	0,00	0,00	0,00	0,00
Potrerrillo	0	-	0,00	0,00	0,00
Copiapó*	166.759	0,58	0,45	0,22	0,14
Tierra Amarilla*	10.167	0,02	0,02	0,01	0,01
Quintero*	34.078	0,10	0,09	0,05	0,03
Puchuncaví*	6.645	0,01	0,00	0,00	0,00
Ventanas*	10.482	0,01	0,01	0,00	0,00
Catemu*	8.897	0,01	0,01	0,01	0,01
Panquehue**	4.311	0,00	0,00	0,00	0,00
Llayllay**	20.124	0,00	0,00	0,00	0,00
Coya*	3.386	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Total</b>	<b>885.735</b>	<b>1,36</b>	<b>1,21</b>	<b>0,63</b>	<b>0,39</b>

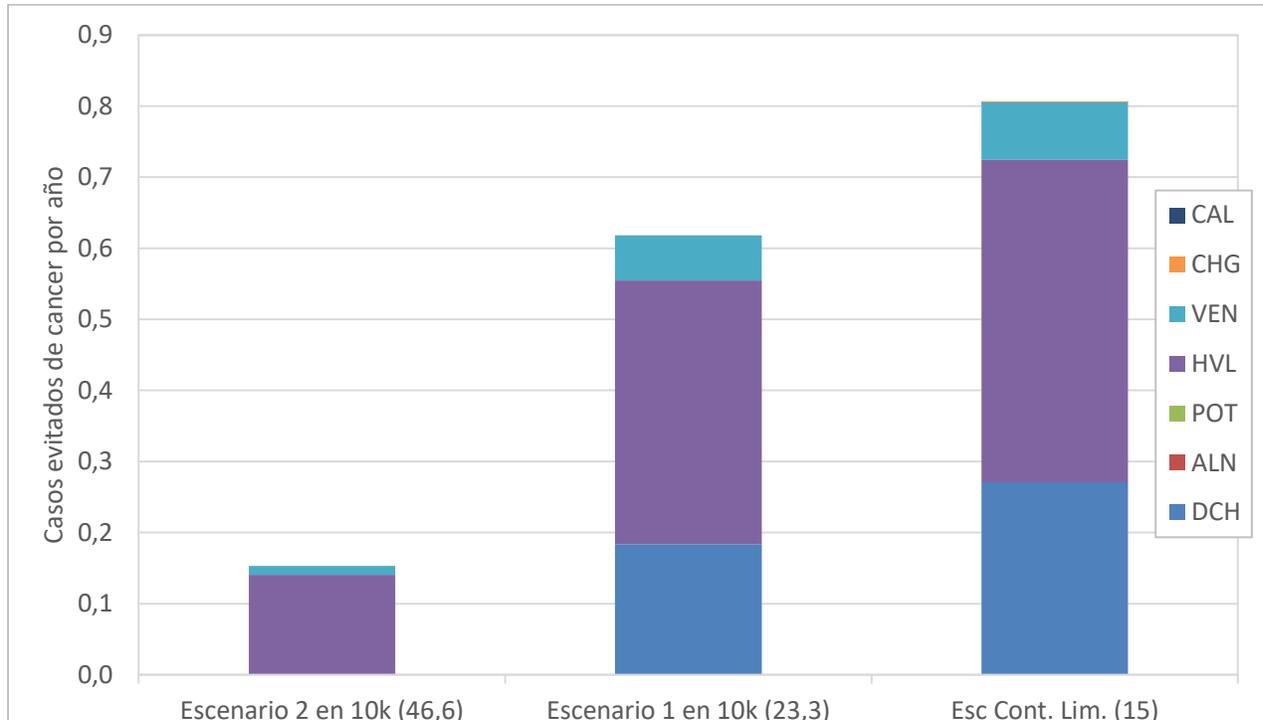
\* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10

\*\* Localidad no cuenta con mediciones de As, resultados provienen sólo de la modelación de dispersión

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6-7 se presenta la distribución de los beneficios entre las diferentes zonas, observándose que la mayor parte de los casos evitados se asocia a la zona afectada por la fundición HVL en todos los escenarios regulatorios. En los escenarios más ambiciosos el aporte de Chuquicamata también es relevante, fundamentalmente por el tamaño de la población expuestas en estas zonas.

Se destaca que en los alrededores de la fundición Ventanas, a pesar de representar una de las zonas con los principales cambios en términos de concentraciones y riesgo individual, los casos evitados son una fracción menor del total, lo cual se asocia a una población expuesta menor. Bajo esta lógica, si La Negra contará con representatividad poblacional, es esperable que se observen beneficios relevantes como consecuencia del efecto en una población comparativamente importante como Antofagasta, la cual representa cerca de la mitad de la población total expuesta. El caso contrario ocurre con Potrerillo-El Salvador, donde la baja población expuesta (menos del 1% de la población expuesta) resultaría en una cantidad comparativamente baja de casos evitados.



**Figura 6-7 Distribución de la reducción del riesgo poblacional por escenario para año referencial, en casos anuales esperados**

Fuente: Elaboración propia

### Beneficios valorizados

En la Tabla 6-10 se presenta la valorización de los beneficios anuales para cada uno de los tres escenarios regulatorios con el detalle para cada una de las localidades analizadas. Se observa que el escenario 1 en 10k tiene 4 veces más beneficios que el escenario 2 en 10k, mientras que el tercer escenario presenta beneficios aún mayores en torno a las 13,5 mil UF/año. Al observar el efecto distributivo entre las localidades, se observa que los principales beneficios se darían en Copiapó, que en el escenario 2 en 10k representa el 88% de los beneficios, mientras Quintero tendría un 7% de los beneficios. En el escenario 1 en 10k los beneficios estimados se reparten principalmente entre Copiapó (58%) Calama (30%) y Quintero (9%), mientras que en el tercer escenario la mayor parte de los beneficios se distribuyen en las mismas localidades: Copiapó (54%), Calama (34%) y Quintero (9%).

**Tabla 6-10 Valorización de los beneficios anuales [UF/año] asociados a los escenarios de NPCA para el año de referencia**

Localidad	Esc. 2 en 10k (46,6)	Esc. 1 en 10k(23,3)	Esc Cont. Lim. (15)
Calama*	-	3.087	4.563
ChiuChiu*	-	0	1
La Negra	-	-	-
Antofagasta*	-	-	-
El Salvador	-	-	-
Potrerrillo	-	-	-
Copiapó*	2.283	6.034	7.371
Tierra Amarilla*	83	218	267
Quintero*	192	959	1.232
Puchuncaví*	7	35	45
Ventanas*	15	75	96
Catemu*	-	-	0
Panquehue**	-	-	0
Llayllay**	-	-	0
Coya*	-	-	-
<b>Total</b>	<b>2.580</b>	<b>10.408</b>	<b>13.573</b>

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6-11 se presentan los resultados del beneficios de haber considerado el IUR de la OMS en lugar del IUR recomendado por la US-EPA. Se observa que son 2,87 veces menores, manteniendo su distribución entre escenarios y localidades. El factor 2,87 viene de la relación entre ambos IUR donde el valor recomendado por la US-EPA es 2,87 veces mayor que el valor recomendado por la OMS (ver Sección 6.3).

**Tabla 6-11 Sensibilización de los beneficios anuales [UF/año] para el año de referencia al parámetro IUR**

Localidad	Esc. 2 en 10k (46,6)	Esc. 1 en 10k(23,3)	Esc Cont. Lim. (15)
Calama*	-	1.077	1.592
ChiuChiu*	-	0	0
La Negra	-	-	-
Antofagasta*	-	-	-
El Salvador	-	-	-
Potrerrillo	-	-	-
Copiapó*	796	2.105	2.571
Tierra Amarilla*	29	76	93
Quintero*	67	335	430
Puchuncaví*	2	12	16
Ventanas*	5	26	33
Catemu*	-	-	0
Panquehue**	-	-	0
Llayllay**	-	-	0
Coya*	-	-	-
<b>Total</b>	<b>900</b>	<b>3.631</b>	<b>4.735</b>

Fuente: Elaboración propia

## 7. Evaluación de costos de propuestas regulatorias

En esta Sección se presenta la evaluación de costos de las tres alternativas de propuesta regulatorias analizadas. En particular, en la Sección 7.1 se detallan los costos unitarios de las tecnologías de mitigación que se podrían implementar para el cumplimiento de la norma, en la Sección 7.2 se detallan las principales variables operacionales con incidencia en las emisiones, para luego en la Sección 7.3 presentar la estimación de costos y beneficios de las tres alternativas regulatorias propuestas.

### 7.1 Costos de tecnologías para la reducción de emisión

A continuación se detalla el procedimiento seguido para la identificación y selección de las tecnologías de abatimiento a ser analizadas (ver Sección 7.1.1), y luego se presenta la metodología y resultados de la estimación de costos unitarios para cuatro tipos de costos identificados: inversión, operación y mantenimiento, detención por implementación de medidas de abatimiento, y por reducción del nivel de producción para dar cumplimiento a la NPCA propuesta para el arsénico, en la Sección 7.1.2.

#### 7.1.1 Identificación y selección de tecnologías

Para la identificación y selección de tecnologías de mitigación disponibles para ser implementadas, se tienen en consideración los tipos de fuentes emisoras a ser abordadas. Las emisiones de las fundiciones pueden clasificarse en dos grandes grupos: fuentes puntuales; y fuentes fugitivas, cada una de estas son asociadas a diferentes procesos unitarios detallados en la Sección 5.1 del Informe Complementario sobre la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico<sup>76</sup>.

Considerando dichos procesos unitarios, se realizó una revisión en la literatura nacional e internacional de las medidas de abatimiento de emisiones disponibles para ser implementadas en las fundiciones, tanto para fuentes puntuales como fugitivas. En particular se dio prioridad a los antecedentes locales, por estar mejor ajustados a la realidad nacional, las características de los concentrados y también de las fundiciones en sí.

Siguiendo los lineamientos de la US-EPA<sup>77</sup>, se compararon las siete fundiciones entre sí, para identificar medidas y tecnologías que las mismas fundiciones hayan implementados, que no necesariamente se hayan aplicado en todas ellas. La ventaja de este primer enfoque es que se identifican acciones que ya se han tomado en Chile, es decir que bajo ciertas condiciones son factibles, a la vez que ya existe un aprendizaje de su implementación, que puede ser utilizado si se deciden replicar en otras fundiciones. De la misma forma, es esperable que haya antecedentes

---

<sup>76</sup> Los resultados de la distribución de emisiones de las fundiciones por proceso unitario se presentan en el Anexo Digital D - Inventarios y Complementos.

<sup>77</sup> Siguiendo lineamientos para la identificación de *Best Available Technologies* (BAT)

de costos disponibles localmente, pudiendo contar con mejores estimaciones de los costos. En el Informe Complementario sobre la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico, en la Sección 4.2, se presenta el detalle de los proyectos y medidas implementadas para dar cumplimiento al D.S. 28/2013 del MMA por cada fundición, según la etapa en la que tienen incidencia.

Entre los diferentes antecedentes complementarios revisados se destacan los documentos asociados a la nueva propuesta de norma de emisión para fundiciones de cobre en desarrollo por la US-EPA (US-EPA, 2022). En este proceso, aún en desarrollo<sup>78</sup>, se han disponibilizado los antecedentes revisados los cuales han permitido identificar distintos aspectos relevantes de la norma incluyendo antecedentes respecto a nuevas medidas de implementación. Se enfocó la revisión de los antecedentes en identificar las medidas consideradas para la elaboración del escenario regulatorio propuesto. Dentro de los antecedentes se destaca un caso de estudio (US-EPA & French, 2020) en que se evaluó qué tecnologías tendrían que ser aplicadas en las fundiciones existentes si las normas tuvieran un alto nivel de exigencia en reducción de emisiones. La revisión de este caso permitió tanto identificar medidas de abatimiento posibles, así como sus costos y su eficiencia teórica.

A partir de los antecedentes nacionales e internacionales se seleccionaron medidas con potencial de ser implementadas en Chile (ver Tabla 7-1). Una vez identificadas las medidas de mitigación de emisiones disponibles, se realizó una compilación de sus costos y eficiencias, como se describe en la siguiente subsección.

### **7.1.2 Metodología para estimar costos unitarios**

A partir de la identificación de medidas de abatimiento factibles de ser implementadas en las fundiciones, se realizó una compilación de sus costos y eficiencias de captura, así como consideraciones relevantes para su evaluación y aplicación. Se realizó una revisión de la literatura nacional, la cual fue complementada con las entrevistas a las fundiciones realizada en la presente consultoría, así como con cualquier antecedente relevante compartido por ellas. Del mismo modo también se buscaron antecedentes en referencias internacionales, para completar y contrastar la información disponible a nivel nacional. El detalle de los antecedentes encontrados por tipo de medida se encuentra en la Sección 4.3 del Informe Complementario sobre la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico, de la presente consultoría, donde se incluye cada una de las referencias para su consulta.

A continuación, se sintetizan los costos considerados para la evaluación de las alternativas regulatorias de normas de calidad analizadas.

---

<sup>78</sup> A la fecha se encuentran disponible 93 documentos disponibles en el repositorio digital de la norma: <https://www.regulations.gov/docket/EPA-HQ-OAR-2020-0430/document> (disponible en abril 2022).

En primer lugar, en cuanto a los costos de inversión, estos suelen representar una fracción principal de los costos totales en instrumentos que regulan la calidad del aire. Los costos de inversión requieren estudios de ingeniería detallada que escapan de los alcances de la presente consultoría, por lo que se opta por un foco basado en la experiencia comparada con costos reportados en otras experiencias. De estas experiencias se privilegian los antecedentes nacionales entre los que destacan los antecedentes provistos por los titulares en el marco de la revisión de la norma de emisión (AngloAmerican, 2021; CODELCO, 2021), así como antecedentes levantados durante las entrevistas con los mismos<sup>79</sup>.

Para estimar los costos unitarios se consideraron diversos factores, seleccionando uno o dos factores con información disponible para todas las fundiciones, que mejor podrían representar el proceso de escalamiento de las tecnologías. Se consideraron hasta dos componentes diferentes en algunas de las medidas, que representan las diferentes componentes de los costos, de forma que la suma de cada una de las componentes da el costo de inversión total. Los costos unitarios de inversión obtenidos en la revisión de antecedentes y utilizados para el presente análisis se presentan en la Tabla 7-1, con sus valores ajustados a UF según la moneda y año de estos.

---

<sup>79</sup> Minutas de estas reuniones disponibles en el Anexo A Digital E – Minutas

**Tabla 7-1 Costo de inversión unitaria [UF según unidad indicada]**

Medida de mitigación	Componente 1		Componente 2		Fuente principal de información
	Valor	Unidad	Valor	Unidad	
<b>Planta tostación</b>	39,6	UF/t Calc/año	-		Experiencia de Planta Tostación en Antecedentes SEIA de RCA240/2010 y RCA335/2017
<b>Captura y tratamiento gases secundarios CPS</b>	227.600,1	UF/nCPS	0,3	UF/nProc/año	Experiencia Fundición Ventanas (CODELCO, 2021)
<b>Flotación de escorias</b>	4,4	UF/t Proc/año	-		Experiencia en fundición Potrerillos en Antecedentes SEIA RCA 227/2011 y experiencia en fundición Caletones (CODELCO, 2021)
<b>PTGC</b>	0,7	UF/t Proc/año	-		Antecedentes provisto por HVL y en fundición Ventanas (CODELCO, 2021)
<b>Captura y tratamiento sangrado reactor</b>	237.495,8	UF/nReactor	0,3	UF/t Proc/año	Experiencia Fundición Ventanas (CODELCO, 2021)
<b>Captura y tratamiento hornos escoria</b>	237.495,8	UF/nHE o HLE	0,3	UF/t Proc/año	Experiencia Fundición Ventanas (CODELCO, 2021)
<b>Captura secundaria en boca del reactor</b>	470.043,8	UF/nReactor	0,3	UF/t Proc/año	Experiencia Fundición Ventanas (CODELCO, 2021)
<b>Alimentación carga fría CPS</b>	75.154,6	UF/nCPS	-		Antecedentes provistos por HVL
<b>Captura techo y filtro de manga reactor</b>	0,6	UF/t Proc/año	-		(US-EPA & French, 2020)
<b>Captura techo en reactor</b>	0,1	UF/t Proc/año	-		(US-EPA & French, 2020)
<b>Captura terciaria en CPS</b>	0,1	UF/t Proc/año	-		(US-EPA & French, 2020)
<b>ESP húmedo en horno anodico</b>	1,5	UF/t Proc/año	-		(US-EPA & Jones, 2019)

T Calc/año: Capacidad de procesamiento de calcinas medida en ton/año; nCPS: cantidad de convertidores CPS; tonProc: toneladas de mineral procesado; nReactor: cantidad de reactores; nHE/HLE: cantidad de hornos de escoria.

Fuente: Elaboración propia

En segundo lugar, respecto a los costos de operación y mantención, los valores obtenidos se presentan en la Tabla 7-2, en UF por tonelada de concentrado procesado. En los casos en que no se presenta un costo de operación esto se debe a que el costo obtenido de los antecedentes no diferencia un costo de operación, por lo que su valor estaría contenido en el costo de capital.

**Tabla 7-2 Costo operación y mantención unitaria [UF/ton concentrado procesado]**

Medida de mitigación	Costo [UF/t]	Fuente principal de información
Planta tostación	11,13	(Lagos, Peters, Salas, Parra, & Pérez, 2021)
Captura y tratamiento gases secundarios CPS	-	
Flotación de escorias	-	
PTGC	0,10	Antecedentes provisto por HVL
Captura y tratamiento sangrado reactor	-	
Captura y tratamiento hornos escoria	-	
Captura secundaria en boca del reactor	-	
Alimentación carga fría CPS	-	
Captura techo y filtro de manga reactor	0,10	(US-EPA & French, 2020)
Captura techo en reactor	-1	(US-EPA & French, 2020)
Captura terciaria en CPS	-1	(US-EPA & French, 2020)
ESP húmedo en horno anodico	-	
ESP húmedo en sistemas de capturas actuales	-	

Fuente: Elaboración propia

En tercer lugar, se analizan los costos por detención por implementación de medidas de abatimiento. Este costo se refiere a los tiempos de implementación de las medidas de abatimiento y la posterior puesta en marcha, lo que incluye los periodos de adaptación desde que la producción se realiza a una menor intensidad, hasta que alcance el nivel normal. En este caso no se identificaron valores ni tiempos de detención y puesta en marcha en la literatura, por lo que según el tipo de medida se tomaron supuestos sobre los tiempos de detención para cada una:

- En particular, se tomó el supuesto de que para implementar medidas mayores que impliquen cambios en la ruta crítica de producción —es decir, en un secador, reactor de fusión, convertidor, hornos de refino, y/o sistemas de tratamiento de escorias— se considerarán 5 meses de detención, definidos a partir de las experiencias de las implementaciones de medidas en las fundiciones Chuquicamata y Potrerillos, y 2,5 meses adicionales, correspondientes a 5 meses de puesta en marcha con producción media a 50% de lo normal. De modo que el tiempo total de detención asumido para medidas mayores es de **7,5 meses** en total.
- Para medidas de envergadura mediana, en este caso los sistemas de captura de emisiones fugitivas que se instalan en el techo o en sistemas anexos como los hornos de escoria, se asumió una detención total de **3 meses**, correspondiente a 2 meses de detención y 2 meses de producción media a 50% de lo normal, equivalente a 1 mes adicional de detención.

- Mientras que, para medidas menores, implementadas en procesos anexos, como una planta de tostación, se les definió un tiempo de detención de **1 mes** en total, equivalente a 2 meses de producción media de 50% de lo normal.

Utilizado estos tiempos de detención, para poder estimar un costo monetario se utiliza el valor agregado de la fundición, dado que durante este periodo cesa la producción. El valor agregado de la fundición se estima como la diferencia entre el precio de largo plazo de cobre y los costos directos, donde el precio de largo plazo corresponde a la proyección del precio según expertos (3,31 USD/libra), reportado por la DIPRES (2021), mientras que los costos directos se obtienen de Lagos et al. (2021) (0,94 USD/libra). El valor resultante es **143,2 UF/t** de cobre. Cabe destacar que en estos costos no se incluyen los ingresos que se dejan de percibir por la reducción en la producción de ácido sulfúrico, oro y plata, así como otros costos indirectos<sup>80</sup>.

Finalmente, se estiman los costos por reducción del nivel de producción para dar cumplimiento a la NPCA propuesta. El razonamiento detrás de este costo es que, si las medidas adicionales que se requieren implementar para cumplir el nivel de calidad del aire definido tienen un costo total muy alto — mayor a los ingresos que se obtendrían a partir de la venta de cobre—, entonces lo lógico es que la fundición decida limitar su producción hasta el límite que permite que se cumpla la NPCA. Esta situación es relevante especialmente en la medida que los niveles analizados para la NPCA son más exigentes. En este caso, para dar valor a este costo, se estimó la intensidad de emisiones de arsénico que tendrían las fundiciones de acuerdo con su producción proyectada de cobre, para obtener un costo unitario de no producción por cumplimiento de la norma. Para esto se utilizó el mismo valor agregado del cobre estimado para el costo de detención y puesta en marcha, 143,2 UF/t.

El costo unitario obtenido en este caso depende según cuál es la fundición, por tener distinta intensidad de emisión de As por tonelada de cobre producido, como se muestra en la Tabla 7-3. Se observa que Chagres tendría el mayor costo unitario por tonelada de arsénico adicional a reducir, lo cual responde a que es la fundición con menor intensidad de emisiones (g As/t Cobre producido, ver Sección 3.3.8), lo cual implica que para reducir una tonelada de arsénico se debe dejar de producir mayor cantidad de cobre, implicando un mayor costo total.

Cabe destacar que en la Tabla 7-3 se presentan los costos unitarios que se utilizarían en el caso de que en el análisis se identifique que una fundición incurriría en este costo, lo que no quiere decir que todos estos costos unitarios estimados se utilicen en la estimación de los costos de las NPCA propuestas, presentada en la Sección 7.3.

---

<sup>80</sup> Lagos et al. reporta los siguientes costos directos: laboral, energía brutal total, mantención, consumibles, servicios en el lugar y *direct cash costs*.

**Tabla 7-3 Costo por reducción del nivel de producción para dar cumplimiento a la NPCA [UF/t As]**

Fundición	Costo [UF/t As]
Chuquicamata	183,553
Altonorte	352,200
Potrerillos	353,785
HVL	716,172
Ventanas	823,247
Chagres	1,801,819
Caletones	686,377

Fuente: Elaboración propia

## 7.2 Variables operacionales con influencia en las emisiones

En general, las variables operacionales se explican por medio de tres tipos de variables: características del concentrado, características del proceso y los niveles de producción. Si bien las emisiones reales dependen de una multiplicidad de factores, se puede simplificar su estimación en base a la combinación de las estas tres variables operacionales según se presenta en la Ecuación 41.

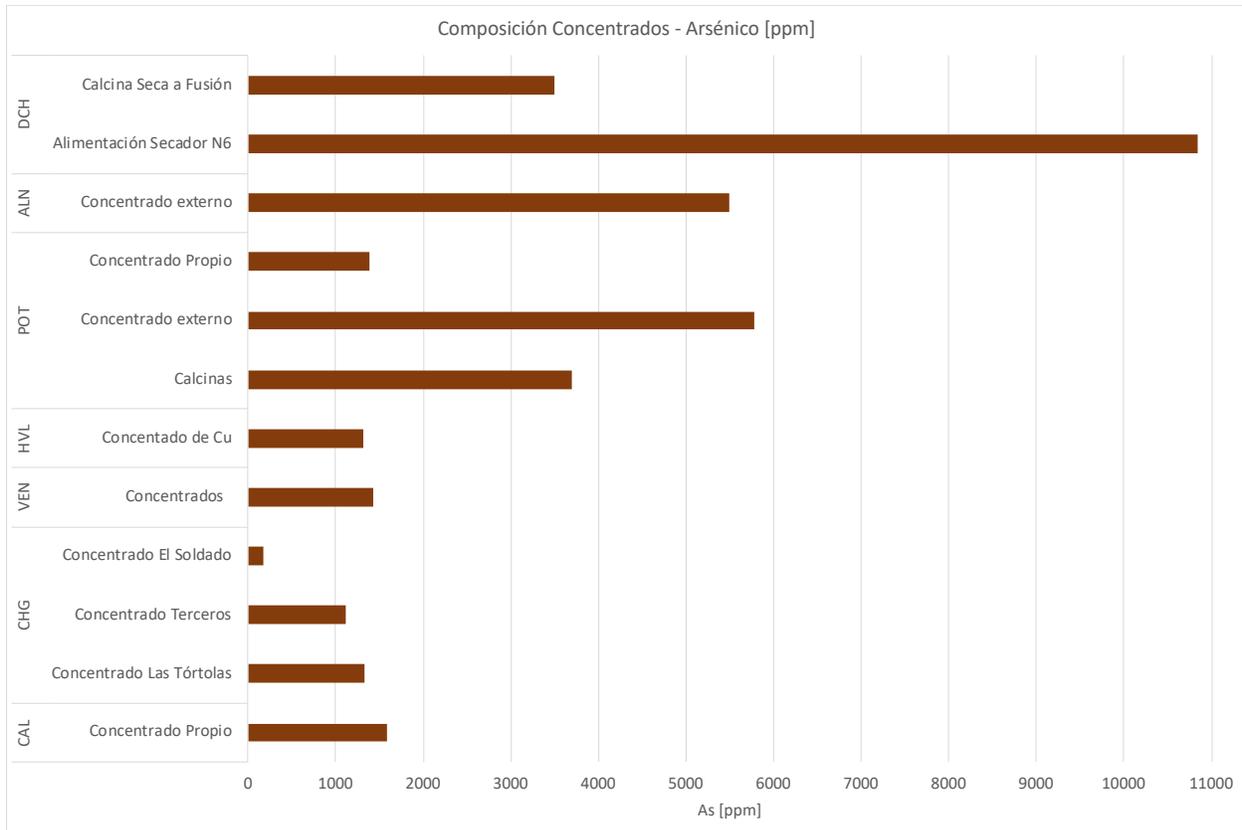
$$\begin{aligned}
 \text{Emisión de As } \left( \frac{\text{tonAs}}{\text{año}} \right) &= \text{Características del concentrado } \left( \frac{\text{tonAs}}{\text{tonCu}} \right) \\
 &* \text{Características del proceso } (1 - \text{eficiencia}_{\text{captura}}) \\
 &* \text{Nivel de producción } \left( \frac{\text{tonCu}}{\text{año}} \right)
 \end{aligned}$$

### Ecuación 41 Emisiones a partir de variables operacionales

#### 7.2.1 Características del concentrado

Una primera variable operacional con gran importancia en las emisiones es la composición del concentrado de cobre. Los diferentes concentrados presentan distintos contenidos de arsénico, cobre y otros metales de potencial interés para cada fundición. El contenido de cada uno de los metales en los concentrados varía según la influencia los fluidos hidrotermales y magmatismo en su lugar de origen, y de esta forma pueden variar considerablemente entre distintas minas de origen. En cuanto a emisiones, un mayor contenido de arsénico en el concentrado hace que, a mismas eficiencias de captura y fijación, mayores sea la intensidad de emisiones de la fundición. De esta forma, a mayor contenido de arsénico, mayor es el potencial de emisión por masa que entra.

En la Figura 7-1 se muestra el contenido de arsénico de los flujos de concentrados que ingresan a las fundiciones. Se observa gran diferencia entre el contenido de arsénico, el cual oscila entre 877 y 9.440 [ppm] a nivel de fundición, para Chagres y Chuquicamata respectivamente.



**Figura 7-1 Contenido promedio de As en concentrados de cobre procesados [ppm], año 2020**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos periodo 2020

Es importante resaltar que la ley de cobre es igualmente importante que el contenido de arsénico, ya que, si un concentrado alto en arsénico es a su vez alto en cobre, la emisión por cobre final producido no es necesariamente alta. La relación respecto a la intensidad, es que en la medida que mayor sea la ley de cobre, menor masa de concentrado es necesaria para producir una tonelada de cobre en la fundición. En la Tabla 7-4 se muestra el ratio entre la cantidad de cobre producida y la cantidad de concentrados para cada fundición, si bien técnicamente en este ratio también depende de la eficiencia de recuperación, en general, estas eficiencias están en torno al 98% (Lagos, G., Peters, D., Videla, A., Jara, 2018), por lo que las variaciones en general se explica por los cambios en la ley de cobre de los concentrados de cobre.

**Tabla 7-4 Ratio entre cobre producido y concentrados procesados**

Fundición	ton de cobre por ton procesada
Chuquicamata	35,04%
Altonorte	27,58%
Potrerrillos	25,78%
HVL	25,11%
Ventanas	45,34%
Chagres	21,21%
Caletones	25,53%

Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos de año 2020

### 7.2.2 Características del proceso

Una segunda variable operacional que influye en las emisiones son las características constructivas y operativas del proceso, las cuales resultan en diferentes niveles de captura y fijación. La comparación entre las fundiciones es compleja en la medida que las tecnologías, capacidades, equipos de abatimiento, entre otras, varía entre las fundiciones, dependiendo de las características de los concentrados, la edad de sus equipos y especificación del producto deseado. Al tratarse de una serie de procesos interconectados la disponibilidad de arsénico en cada una de las etapas es dependiente de las etapas previas. Lo anterior se complejiza aún más por la existencia de flujos de retorno, dentro de los cuales el más relevante es el proceso de recuperación de cobre de escorias, los cuales funcionan como una retroalimentación de material.

De esta forma, la emisión de cada uno de los procesos unitario, no sólo depende de la tecnología, sistemas de captura y abatimiento instalados, sino que también de la configuración completa de la fundición (COPRIM, 2012; US-EPA, 1995). La correcta mantención de los equipos y la detección oportuna de desviaciones respecto de los valores esperados en los sistemas de abatimiento, son prácticas operacionales que permiten optimizar el rendimiento operacional de cada uno de los procesos unitarios. Mayores captaciones y fijación, en general, requieren cambios tecnológicos en la configuración de la fundición, los cuales suelen requerir inversiones significativas.

Como es de esperar, la diferencias en la configuración<sup>81</sup> generan diferencias en la captura y eficiencia. En la Tabla 7-5 se muestra la fracción de captura y fijación de arsénico para cada fundición. Dado que la emisión se cuantifica por medio de balance de masa, cada tonelada de arsénico capturada es una que no se emite.

---

<sup>81</sup> Para ver la configuración actual de las fundiciones chilenas ver Sección 3.3 y/o el Informe Complementario en su Sección 3.2.

**Tabla 7-5 Fracción de captura y fijación de As por fundición año 2020, según balance de masa**

Fundición	As
Fundición Chuquicamata	97,3%
Fundición Altonorte	98,0%
Fundición Potrerillos	97,7%
Fundición HVL	(1) 97,0%
Fundición Ventanas	95,1%
Fundición Chagres	98,1%
Fundición Caletones	96,7%

(1) Estimación referencial, puesto que estimaciones de balance de masa no fueron estimadas con metodología aprobada.

Nota: Fracciones incluyen contenido de los elementos en los materiales de limpieza reportados para el año 2020

Fuente: Elaboración propia

### 7.2.3 Niveles de producción

El nivel de producción también influye directamente en el nivel de emisiones, pues cada tonelada adicional procesada emite una determinada cantidad adicional de contaminante. En la Tabla 7-6 se puede ver la capacidad, el procesamiento efectivo y el factor de planta de cada fundición en 2020. Se observan factores disímiles, lo que da cuenta de distintas realidades según la fundición, viéndose influenciadas las fundiciones de Potrerillos y Chuquicamata por encontrarse en proceso de puesta marcha aun durante el 2020, tras los cambios en su configuración para dar cumplimiento a las exigencias del DS28/2013. Se espera que a futuro aumente el nivel de procesamiento de las fundiciones en línea con las proyecciones de Cochilco, llegando a operar con factores de planta de entre 80% y 90% (ver Sección 3.4).

La diferencia entre la capacidad y el procesamiento se explica por las detenciones en alguno de los procesos unitarios de producción, cualquiera sea su motivo (mantención programada, falla, cumplimiento norma, etc.), así como por una eventual producción con niveles de carga más bajo de los nominales. En principio, una mayor cantidad de detenciones implicaría una emisión menor, ya que habría más periodos sin emitir.

**Tabla 7-6 Capacidad, procesamiento y factor de planta 2020 por fundición [ton/año]**

Fundición	Capacidad de procesamiento	Procesamiento 2020	Factor de planta 2020
Fundición Chuquicamata	1.400.000	661.423	47,2%
Fundición Altonorte	1.160.000	1.050.188	90,5%
Fundición Potrerillos	680.000	489.173	71,9%
Fundición HVL	380.000	313.142	82,4%
Fundición Ventanas	425.000	360.664	84,9%
Fundición Chagres	650.000	512.673	78,9%
Fundición Caletones	1.400.000	1.258.914	89,9%
<b>Total</b>	<b>5.865.000</b>	<b>4.646.177</b>	<b>79,2%</b>

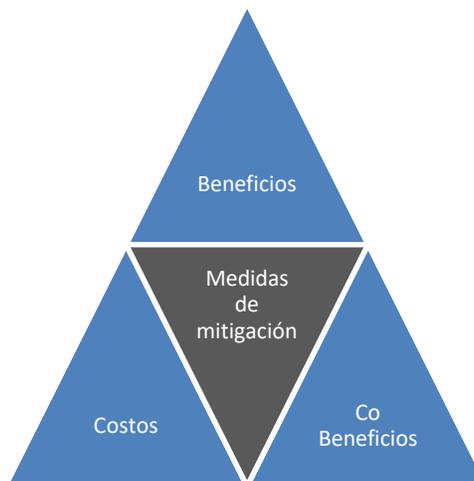
Fuente: Elaboración propia según reportados por titulares en el marco del DS28/2013

En términos de emisión anual, no influye cuándo se realizan las detenciones, sino que solo importaría el factor de planta final. Sin embargo, el aporte los niveles de concentración

atmosférica a los que se expone a la población, no es indiferente a la temporalidad de las detenciones. Lo anterior, puesto que las condiciones meteorológicas afectan la dispersión de los contaminantes (ver Sección 5.1.6), y de esta forma el cuándo se detiene la fundición para realizar su mantención afecta en la magnitud en que la detención varía las concentraciones de As en las localidades de la zona de influencia. De esta forma, si las detenciones se priorizan en las épocas de peor ventilación atmosférica, se podría reducir los niveles de concentración sin modificar el procesamiento total.

### 7.3 Costos de las alternativas regulatorias propuestas y beneficios

Para estimar los costos referenciales para los escenarios regulatorios propuestos (ver Sección 6.5.1) se realiza una selección de medidas de reducción de emisiones que resulten en un nivel de calidad del aire *acceptable*. Desde el punto de vista de económico la implementación de estas medidas implican en costos incurridos, que resultan en beneficios y co-beneficios (ver Figura 7-2). Desde el punto de vista de la comparación entre costos y beneficios realizada en la Sección 7.3.4, se consideran estos tres tipos de efectos socioeconómicos.



**Figura 7-2 Efectos socioeconómicos de las medidas de mitigación**

Fuente: Elaboración propia

Los costos corresponden a los costos de inversión, operación, mantención y, en general, cualquier gasto incremental asociado a la instalación y funcionamiento de la medida de mitigación. Dentro de estos se incluyen los gastos por detención, y su consiguiente pérdida de productividad, asociada al proceso de instalación de las diferentes tecnologías. La metodología para la estimación de los costos, considera por un lado la selección de medidas de mitigación (Sección 7.3.1) y la estimación de sus costos a partir de los costos unitarios estimados (ver Sección 7.1)

Los beneficios sociales asociados a una NPCA de arsénico provienen de la reducción de los efectos en salud, según la metodología detallada en la Sección 6.4. Si bien los beneficios de la NPCA se

presentan en la Sección 6.5.2, la selección de medidas de mitigación puede resultar en mayores beneficios mayor. Esto ocurre en los casos en que para cumplir con las exigencias de la NPCA se decide por aplicar una medida de mitigación con reducciones mayores a las requeridas. Lo anterior ocurre pues las reducciones disponibles no son lineales, por lo que la selección de las medidas puede resultar en mayores beneficios que los presentados en la Sección 6.5.2.

Por su parte, los co-beneficios corresponden a aquellos beneficios producidos por las medidas de mitigación implementadas a causa de la NPCA de As, pero que no se asocian a las reducciones de As. En particular, para el presente estudio los beneficios estimados se asocian a las reducciones de las emisiones de MP a consecuencia de las medidas de mitigación para controlar emisiones de As. El método y resultados de la estimación de estos co-beneficios se presenta en la Sección 7.3.3.

### 7.3.1 Selección de medidas de mitigación

El método de selección de las medidas de mitigación busca simular el comportamiento de los privados que deciden qué medidas de mitigación implementar en las distintas fuentes. Para ello se considera que los costos son incurridos por los privados, mientras que los beneficios en salud no son directamente percibidos por quienes toman las decisiones, de esta forma la simulación de la decisión privada se basa en minimizar los costos, sujetos al cumplimiento de la norma de calidad. De esta forma, las medidas se agrupan en *paquetes*, los cuales resultan en determinados costos y reducciones, seleccionando aquel *paquete* con menor costo que cumpla con el límite de los escenarios propuestos de NPCA. Matemáticamente, lo anterior se expresa en la Ecuación 42.

$$\text{Min}\{ \text{Costos Totales} = \sum_{\substack{p \in \text{medidas en paquete} \\ f \in \text{fundición}}} \text{Costo Medida}_{p,f} \}$$

s. a.

$$(1) \text{Emisión}_{f,p} = \text{Emisión}_f^{\text{sin paquete}} - \sum_{p \in \text{medidas en paquete}} \text{Reducción}_{p,f}$$

$$(2) \text{Concentración}_{l,p} = \frac{\text{Emisión}_{f,p}}{\text{FEC}_{f,l}}$$

$$(3) \text{Límite Concentración}_{\text{Esc.NPCA}} \geq \text{Concentración}_{l,p}$$

Donde,

*f*: fundición

*p*: paquete de medidas

*l*: localidad

Esc NPCA: Escenario de NPCA

#### Ecuación 42 Modelo de selección de paquetes de medidas

Cabe destacar que dentro del modelo se considera como parte de las medidas incluidas en los paquetes, la opción de que una fundición logre la reducción de emisión necesaria para dar cumplimiento por medio de la reducción de sus niveles de producción. Dado el alto costo de esta detención (ver Sección 7.1.2), la reducción de los niveles de producción ocurre en dos casos: (1) ya no hay más medidas de mitigación disponible para incluir en el paquete, o (2) el costo total de incluir una nueva medida es mayor al costo de ingresos reducidos por menores niveles de producción.

Por la forma en que se plantea el método de selección de medidas y, dado que se espera que las fundiciones sean las mayores fuentes de arsénico<sup>82</sup>, la solución general equivale a minimizar el costo para cada una de las fundiciones individualmente. Es decir, para cada una de las fundiciones se elige un paquete de medidas que permite alcanzar los niveles de las alternativas propuestas de NPCA. De esta forma, el paquete de medidas seleccionadas para cada una de las fundiciones bajo los distintos escenarios se presenta en la Tabla 7-7.

---

<sup>82</sup> Situación que se acrecienta en la medida que avanzan la estrategia de descarbonización que implica el cierre de otras fuentes de arsénico: las centrales eléctricas a carbón (ver Sección 3.4.1)

**Tabla 7-7 Paquete de medidas seleccionadas para cada fundición en propuestas de escenarios de NPCA**

Fundición	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
Chuquicamata	<b>Reactor:</b> - Captura y tratamiento sangrado reactor Captura en techo de reactor	<b>Reactor:</b> - Captura y tratamiento sangrado reactor Captura en techo de reactor	<b>Reactor:</b> Captura y tratamiento sangrado reactor Captura en techo de reactor y filtro de manga
	<b>CPS:</b> - Captura Terciaria en CPS	<b>CPS:</b> - Captura Terciaria en CPS	<b>CPS:</b> - Captura Terciaria en CPS
	<b>Horno Anódico:</b> - ESP húmedo en horno anódico	<b>Horno Anódico:</b> - ESP húmedo en horno anódico	<b>Horno Anódico:</b> - ESP húmedo en horno anódico
	<b>Reducción niveles producción:</b> - -	<b>Reducción niveles producción:</b> - -	<b>Reducción niveles producción:</b> - Para evitar emisiones de 57,4 t/año, equivalente a una reducción de 20% de producción
Altonorte	-	-	-
Potrillos	-	-	-
Hernán Videla Lira	<b>Reactor:</b> - Captura secundaria en boca de reactor	<b>Reactor:</b> - Captura secundaria en boca de reactor	<b>Reactor:</b> Captura y tratamiento sangrado reactor Captura secundaria en boca de reactor Captura en techo de reactor
	<b>Horno de escoria:</b> Captura y tratamiento hornos escoria	<b>Horno de escoria:</b> Reemplazo de horno por sistema de flotación	<b>Horno de escoria:</b> Reemplazo de horno por sistema de flotación
Ventanas	<b>Reactor:</b> Captura secundaria en boca de reactor Captura en techo de reactor	<b>Reactor:</b> Captura secundaria en boca de reactor Captura en techo de reactor	<b>Reactor:</b> Captura secundaria en boca de reactor Captura en techo de reactor y filtro de manga
	<b>CPS:</b> - -	<b>CPS:</b> - -	<b>CPS:</b> - Captura Terciaria en CPS
	<b>Horno de escoria:</b> - -	<b>Horno de escoria:</b> Reemplazo de horno por sistema de flotación	<b>Horno de escoria:</b> Reemplazo de horno por sistema de flotación

Fundición	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
Chagres	Reactor: -	Reactor: -	Reactor: Captura y tratamiento sangrado reactor
Caletones	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

De los paquetes de medidas seleccionados (ver Tabla 7-7) se observa que en la medida que los escenarios son más ambiciosos, el número de medidas y su ambición aumentan de forma relevante. Es destacable que, en el escenario regulatorio más ambicioso, incluso se llegan a incluir medidas como la reducción de los niveles de producción para dar cumplimiento a los NPCA. De esta forma se logran las reducciones de emisiones requeridas para dar cumplimiento a los niveles propuestos de NPCA, lo cual se puede observar en la Tabla 7-8.

**Tabla 7-8 Estimación de reducción de emisiones lograda y requerida**

Fundición	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
Chuquicamata	-	158,6 (152,1)	224,9 (224,9)
Altonorte	-	-	-
Potrerrillos	-	-	-
Hernán Videla Lira	5,7 (5,0)	14,6 (13,2)	16,9 (16,2)
Ventanas	5,8 (3,6)	22,5 (17,8)	23,4 (22,9)
Chagres	-	-	1,2 (0,0)
Caletones	-	-	-

Nota: entre paréntesis se presenta la estimación de las reducciones requeridas

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7-8 se observa como en la medida que aumenta la ambición de las medidas, los márgenes de sobrecumplimiento se van acortando, observándose que en el escenario más ambicioso virtualmente no existe ningún margen. Al respecto cabe destacar que existen incertidumbres propias de la modelación que podrían resultar que en determinadas condiciones las reducciones no sean suficientes. Se destaca también que, además de las medidas de mitigación modeladas, existen prácticas operacionales que también tienen influencia en las emisiones y que podrían permitir lograr reducciones mayores, incluso evitando que sea necesario la detención modelada.

### 7.3.2 Costos totales de alternativas regulatorias

Los costos totales de las alternativas regulatorias corresponden a la suma de los costos incrementales de cada una de las fundiciones considerando inversiones, operación, mantención, costos por tiempos de detención (y *ramp up*) para instalación y los costos por reducción de los niveles de producción para dar cumplimiento a la NC. Tal como se explica previamente, en la presente consultoría se propone realizar la comparación de beneficios y costos en línea con los últimos análisis seguidos por la US-EPA, siguiendo un enfoque temporal de un año de evaluación. Con este enfoque se comparan los beneficios de un año con los costos anualizados asociados a la implementación del escenario regulatorio, donde el año a seleccionar corresponde a un año donde se haya alcanzado los niveles descritos en la normativa.

De esta forma los costos asociados a la instalación de las medidas, es decir las inversiones y tiempo de detención durante la instalación, se anualizan en un período de 20 años y utilizando como tasa de descuento la tasa de descuento social vigente: 6%. Por su parte, los costos de

operación y mantención, así como las eventuales reducciones en los niveles de procesamiento son estimados a partir de la producción proyectada para cada año.

Los costos de los escenarios regulatorios<sup>83</sup>, los cuales corresponden a la suma de los costos de las medidas presentadas en la Tabla 7-7, se presentan en la Tabla 7-9. Se observa que los costos aumentan de forma significativa entre los diferentes escenarios. De esta forma, el escenario de 1 en 10k, que exige un límite equivalente al 50% del límite exigido en el escenario 2 en 10, presenta costos que son 7 veces mayores. De la misma forma el escenario más ambicioso tiene un costo estimado más de 100 veces mayor que el costo estimado para el escenario 2 en 10k.

Se observa que en los escenarios menos exigentes los costos están dominados por los costos de inversión, los cuales representan un 88% del total de costos, en el caso del escenario 2 en 10k, y un 91% en el caso del escenario 1 en 10k. Por su parte, el escenario más ambicioso está dominado por los costos de detención para dar cumplimiento a la NC, fundamentalmente en Chuquicamata, los cuales por sí sólo representan el 90% de los costos estimados.

---

<sup>83</sup> En el Anexo digital G – Resultados CB Escenarios, se presenta el detalle de los costos por fundición, tipo de costo, escenario y para diferentes años.

**Tabla 7-9 Costos totales de alternativas regulatorias [UF/año], por fundición y tipo de costo para año de referencia**

Fundiciones	Tipo de Costo	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
<b>Fundición Chuquicamata</b>	Inversión	-	232.000	281.200
	O&M	-	29.700	123.900
	Detención para instalación medidas	-	6.195	6.195
	Detención para cumplir NC	-	-	10.540.000
<b>Fundición HVL</b>	Inversión	30.460	195.700	231.000
	O&M	2.132	10.790	17.860
	Detención para instalación medidas	690	966	1.519
<b>Fundición Ventanas</b>	Inversión	57.130	219.400	242.700
	O&M	8.590	16.700	51.130
	Detención para instalación medidas	1.055	2.373	2.901
<b>Fundición Chagres</b>	Inversión	-	-	37.390
	O&M	-	-	2.617
	Detención para instalación medidas	-	-	388
<b>Total</b>		<b>100.100</b>	<b>713.800</b>	<b>11.540.000</b>

Nota: Resultados presentados con cuatro cifras significativas

Fuente: Elaboración propia

### 7.3.3 Estimación de co-beneficios

Los co-beneficios corresponden a otros beneficios asociados a las medidas de mitigación, que no se vinculan directamente con las reducciones de los niveles de arsénico. De estos co-beneficios, los mayores provendrían de la mejora en la salud de la población expuesta asociada a la reducción de las emisiones de material particulado.

Los efectos en salud del material particulado han sido largamente estudiados, y son largamente utilizados en la estimación de beneficios y co-beneficios de regulaciones para la gestión de la calidad del aire (GreenLab, 2018; MMA, 2013b). El método de estimación de los beneficios asociado a este tipo de contaminantes se basa en la Guía Metodológica para la elaboración de AGIES del MMA (2013b), donde los diferentes parámetros han sido actualizados para reflejar el estado del arte. La compilación de estas actualizaciones, así como otros detalles se presentan en el Informe Complementario sobre la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico en su Sección 7.4, pero cabe destacar que los resultados de la aplicación de esta metodología dependen fuertemente de los coeficientes dosis-respuestas. Los coeficientes utilizados para la estimación de los actuales beneficios se presentan en la Tabla 7-10, observándose que se seleccionan fuentes utilizadas comúnmente en evaluaciones nacionales e internacionales (GreenLab, 2018, 2020).

**Tabla 7-10 Coeficientes de Dosis-Respuesta para MP2,5 (por  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )**

Tipo de efecto	Causa	Grupo etario	Coeficiente	Fuente
<b>Mortalidad</b>	Todas las causas	30+	$9,47 \times 10^{-3}$	(Krewski et al., 2009; Lepeule, Laden, Dockery, & Schwartz, 2012)
<b>Admisiones Hospitalarias</b>	Enfermedades cardiovasculares	18-64	$1,40 \times 10^{-3}$	(Moolgavkar, 2000)
	Enfermedades cardiovasculares	65+	$1,89 \times 10^{-3}$	(Zanobetti, Franklin, Koutrakis, & Schwartz, 2009)
	Enfermedades respiratorias	65+	$1,39 \times 10^{-3}$	(Kloog, Coull, Zanobetti, Koutrakis, & Schwartz, 2012; Zanobetti et al., 2009)
	EPOC	18-64	$2,20 \times 10^{-3}$	(Moolgavkar, 2000)
	Asma	<65	$3,32 \times 10^{-3}$	(Sheppard, 2003)
<b>Visitas sala emergencia</b>	Asma	Todas	$1,39 \times 10^{-3}$	(Glad et al., 2012; Mar, Koenig, & Primomo, 2010; Slaughter et al., 2005)
<b>Días laborales perdidos</b>	Todas las causas	18-64	$4,60 \times 10^{-3}$	(Ostro, 1987)

Nota: En los casos que se presenta más de una fuente para un coeficiente, el valor que se presenta corresponde al promedio entre las fuentes.

Fuente: Elaboración propia

Considerando la metodología, para determinar los co-beneficios es necesario estimar la variación de los niveles de concentración de MP2,5 a causa de las medidas implementadas para el control del arsénico. Para ello se propone utilizar el ratio de contribución de las fundiciones de As : MP2,5, estimado para las estaciones de monitoreo, según lo presentado en la Ecuación 43.

$$\Delta MP2.5_f^e \left[ \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right] = \frac{\Delta As_f^e \left[ \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right]}{Ratio_{MP2.5}^{As}} \quad , \text{ para } e: \text{ estación, } f: \text{ fundición}$$

#### **Ecuación 43 Estimación de variación en las concentraciones de MP2,5 a partir de las variaciones de concentraciones de arsénico**

El supuesto implícito detrás de la Ecuación 43 es que la relación entre el aporte de las fundiciones a las concentraciones de arsénico y su aporte al MP2,5 es lineal. Ante la falta de inventarios detallados de las emisiones de material particulado fugitivas en las fundiciones, este supuesto es una aproximación razonable para estimar los co-beneficios. La contribución de MP2,5 se obtienen de diferentes fuentes, privilegiando estudios previos según se explícita en la Tabla 7-10. La contribución de As, para cada año y estación requerida según la información de MP2,5, se estima en base a los datos históricos de arsénico (ver Sección 2.3.2) descontando la estimación de la concentración basal estimada estadísticamente según lo descrito en los Anexos (Sección 10.4). El detalle del ratio As : MP2,5 considerado se presenta en la Tabla 7-11.

**Tabla 7-11 Ratio de contribución de fundiciones a As y MP2,5**

Fundición	As : MP2,5	Fuente contribución de fundición a MP2,5
Fundición Chuquicamata	3,2%	AGIES Anteproyecto PDA Calama (MMA, 2019), utilizando emisiones y FEC para estación 23 de marzo
Fundición Altonorte	5,4%	Estudio de Calidad del Aire, Sector La Negra (SISTAM, 2021), Estación Inacesa
Fundición Potrerillos	0,8%	Estimación propia en base a análisis estadístico de calidad el aire reportada en estación Cine Inca, período 2016-2020
Fundición HVL	2,7%	Promedio de las demás fundiciones
Fundición Ventanas	3,1%	AGIES Anteproyecto PPDA Concón, Quintero y Puchuncaví (MMA, 2018)
Fundición Chagres	0,9%	Evaluación costos medidas efectivas para diseñar un instrumento de gestión ambiental en la zona interior de la región de Valparaíso (GreenLab-Dictuc, 2019), contribución de fuentes fijas a Catemu. Valor en el orden de magnitud, aunque levemente superior, a lo observado en estación Santa Margarita en estudio sobre modelo receptor realizado para la fundición Chagres (Particulotech, 2021)

Nota: para la fundición Caletones no se contó con antecedentes que permitiera la estimación. Se destaca que en su área de influencia no se supera ninguno de los escenarios de NPCA, por lo que tampoco habrían co-beneficios.

Fuente: Elaboración propia

Se destaca que los valores presentados en la Tabla 7-11 a pesar de tener orígenes distintos se mantienen dentro del mismo orden de magnitud, con un rango entre 0,8% a 5,4%. Este antecedente se utilizó para proponer un valor para el caso de la fundición HVL. En este caso no se contaron con antecedentes que permitieran obtener una estimación, ante lo cual se utiliza como mejor supuesto el valor medio de las demás fundiciones. Dado lo sensible de este parámetro para los resultados finales, se propone una sensibilización considerando los valores máximos y mínimos observados en las otras fundiciones.

Con los supuestos anteriores para estimar la variación de las concentraciones de MP2,5, se aplica la metodología propuesta por la Guía para Elaboración de AGIES (MMA, 2013b). La estimación de co-beneficios anuales<sup>84</sup> se presenta en la Tabla 7-12, donde se observa que al igual que los beneficios estimados de la NPCA se vinculan a las áreas más pobladas. De esta forma, Copiapó percibe un 50%, 45% y 83% de los co-beneficios estimados, según los escenarios ordenados de más ambicioso a menos ambicioso. De la misma forma, Calama representa un 26% de los co-beneficios, en los escenarios donde hay mejoras de la calidad del aire, mientras que Quintero representa cerca de 12.5% de los co-beneficios en todos los escenarios regulatorios.

---

<sup>84</sup> En el Anexo digital G – Resultados CB Escenarios, se presenta el detalle de los co-beneficios por localidad, alternativa de escenario regulatorio, tipo de beneficio, y escenario de sensibilidad As : MP2,5 en HVL.

**Tabla 7-12 Estimación de beneficios [UF/año], por escenario y localidad para año de referencia**

Fundición	Localidades	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
Chuquicamata	Calama	-	74.272	105.156
	ChiuChiu	-	11	15
HVL	Copiapó	85.352	219.356	253.212
	Tierra Amarilla	3.062	7.884	9.105
Ventanas	Quintero	13.826	53.856	55.872
	Puchuncaví	517	2.020	2.096
	Ventanas	1.113	4.350	4.513
Chagres	Catemu	-	-	798
	Panquehue	-	-	395
	Llayllay	-	-	1.027
<b>Total</b>		<b>103.870</b>	<b>361.748</b>	<b>432.188</b>

Fuente: Elaboración propia

Un análisis por los efectos considerados, cuyos resultados se presentan en la Tabla 7-10, permite observar que la mayor parte de los co-beneficios estimados se asocian a la reducción de los casos de mortalidad prematura en adultos (Mort-All-30+), las cuales representan el 99,8% de los co-beneficios estimados. De lejos, siguen reducciones en las admisiones hospitalarias por cardíacas (HA-CVD), las cuales representan casi el 80% de los co-beneficios restantes.

**Tabla 7-13 Estimación de co-beneficios [UF/año], por escenario y efecto considerado, para año de referencia**

Beneficios	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
<b>Mort-All-30+</b>	103.660	360.998	431.285
<b>HA-CVD-65+</b>	114	388	461
<b>HA-CVD-18-64</b>	52	201	246
<b>HA-RSP-65+</b>	3	12	14
<b>HA-CLD-18-64</b>	0	1	2
<b>HA-Asth-&lt;65</b>	0	1	1
<b>ERV-Asth-All</b>	18	67	81
<b>WLD-All-18-64</b>	21	81	99
<b>Total</b>	<b>103.870</b>	<b>361.748</b>	<b>432.188</b>

Nota: la traducción de la notación de los beneficios puede consultarse en la Sección 7.5.2 del Informe Complementario sobre la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico.

Fuente: Elaboración propia

Por último, se presenta la sensibilización de los resultados de co-beneficios al ratio As : MP2,5 en la fundición de HVL. Se observa que en el caso en que este ratio alcanza un valor equivalente al mayor valor observado en las otras fundiciones, los co-beneficios se reducen entre un 30% y 43%, dependiendo el escenario, respecto del valor medio. En el caso opuesto, cuando se considera un ratio equivalente al menor valor observado en las otras fundiciones, los co-beneficios aumenta entre un 140%-201%.

**Tabla 7-14 Sensibilización de co-beneficios [UF/año] por escenario y escenario de relación As : MP2,5 en HVL, para año de referencia**

Esc. Relación As : MP2,5 en HVL	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
5,4%	59.478	247.904	300.845
2,7%	<b>103.870</b>	<b>361.748</b>	<b>432.188</b>
0,8%	312.294	889.505	1.039.109

Fuente: Elaboración propia

### 7.3.4 Comparación de costos y beneficios

Los beneficios estimados de los diferentes escenarios regulatorios se pueden desagregar en tres componentes. En primer lugar los beneficios directos de la NPCA, los cuales representan los beneficios por alcanzar los niveles de concentración de arsénico establecidos en las alternativas regulatorias en aquellas zonas cuya proyección los supera (ver Sección 6.5.1). En segundo lugar, están aquellos beneficios que resultan de reducciones de emisiones de As mayores a las requeridas, asociadas a la implementación de los paquetes de medidas seleccionados. Estos beneficios se estiman de la misma forma que los beneficios directos de la NPCA, cuya metodología de cálculo se presenta en la Sección 6.4, y sus resultados se presentan en la Tabla 7-15. El tercer componente de los beneficios estimados corresponde a los co-beneficios, que en este caso corresponden a las mejoras en salud de la población expuesta, producto de la mejora de la calidad del aire en MP2,5.

**Tabla 7-15 Beneficios de la NPCA [UF/Año] por reducciones adicionales de arsénico, para año de referencia**

Principal fuente	Localidades	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
<b>Chuquicamata</b>	Calama	-	179	-
	ChiuChiu	-	0	-
<b>HVL</b>	Copiapó	403	851	447
	Tierra Amarilla	15	31	16
<b>Ventanas</b>	Quintero	159	343	37
	Puchuncaví	6	12	1
	Ventanas	12	27	3
<b>Chagres</b>	Catemu	-	-	8
	Panquehue	-	-	4
	Llayllay	-	-	10
<b>Total</b>		<b>595</b>	<b>1.442</b>	<b>526</b>

Nota: Valores estimados considerando la IUR recomendada por la US-EPA. De considerar la IUR de la OMS los beneficios son 2,89 veces menores.

Fuente: Elaboración propia

De esta forma los beneficios de los escenarios regulatorios son los presentados en la Tabla 7-16 y Figura 7-3. Se observa que para la alternativa con un riesgo *acceptable* equivalente a una incidencia de 2 en 10 mil durante toda la vida, los beneficios superan las 150 mil UF/año. En la segunda alternativa, con un riesgo *acceptable* equivalente a una incidencia de 1 en 10 mil durante toda la vida, los beneficios alcanzarían cerca de 380 mil UF/año, es decir, 2,4 veces los beneficios

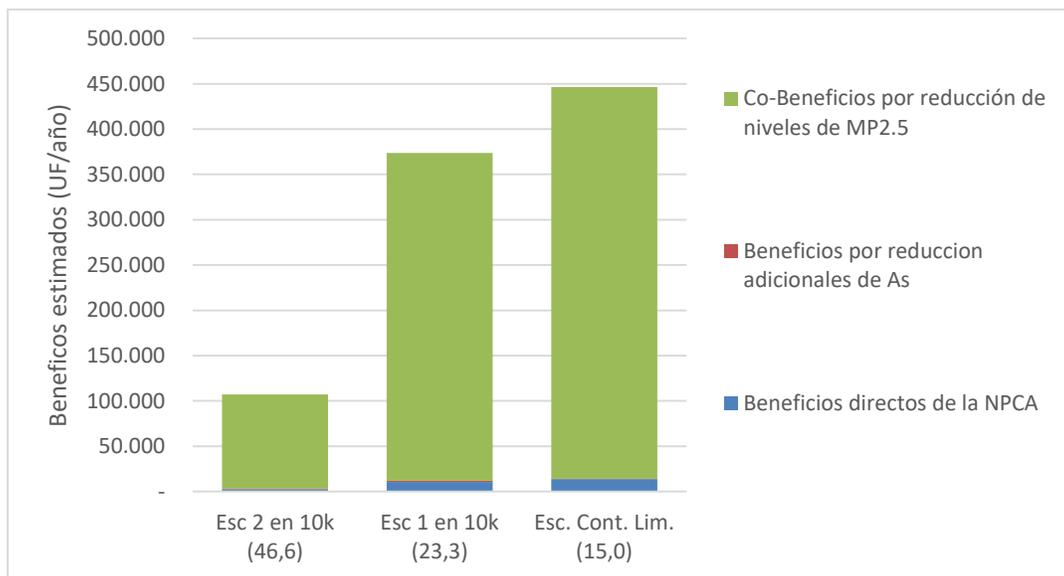
del primer escenario. Por último, la alternativa más ambiciosa alcanza cerca de 470 mil UF/año, equivalente a 3,1 veces los beneficios estimados para el escenario más laxo.

Se destaca también que la componente de mayor relevancia en los beneficios corresponde a los co-beneficios productos de la mejora de la calidad del aire en términos de MP2,5, los cuales representan cerca de 97% de los beneficios totales en todos los casos.

**Tabla 7-16 Beneficios estimados [UF/año] por alternativa regulatoria, para año de referencia**

Componente	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc Cont Lim (15,0)
Beneficios directos de la NPCA	2.580	10.408	13.573
Beneficios por reducción adicionales de As	595	1.442	526
Co-Beneficios por reducción de niveles de MP2,5	103.870	361.748	432.188
<b>Total</b>	<b>107.045</b>	<b>373.598</b>	<b>446.287</b>

Fuente: Elaboración propia



**Figura 7-3 Beneficios estimados [UF/año] por alternativa regulatoria, para año de referencia**

Fuente: Elaboración propia

De la comparación entre los beneficios recién presentados y los costos estimados en la Sección 7.3.2, se observa que los beneficios y costos se encuentra en el mismo orden, con la excepción del escenario más ambicioso donde los costos están un orden de por encima de los beneficios. La magnitud de los beneficios estimados es mayor que los costos en el escenario con un nivel de norma equivalente a 2 en 10 mil (46,6 ng/m<sup>3</sup>), mientras que en los otros escenarios los costos son mayores. Esto se observa en los resumen de indicadores presentados en la Tabla 7-17.

**Tabla 7-17 Indicadores descriptivos de beneficios costos por escenarios, año de referencia**

Escenario	D Emisión [t/año]	Costos [UF/año]	D Cáncer [casos/año]	D Mortalidad [casos/año]	Beneficios [UF/año]	B/C
<b>Esc 2 en 10k (46,6)</b>	11	100.051	0,2	5,4	105.802	1,06
<b>Esc 1 en 10k (23,3)</b>	196	713.756	0,7	18,9	369.031	0,52
<b>Esc Cont Lim (15,0)</b>	266	11.542.409	0,8	22,6	441.151	0,04

D Emisión: Delta emisión o reducción de emisión; D Cáncer: Delta cáncer o reducción en los casos esperados de cáncer; D Mortalidad: Delta mortalidad o reducción de casos esperados de mortalidad prematura; B/C: Beneficios divididos por costos (adimensional).

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7-17 se observa como en la medida que aumenta la ambición de las alternativas regulatorias propuestas los beneficios tienden aumentar linealmente, mientras que los costos aumentan exponencialmente, en la medida que los costos marginales son mayores para las últimas reducciones en cada una de las fundiciones. Cabe destacar que la distribución de los costos y beneficios varía entre las diferentes fundiciones, lo cual se puede observar en la Tabla 7-18, Tabla 7-19 y Tabla 7-20.

Es interesante la dispersión de los resultados del indicador B/C entre las diferentes fundiciones; para HVL se observa que en todos los escenarios se observa que este indicador es mayor a la unidad en todas las fundiciones, situación que no se repite en las otras fundiciones donde los resultados están normalmente bajo la unidad, indicando que socialmente los beneficios son menores que los costos. La explicación de esto guarda relación con los amplios espacios para instalación de medidas de reducción de emisiones a un costo eficiente en HVL, asociado, por ejemplo, a la captura de gases secundarios y la instalación de una planta de flotación de escoria que sustituya los actuales hornos de escoria. Asimismo, los resultados del indicador se ven beneficiados por una población expuesta relativamente alta (superior a las 170 mil habitantes), que hace que las mejoras en calidad del aire tengan un beneficio social mayor.

En contraposición los resultados de las demás fundiciones son menores a la unidad. En el caso de Ventanas, fundición que ya cuenta con una serie de sistemas para la captura y abatimiento de sus emisiones fugitivas, las medidas adicionales para dar cumplimiento son más costosas lo que resulta en costos medios de reducción superiores. En el escenario “1 en 10 k (23,3)”, el nivel de reducciones necesarias justifica la instalación de un sistema de flotación de escorias para reemplazar los hornos de escoria, el cual, si bien tiene un costo total mayor, tiene un costo medio más bajo, lo cual resulta en que el indicador B/C aumente levemente respecto al escenario previo. Por su parte Chuquicamata, al igual que Ventanas ya cuenta con medidas de implementación ya instaladas, lo que hace que las medidas adicionales seleccionadas sean más costosas. En este caso particular, la modelación indica que, para alcanzar los niveles requeridos en el escenario más ambicioso, la fundición debiera incluso reducir su nivel de producción, lo cual resulta en costos significativos. Por último, la fundición Chagres se ve perjudicada por la escasa población expuesta lo que resulta en que la mejora en la calidad del aire resulte en beneficios comparativamente menores en comparación con otras zonas.

**Tabla 7-18 Indicadores descriptivos de beneficios costos por fundición para escenario de alternativa regulatoria “Esc 2 en 10k (46,6)”, año de referencia**

Fundición	D Emisión [t/año]	Costos [UF/año]	D Cáncer [casos/año]	D Mortalidad [casos/año]	Beneficios [UF/año]	B/C
Fundición Chuquicamata	-	-	-	-	-	-
Fundición Altonorte	-	-	-	-	-	-
Fundición Potrerillos	-	-	-	-	-	-
Fundición HVL	5,7	33.282	0,16	4,7	91.089	2,74
Fundición Ventanas	5,8	66.769	0,02	0,8	15.802	0,24
Fundición Chagres	-	-	-	-	-	-
Fundición Caletones	-	-	-	-	-	-
<b>Total</b>	<b>11,4</b>	<b>100.051</b>	<b>0,18</b>	<b>5,5</b>	<b>106.891</b>	<b>1,07</b>

D Emisión: Delta emisión o reducción de emisión; D Cáncer: Delta cáncer o reducción en los casos esperados de cáncer; D Mortalidad: Delta mortalidad o reducción de casos esperados de mortalidad prematura; B/C: Beneficios divididos por costos (adimensional).

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 7-19 Indicadores descriptivos de beneficios costos por fundición para escenario de alternativa regulatoria “Esc 1 en 10k (23,3)”, año de referencia**

Fundición	D Emisión [t/año]	Costos [UF/año]	D Cáncer [casos/año]	D Mortalidad [casos/año]	Beneficios [UF/año]	B/C
Fundición Chuquicamata	158,6	267.883	0,19	3,9	77.502	0,29
Fundición Altonorte	-	-	-	-	-	-
Fundición Potrerillos	-	-	-	-	-	-
Fundición HVL	14,6	207.411	0,41	12,0	234.146	1,13
Fundición Ventanas	22,5	238.462	0,08	3,2	61.578	0,26
Fundición Chagres	-	-	-	-	-	-
Fundición Caletones	-	-	-	-	-	-
<b>Total</b>	<b>195,8</b>	<b>713.756</b>	<b>0,68</b>	<b>19,2</b>	<b>373.226</b>	<b>0,52</b>

D Emisión: Delta emisión o reducción de emisión; D Cáncer: Delta cáncer o reducción en los casos esperados de cáncer; D Mortalidad: Delta mortalidad o reducción de casos esperados de mortalidad prematura; B/C: Beneficios divididos por costos (adimensional).

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 7-20 Indicadores descriptivos de beneficios costos por fundición para escenario de alternativa regulatoria “Esc Cont Lim (15,0)”, año de referencia**

Fundición	D Emisión [t/año]	Costos [UF/año]	D Cáncer [casos/año]	D Mortalidad [casos/año]	Beneficios [UF/año]	B/C
Fundición Chuquicamata	224,9	10.954.956	0,27	5,6	109.734	0,01
Fundición Altonorte	-	-	-	-	-	-
Fundición Potrerillos	-	-	-	-	-	-
Fundición HVL	16,9	250.333	0,47	13,9	270.298	1,08
Fundición Ventanas	23,4	296.725	0,08	3,3	63.884	0,22
Fundición Chagres	1,2	40.395	0,00	0,1	2.236	0,06
Fundición Caletones	-	-	-	-	-	-
<b>Total</b>	<b>266,4</b>	<b>11.542.409</b>	<b>0,83</b>	<b>22,9</b>	<b>446.152</b>	<b>0,04</b>

D Emisión: Delta emisión o reducción de emisión; D Cáncer: Delta cáncer o reducción en los casos esperados de cáncer; D Mortalidad: Delta mortalidad o reducción de casos esperados de mortalidad prematura; B/C: Beneficios divididos por costos (adimensional).

Fuente: Elaboración propia

Para complementar el análisis de los resultados en la Tabla 7-21 se presentan los costos y beneficios medios estimados para las distintas fundiciones. Se observa que los beneficios medios son constantes<sup>85</sup> para cada una de las fundiciones, mientras que los costos medios son crecientes en la medida que aumenta la ambición de los escenarios normativos.

**Tabla 7-21 Costos y benéficos medios por fundición y escenario, año de referencia**

Fundición	Costos Medios [UF/ton As]			Beneficios Medios [UF/caso de cáncer evitado]		
	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)	Esc 2 en 10k (46,6)	Esc 1 en 10k (23,3)	Esc. Cont. Lim. (15,0)
Fundición Chuquicamata	n.a.	1.689	48.721	n.a.	405.388	404.957
Fundición HVL	5.877	14.188	14.818	573.426	570.973	570.352
Fundición Ventanas	11.586	10.578	12.686	769.970	767.065	766.919
Fundición Chagres	n.a.	n.a.	32.892	n.a.	n.a.	2.331.906

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Tabla 7-22 se observa la estimación del indicador B/C frente a la sensibilización del parámetro IUR (ver Sección 6.3 para mayor discusión de cómo se utiliza este valor) y del valor estimado para el parámetro As : MP2,5 en las localidades en torno HVL. Se observa que, entre estos dos factores, los resultados son más sensibles al parámetro As : MP2,5 en las localidades cercanas a la fundición HVL. Justamente en torno a este parámetro se observa que los resultados del indicador B/C puede cruzar la unidad. Por ejemplo, para el escenario “2 en 10k (46,6)” una relación muy alta de As a MP podría resultar en beneficios menores a los costos. De la misma forma, en el escenario “1 en 10k (23,3)” una relación más bajo de As : MP2,5 puede resultar en beneficios mayores a los costos. Cabe destacar que este parámetro afecta únicamente la estimación de los co-beneficios de las localidades en torno a la fundición de HVL.

**Tabla 7-22 Sensibilidad de B/C frente a IUR y escenario As : MP2,5 en HVL**

Escenario As : MP2,5 en HVL	Esc 2 en 10k (46,6)		Esc 1 en 10k (23,3)		Esc. Cont. Lim. (15,0)	
	OMS	US-EPA	OMS	US-EPA	OMS	US-EPA
<b>5,4%</b>	0,61	0,62	0,35	0,36	0,03	0,03
<b>2,7%</b>	1,05	<b>1,06</b>	0,51	<b>0,52</b>	0,04	<b>0,04</b>
<b>0,8%</b>	3,13	3,15	1,25	1,26	0,09	0,09

Fuente: Elaboración propia

<sup>85</sup> Se observan pequeñas variaciones (< 0,3%) explicadas por redondeos y agrupaciones de los valores.

## 8. Conclusiones

El presente estudio se desarrolló para dar cumplimiento al objetivo de entregar antecedentes para la elaboración de una NPCA de arsénico. Para ello se realizó una revisión, sistematización y análisis de la calidad del aire, las emisiones del contaminante, sus consecuencias en la salud humana y la relación emisión concentración. A partir de la revisión de estos antecedentes, en conjunto con la experiencia internacional, se proponen tres alternativas de escenarios regulatorios, los cuales son evaluados en términos de beneficios y costos sociales. A continuación, se presentan las conclusiones del desarrollo de las diferentes actividades.

Sobre el análisis de la **calidad del aire**, los niveles de concentración de arsénico observados en las estaciones del país oscilan en un amplio rango, con zonas con concentraciones promedios anuales cercanas a 1 ng/m<sup>3</sup>, mientras otras tienen valores medios muy por sobre los 100 ng/m<sup>3</sup>, con Doña Inés cercana a la fundición Potrerillos con valores por sobre 1 ug/m<sup>3</sup>. Si bien, las estaciones con las mayores concentraciones de As son estaciones de monitoreo que no cuentan con representatividad poblacional, dan cuenta de la amplia variación de valores que se pueden encontrar en el país, las cuales dependen tanto de las condiciones base como los aportes basales, la topología y meteorología, como de otras condiciones como la ubicación de las estaciones de monitoreo respecto de las fuentes emisoras y el nivel de emisión de estas últimas.

A pesar de la variabilidad de las concentraciones observadas de arsénico, se observa que consistentemente las zonas cercanas a las fundiciones de Cobre tienen concentraciones mayores al resto de las zonas del país. De esta forma considerando localidades en las cercanías de las fundiciones<sup>86</sup> con estaciones de control se observa una concentración promedio anual ponderada por población de 20,8 ng/m<sup>3</sup>. Aun así, dentro de estas localidades se observan diferencias relevantes, con concentraciones en el año 2020 que superaron en promedio los 40 ng/m<sup>3</sup> (La Negra, Copiapó y Quintero), mientras que otras estaciones tienen concentraciones promedias menores a 10 ng/m<sup>3</sup> (ChiuChiu, Antofagasta, El Salvador y Coya). En contraposición, las mediciones de arsénico en lugares fuera del área de influencia de las fundiciones, se observan niveles menores a 4 ng/m<sup>3</sup>, salvo en dos estaciones ubicadas en el desierto de Atacama. En estas dos estaciones los niveles promedian 10 ng/m<sup>3</sup>, dando cuenta de la influencia del aporte basal del desierto sobre los niveles observados.

El análisis anterior está limitado por la falta de información en otras zonas, pues de las 46 estaciones con mediciones de arsénico 72% de ellas están ubicadas en zonas de influencia de las fundiciones. Asimismo, estas estaciones también tienen las series de tiempo más largas y, en general, una mayor frecuencia de medición. Sin embargo, las observaciones en otras zonas incluyen zonas afectadas por diferentes fuentes tales como termoeléctricas (Tocopilla y

---

<sup>86</sup> Considerando, Chuquicamata: Calama y ChiuChiu; Altonorte: La Negra y Antofagasta; Potrerillos: El Salvador y Potrerillos; HVL: Copiapó y Tierra Amarilla; Ventanas: Quintero, Puchuncaví y Ventanas, Chagres: Catemú; Caletones: Coya.

Mejillones), refinerías (Concón), así como ciudades (Santiago y Temuco). Esta variedad de fuentes hace presumir que, en el resto de las zonas, actualmente sin medición, también tendrían valores de arsénico bajos (<5 ng/m<sup>3</sup>). La excepción serían aquellas zonas afectadas con niveles basales, tal como lo muestran las mediciones en estaciones cercanas a la minera Spence, o las estimaciones de la contribución basal en Calama, donde se encontrarían niveles cercanos a los 10 ng/m<sup>3</sup>.

El hecho de que en las zonas cercanas a las fundiciones se observen mayores concentraciones coincide con la estimación del **inventario de emisiones**. Este inventario, con año base 2020, estima una emisión anual de 473 toneladas de As, de las cuales sobre el 99% provienen de las fundiciones de cobre. Al respecto se destaca que los balances de masa desarrollados por las fundiciones y mandatados por la actual Norma de Emisión (DS28/2013 del MMA), han permitido contar con mejores estimaciones de las emisiones. Las actuales estimaciones incluyen las emisiones fugitivas, las cuales de otra forma no serían posibles de estimar con precisión. La estandarización de este proceso, junto con la supervisión de la SMA de los reportes, permite contar con estimaciones realizadas bajo metodologías comparables. Aun así, se observa que durante los años 2019 y 2020 dos fundiciones reportaron reiteradamente balances mensuales negativos, lo cual ha implicado, por un lado, la acción de la SMA en el marco de las exigencias de la Norma, pero que también han complejizado el análisis realizado en el presente estudio. Por esto se optó por proponer una reestimación de las emisiones de una de las fundiciones a partir de sus reportes técnicos posteriores lo cuales cuentan con una metodología que refleja más fielmente sus operaciones.

Más allá del aporte procedimental del DS28/2013, el cual ha permitido disponibilizar información valiosa para el presente estudio, también ha contribuido significativamente a la reducción de las emisiones de As, así como a la consiguiente mejora en la calidad del aire de las zonas cercanas. De la estimación de emisiones reportadas por las fundiciones se observa que, a la fecha, los límites anuales de emisión se han cumplido en todas las fundiciones durante los años que ha regido el DS28/2013<sup>87</sup>.

Comparando los tres años desde que aplica la norma con tres años posterior al DS 28/2013<sup>88</sup>, se estiman mejoras de As en las concentraciones observadas. Estas van desde reducciones cercanas a 80% en el caso de Chuquicamata y Potrerillos, a 70% para Caletones, a 40% para Ventanas. De estas reducciones, se destaca que parte de ellas corresponde a los procesos de puesta en marcha, destacando que tanto Chuquicamata como Potrerillos al 2020 aún no alcanzaban sus niveles normales de procesamiento. Por esta razón, tanto sus emisiones y, por lo tanto, los niveles de

---

<sup>87</sup> Esto sin considerar los problemas de balance de masa que han tenido algunas de las fundiciones, en los que se han reportado balances mensuales negativos y ha implicado acción de la SMA para mejorar sus metodologías de estimación.

<sup>88</sup> Para Altonorte, Ventanas y Chagres, se compara 2013-2015 con 2018-2020, mientras que para Chuquicamata, Potrerillos, HVL y Caletones, se compara 2015-2017 con 2020-2021.

concentración atmosférica de As en las estaciones cercanas, son menores a los esperados cuando las fuentes emisoras de arsénico operen en un régimen normal. Sin perjuicio de lo anterior, un análisis unitario, como el presentado en la Tabla 8-1, permite observar que las fundiciones con mejoras en la calidad del aire, son las que tuvieron las principales mejoras en término de intensidad de emisión.

Cabe destacar que los resultados de intensidad de emisiones presentados en la Tabla 8-1 permite observar diferencias de entre 4-5 veces entre las fundiciones con mayor intensidad y las con menor intensidad. Esta diferencia se explica, en parte, por la diferencia en el contenido de arsénico en los concentrados procesados, con las fundiciones ubicadas en la zona más norte (DCH, ALN y POT) procesando concentrados con contenidos superiores al 0,5%, mientras el resto de las fundiciones (HVL, VEN, CHG y CAL) procesan concentrados con contenidos promedios de arsénico menores a 0,15%. Otra explicación, de la intensidad de emisiones tiene que ver con las tecnologías instaladas, tanto en el proceso mismo de fundición, como en los sistemas de captura y tratamiento de los gases. Al respecto cabe destacar que todas las fundiciones están alcanzando una eficiencia de fijación y captura superior al 95% exigido en el DS 28/2013.

**Tabla 8-1 Intensidad de emisiones [g As/t Cu producido], periodo 2017 a 2020**

Año	DCH	ALN	POT	HVL R/RE (1)	VEN	CHG	CAL
<b>2017</b>	1.854	407	7.744	242	252	192	495
<b>2018</b>	442	425	4.255	91	151	229	420
<b>2019</b>	615	383	883	-77/130	149	276	162
<b>2020</b>	840	453	760	165/237	174	174	209
<b>2019-2020</b>	<b>728</b>	<b>418</b>	<b>822</b>	<b>44/182</b>	<b>162</b>	<b>225</b>	<b>185</b>

- (1) Para los años 2019 y 2020 se presentan los valores reportados y recalculados. R corresponde a emisión reportada con cuestionamientos sobre la aplicación de la metodología y su representación de la operación real. RE corresponde a estimación revisada según método basado en intensidad de emisiones promedio reportado en periodo oct/2020 a sep/2021 y nivel de actividad reportado para los años respectivos.

Fuente: Elaboración propia

Respecto a las fundiciones de HVL y Chagres se observa un aumento de los niveles de concentraciones de As observado entre ambos periodos. En el caso de HVL, el aumento de las concentraciones viene a apoyar el resultado del proceso de reestimación (realizado que apuntaba a que sus emisiones para el año 2020 (re-estimadas en 18,7 ton/año), estaban más cercanas a las reportadas entre 2016-2017 (21 y 21 ton/año) que al periodo pre norma 2011-2015 (entre 7 y 14 ton/año). En el caso de Chagres se destaca que a pesar de observarse una leve mejora en término de emisiones se observa un aumento de los niveles medidos de arsénico. En el caso de Chagres, se observa que la comparación se ve afectada por las concentraciones reportadas el año 2018, donde se observaron valores anormalmente altos en el segundo trimestre del año (hasta esa fecha se reportaban trimestralmente), así como en agosto (en el segundo semestre se reportan mensualmente). Al respecto, no se observan variaciones en las emisiones reportadas, ni en los parámetros meteorológicos que pudieran explicar el aumento en las concentraciones observadas. Se destaca que, sin considerar ese año, se observan que las

concentraciones no han variado sustancialmente respecto al periodo pre-norma, manteniéndose promedios del periodo en el rango  $\pm 5\%$  respecto del periodo pre norma en todas las estaciones.

Dado que algunas de las fundiciones no están operando en su régimen normal, fue necesario realizar la proyección de su operación a una situación en régimen para estimar sus emisiones y los consiguientes cambios en la calidad del aire observado. La proyección consideró las actuales proyecciones nacionales de Cochilco (2021). Para proyectar las concentraciones, se realizó una definición de la **relación emisión-concentración**. Esta definición se basó en la modelación de la dispersión de las emisiones de arsénico en las zonas en torno a cada una de las fundiciones. El modelo de dispersión se realizó siguiendo los lineamientos oficiales del SEA, calibrando sus resultados con las emisiones y concentraciones observadas en el año 2020.

Según la comparación entre datos promedio de concentración de arsénico modelados versus observados en las estaciones de referencia para obtención del FEC, se puede determinar que existe una variación de resultados. Esto se condice con las variables de incertidumbre que indicaron que en general, existe sobreestimación (considerando la mayoría de las estaciones representativas), conservando la homogeneidad y baja dispersión. Si bien, variaciones se deben a una multivariada de factores involucrados en cada dominio (topografía, parametrizaciones utilizadas en el WRF, estimación de el régimen de operación de las plantas, estimación de las emisiones fugitivas, asimilación de emisiones fugitivas como difusas en el modelo Calpuff, etc.), la metodología propuesta para la obtención del FEC por fuente incorpora la incertidumbre asociada a los modelos aplicados, meteorológicos y de dispersión atmosférica.

Al realizar un análisis comparativo entre los resultados modelados y los observados de arsénico en las estaciones, en la mayoría de los casos se apreció una buena correlación. No obstante, los resultados del modelo de dispersión atmosférica aplicado presentaron, en líneas generales, una sobreestimación homogénea en los niveles de concentración de arsénico en las estaciones. Por lo tanto, a pesar de que se presenten diferencias entre modelado y observado, los resultados de la modelación son ajustados según las concentraciones observadas para la determinación del factor emisión - concentración FEC que se ajuste a las observaciones. Se destaca que esta metodología resulta válida siempre y cuando se trate de un valor promedio anual y no un análisis episódico (horaria o diaria). Esto último se considera válido al considerar que los riesgos sobre la salud de la población, que la NPCA busca prevenir, están asociados a una exposición crónica y no aguda. De los resultados de este proceso se pudo distinguir entre el impacto en los niveles observados de aquellas fuentes puntuales con estimaciones más precisas dado los reportes técnicos en el marco del DS28/2013, del resto de las emisiones, las cuales son principalmente fugitivas. Esta diferencia permitió posteriormente estimar con mayor precisión el efecto de las diferentes medidas sobre las concentraciones observadas.

Respecto al proceso de modelación de la relación emisión-concentración, se destaca que para estimar el efecto agregado se estimó la concentración basal, entendida como el aporte a la concentración observada que no se relaciona con las emisiones anuales de arsénico. Dada las limitaciones del estudio, se optó por un análisis estadístico de las series de concentraciones para

estimar las concentraciones basales. En base a este análisis se logró estimar una concentración base para cada una de las localidades en el área de influencia de las fundiciones. Este método de determinación del nivel basal tiene sus limitaciones, como que depende de series de tiempo largas y suficientemente pobladas para representar diferentes estados de operación de las fundiciones. Como resultado de esta limitación, algunas de las estimaciones resultantes podrían estar sobreestimadas, sobre todo en aquellas con estaciones con una serie de datos corta, con baja frecuencia de medición, o que utilizan compósitos de periodos largos para determinar las concentraciones reportadas.

En este marco es destacable la necesidad de estandarizar el número de mediciones de Arsénico, observándose que actualmente en las zonas con fundiciones el estándar es de 1 medición cada tres días, lo cual es cercano al estándar recomendado por la UE de 1 medición cada dos días (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004). Lo anterior, no sólo permite mejores análisis estadísticos de los datos de concentración permitiendo mejores estimaciones de las concentraciones basales, sino que también permite disminuir la incertidumbre respecto a la concentración media de cada localidad. Además, se deben estandarizar los métodos analíticos de medición de arsénico en material particulado, los cuales se sugiere que deben consistir en análisis por espectrometría de absorción atómica o espectrometría de masa (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004), así como los límites de detección mínimos.

Dada la relevancia de las concentraciones basales estimadas en la relación emisión-concentración y, por lo tanto, en los resultados de la proyección de los escenarios regulatorios, es recomendable realizar los estudios pertinentes que permitan complementar los resultados estadísticos y robustecer conclusiones del presente estudio.

En lo que se refiere a los **efectos en salud sobre la población humana**, el arsénico es un reconocido tóxico que puede estar en variadas formas químicas, siendo las formas inorgánicas y cuya toxicidad en humanos se debe a la exposición principalmente a formas inorgánicas. Este tóxico afecta a casi todos los procesos celulares y funciones de los órganos del cuerpo. La inhalación normalmente aporta menos del 1% de la dosis total absorbida de arsénico en el ser humano, siendo la ingesta la principal vía de exposición.

Dependiendo del tipo de exposición al arsénico, es decir, de corto (exposición aguda) o largo plazo (exposición crónica), el desarrollo de síntomas clínicos varía. Para observar una intoxicación aguda debe existir exposición a dosis particularmente altas, tanto que éstas no se ven en ambientes comunitarios, sino solamente en exposiciones ocupacionales y que pueden producir daños en los órganos que pueden provocar la muerte. Estudios de exposición ocupacional han mostrado una clara correlación entre la exposición al arsénico inorgánico y la mortalidad por cáncer de pulmón (efecto crítico), motivo por el cual múltiples organizaciones los han clasificado como carcinógeno en humanos.

El efecto crítico a la salud por la exposición al arsénico en el aire es el cáncer de pulmón, y su caracterización se realiza mediante la estimación del riesgo incremental de cáncer que

corresponde al incremento en la probabilidad de un individuo de desarrollar cáncer por la exposición a un compuesto cancerígeno. La estimación del riesgo de cáncer de por vida para las sustancias cancerígenas por la vía de inhalación, se lleva a cabo usando las concentraciones en el aire de la sustancia cancerígena y el criterio de toxicidad que en este caso corresponde el Riesgo Unitario Inhalatorio (IUR). De los IUR identificados se releva la aproximación de la US-EPA ( $4,3e-6$  por  $ng/m^3$ ), y la de la OMS que es 2,89 veces menor ( $1,5e-6$  por  $ng/m^3$ ).

Al respecto cabe destacar que los beneficios directos por reducción de la exposición de la población al arsénico son directamente proporcionales al valor de IUR considerado, y luego los resultados considerando el IUR de la OMS da cuenta de beneficios directos 2,89 veces menor que los resultados de considerar el IUR de la US-EPA. Para el análisis exploratorio de los posibles escenarios regulatorios, se consideró el IUR de la US-EPA por ser mayor y luego ser más estricto. Esto quiere decir que, para alcanzar un mismo nivel de riesgo, por ejemplo,  $1e-4$  el valor que se deriva de usar el IUR de la US-EPA es más exigente ( $23,3 ng/m^3$  de arsénico) que el valor que se deriva de usar el IUR de la OMS ( $66,6 ng/m^3$  de arsénico).

Para definir las **propuestas de escenarios regulatorios de la NPCA**, es relevante considerar que las NPCA tiene el objetivo de regular aquellos contaminantes que tienen riesgo para la salud. Actualmente la legislación nacional no explícita un nivel de riesgo predefinidamente considerado como *acceptable*. Definir cuál es el nivel de riesgo *acceptable* es una cuestión que requiere amplio debate académico, social y político, el cual no se ha resuelto. En la práctica, en el caso chileno, la regulación de As en agua potable da un primer indicador de lo considerado aceptable, donde los valores normados equivalen a un riesgo cercano a  $2e-4$ , es decir, una incidencia de 2 en 10mil durante toda la vida. Internacionalmente, el riesgo *acceptable* también varía de forma considerable, generalmente dentro de rangos entre  $1e-6$  y  $1e-4$ , lo cual da paso a un amplio rango de valores asociados a normas sobre las concentraciones de arsénico, cuyos riesgos estimados se mueven dentro de estos rangos. Como un antecedente interesante, la US-EPA en general considera como un límite superior de riesgo *acceptable*  $1e-4$ <sup>89</sup>. Aun así, en EEUU no existe una Norma de Calidad federal para el Arsénico. Sin perjuicio de esto, sí existen valores normados en las regulaciones de algunos estados que oscilan entre 0,2 (riesgo equivalente de  $1e-6$ ) y 23 (riesgo equivalente de  $1e-4$ ), ninguno de los estados con regulación cuenta con fundiciones de cobre.

En la UE sí cuentan con algunas fundiciones de cobre, y presentan un valor objetivo transversal para todos los miembros. Este valor objetivo a diferencia de una NPCA, es exigible sólo en los casos en que los costos para alcanzarlo sean razonables, aunque para las zonas donde no se alcanza el valor objetivo se exige *“demostrar que aplican todas las medidas necesarias que no generen costos desproporcionados, dirigidas en partículas a las fuentes de emisión principales, para alcanzar los valores objetivos”* – Directiva 2004/107/CE (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004 Art.3).

---

<sup>89</sup> Más sobre el tratamiento de riesgo de contaminantes tóxicos en el aire por la US-EPA disponible en: <https://www.epa.gov/national-air-toxics-assessment/nata-frequent-questions#risk2> (abril 2022)

Los niveles de riesgos estimados para un año de referencia con operación normal se presenta en la Figura 8-1. Se observa que la situación es variada en las diferentes localidades presentadas, tanto en términos de concentración total proyectada y a la contribución del background. De esta forma se observa localidades, como ChiuChiu, El Salvador o Coya con niveles de concentración de arsénico similares al valor objetivo de la UE. En el caso contrario, Calama, La Negra, Copiapó y Quintero superan en 6 veces el valor objetivo de la UE. Más aún hay localidades donde sólo el background estimado supera los niveles de valor objetivo, por lo que incluso sin el efecto de las fuentes emisoras no se alcanzaría el nivel de calidad atmosférica objetivo de la UE.

En vista de los antecedentes expuestos, se propusieron tres alternativas regulatorias posibles de alcanzar en el contexto nacional que representan diferentes niveles de riesgo: un primer escenario con un riesgo adicional equivalente al riesgo del arsénico en el agua potable, es decir,  $2e-4$  ( $46,6 \text{ ng/m}^3$ ), un escenario intermedio con un riesgo adicional de  $1e-4$  ( $23,3 \text{ ng/m}^3$ ) equivalente a límite superior del riesgo *acceptable* según los criterios de la US-EPA, y un tercer escenario más ambicioso, el cual se definió considerando la mayor estimaciones de contribución basal ( $9 \text{ ng/m}^3$ ) más una contribución de las fuentes equivalente al valor objetivo europeo ( $6 \text{ ng/m}^3$ ), lo que equivale a una norma de  $15,0 \text{ ng/m}^3$ , lo cual es equivalente a un riesgo adicional equivalente de  $0,67e-4$ . Las alternativas regulatorias propuestas se presentan de forma gráfica en la Figura 8-2.

Las tres alternativas propuestas coinciden con la mayor parte de las regulaciones internacionales en regular las concentraciones promedio anuales, lo cual sucede pues el impacto más estudiado del arsénico corresponde a su contribución al riesgo de cáncer, lo cual resulta de una exposición crónica. Si bien la legislación nacional no contempla, en las regulaciones internacionales suelen considerar un margen de flexibilidad en aquellos casos donde existen fundiciones de cobre. Como una aproximación de este análisis se presentan en los Anexos (ver Sección 10.10) un análisis de los costos y beneficios para escenarios cuyo valor límites consideran las contribuciones basales en cada una de las localidades.

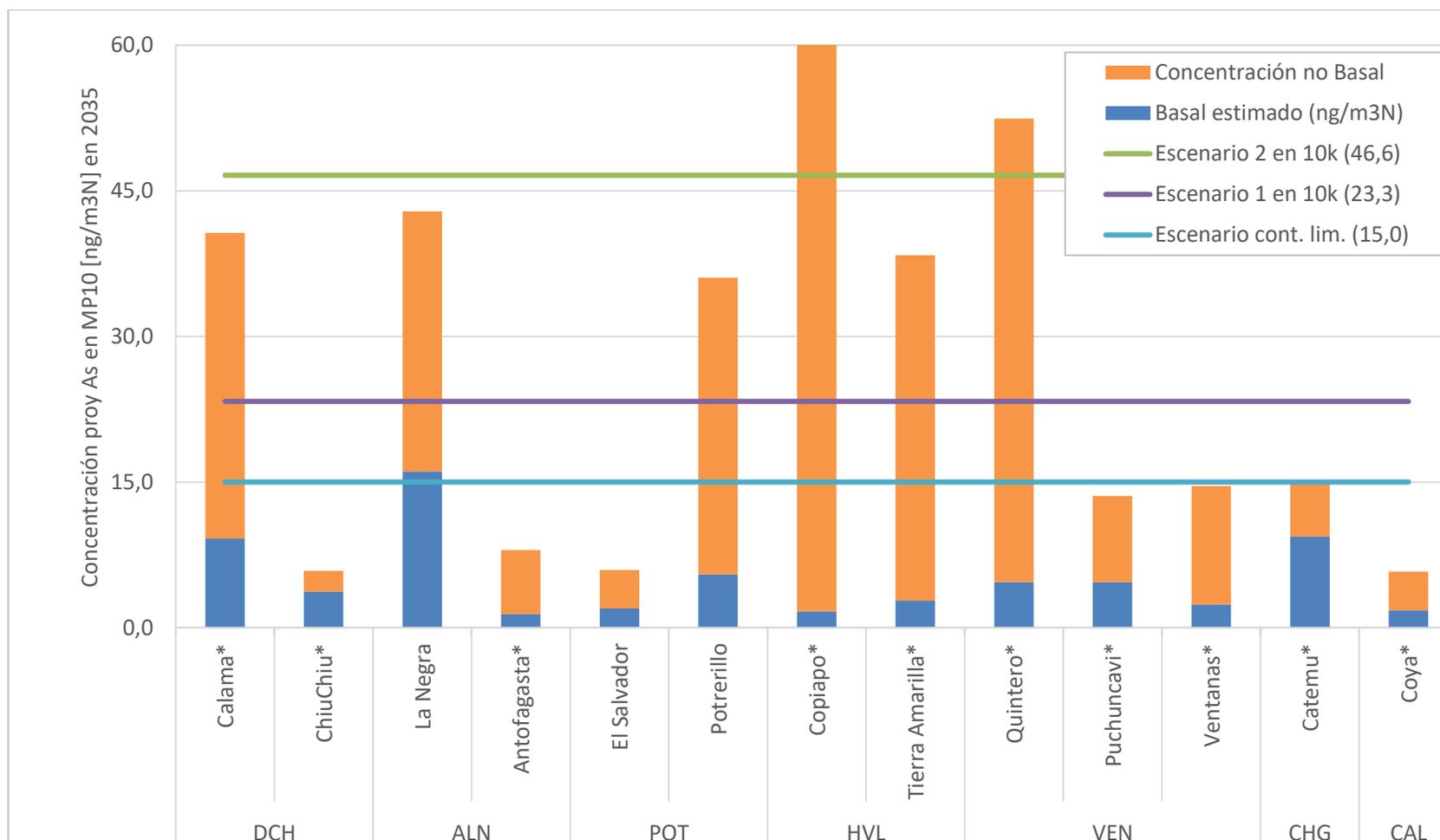
Una normativa con flexibilidad podría ser más eficiente para un mismo nivel, permitiendo que la normativa se enfoque en el aporte humano “gestionable”, y de esta forma permitiendo una mayor protección de la salud de la población en aquellas zonas en que se pueden implementar medidas más ambiciosas. A modo de ejemplo, la comparación entre una norma fija de  $23,3 \text{ [ng/m}^3]$  y una norma variable que considere el basal +  $14 \text{ [ng/3]}$ , entrega el mismo nivel de protección para la zona con el mayor aporte basal, pero permite una mayor protección en zonas con menor aporte basal. Esto puesto que el riesgo adicional *aceptado* es menor en las demás localidades pudiendo llegar a ser hasta un tercio menor ( $0,67$  en  $10 \text{ mil}$ ), a pesar de que la contribución directa de las fuente de emisión de arsénico al riesgo adicional es el mismo. Desde el punto de vista de los resultados de los costos y beneficios estimados, se observa un aumento de los beneficios en estas zonas de un  $8\%$ , mientras que los costos aumentarían en un  $7\%$ , esto permite alcanzar una relación beneficio-costos mayor.



\* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10

**Figura 8-1 Proyección base de concentración de Arsénico en MP10 [ng/m3N] al 2035**

Fuente: Elaboración propia



\* Localidad cuenta con estación con representatividad de MP10

**Figura 8-2 Escenarios regulatorios propuestos**

Fuente: Elaboración propia

Los principales indicadores de los resultados de la evaluación socioeconómica de cada una de las alternativas regulatorias propuestas se presentan en la Tabla 8-2. Para la determinación de estos resultados fue necesario identificar un conjunto de medidas aplicables a cada una de las fundiciones que permitieran dar cumplimiento a los niveles definidos en cada una de las alternativas. Estas medidas, sus eficiencias y costos, fueron levantadas tanto de la comparación cruzada entre las tecnologías aplicadas en las fundiciones chilenas para dar cumplimiento a la Norma de Emisión, así como por antecedentes internacionales. Dentro de estos últimos se destacan los antecedentes recogidos y disponibilizados en el proceso vigente de actualización en EEUU de la norma de emisión de para fundiciones de Cobre (US-EPA, 2022), los cuales sistematizan los últimos antecedentes disponibles.

Las medidas evaluadas consideraron 12 tecnologías que podrían instalarse en las fundiciones chilenas, que cubren todos los procesos unitarios salvo los secadores de concentrados, los cuales, en base a los antecedentes disponibles, se estima que tienen una emisión despreciable. Asimismo, incluyó la alternativa de que, en lugar de implementar una medida especialmente costosa, las fundiciones pudieran reducir su nivel de actividad para dar cumplimiento a las exigencias. La selección del conjunto de medidas, las cuales tienen consecuencia en los costos y beneficios de la norma, se realizó mediante un proceso de optimización de los costos totales sujeto al cumplimiento de los niveles de la norma.

De los resultados se observa que mientras los beneficios aumentan de forma lineal con la reducción de casos evitados y, por lo tanto, con la reducción de los niveles de arsénico en el aire, los costos aumentan aceleradamente. Lo anterior implica que en la medida que los escenarios sean más exigentes los costos aumentan más rápido con los beneficios. Lo anterior se refleja en el indicador B/C de la Tabla 8-2, donde se observa que para el escenario más ambicioso es de 0,04, mientras que en el escenario con un riesgo equivalente a  $2e-4$  los beneficios superan a los costos en un ratio de 1,06.

**Tabla 8-2 Indicadores descriptivos de beneficios costos por escenarios, año de referencia**

Escenario	D Emisión [t/año]	Costos [UF/año]	D Cáncer [casos/año]	D Mortalidad [casos/año]	Beneficios [UF/año]	B/C
<b>Esc 2 en 10k (46,6)</b>	11	100.051	0,2	5,4	105.802	1,06
<b>Esc 1 en 10k (23,3)</b>	196	713.756	0,7	18,9	369.031	0,52
<b>Esc Cont Lim (15,0)</b>	266	11.542.409	0,8	22,6	441.151	0,04

D Emisión: Delta emisión o reducción de emisión; D Cáncer: Delta cáncer o reducción en los casos esperados de cáncer; D Mortalidad: Delta mortalidad o reducción de casos esperados de mortalidad prematura; B/C: Beneficios divididos por costos (adimensional).

Fuente: Elaboración propia

Como toda modelación los resultados dependen de los supuestos y metodologías considerada. En ese aspecto es relevante considerar que la mayor parte de la metodología utilizada está en línea con los lineamientos oficiales para la elaboración de este tipo de análisis (MMA, 2013b), siendo adaptada para la evaluación de un contaminante tóxico como el arsénico. Respecto a los supuestos utilizados, estos fueron los que a juicio del consultor resultaban los más confiables. En particular respecto a la identificación de los paquetes de medidas y su estimación de costos, en

la práctica estos pueden desviarse de los estimados en el presente estudio, y su estimación precisa requiere de costosos estudios de ingeniería de detalle que adapten las medidas a la realidad específica de cada operación. En este sentido, el objetivo de la modelación realizada no es predecir el costo exacto, sino que dar cuenta de la magnitud posible de los costos.

Por parte de la estimación de los beneficios, se destaca que la mayor parte de ellos provienen de los co-beneficios asociados a la mejora en la salud de la población por la mejora de los niveles de MP2,5 a consecuencia de la implementación de medidas para regular las emisiones de As. En este aspecto, se destaca como uno de los supuestos más relevantes la relación de As a MP2,5 provenientes de la fundición en los alrededores de la fundición HVL. Si bien, este supuesto fue realizado para cada una de los entornos de las fundiciones, en el resto de los casos se contaron con estudios o datos suficientes para aproximar esta relación, situación que no se logró en esta fundición. Frente a esto, se optó por utilizar el valor medio de los estimados para las demás fundiciones (2,7%) y sensibilizar con los valores extremos estimados (0,8% y 5,4%). De la misma forma, también se consideró como un supuesto relevante el IUR que relaciona el riesgo incremental de cáncer por inhalación de arsénico. Los valores centrales reportados consideran el IUR recomendado por la US-EPA de  $4,3e-6$  (por ng/m<sup>3</sup>), pero fueron sensibilizados con el IUR recomendado por la OMS que es 2,89 veces menor, es decir,  $1,5e-6$  (por ng/m<sup>3</sup>).

Los resultados de esta sensibilización se presenta en la Tabla 8-3, donde se observa que el efecto de la proporción As a MP2,5 en HVL tiene un efecto más relevante que la variación del IUR considerado, observándose que incluso podría cambiar el indicador de B/C, pasando por la unidad implicando que los beneficios podrían ser mayores que los costos según la variación de este parámetro.

**Tabla 8-3 Sensibilidad de B/C frente a IUR y escenario As : MP2,5 en HVL**

Escenario As : MP2,5 en HVL	Esc 2 en 10k (46,6)		Esc 1 en 10k (23,3)		Esc. Cont. Lim. (15,0)	
	OMS	US-EPA	OMS	US-EPA	OMS	US-EPA
<b>5,4%</b>	0,61	0,62	0,35	0,36	0,03	0,03
<b>2,7%</b>	1,05	<b>1,06</b>	0,51	<b>0,52</b>	0,04	<b>0,04</b>
<b>0,8%</b>	3,13	3,15	1,25	1,26	0,09	0,09

Fuente: Elaboración propia

Por último, cabe destacar el efecto que tienen la representatividad poblacional de las estaciones consideradas. Los casos particulares de La Negra y Potrerillos, las cuales no cuentan con representatividad, implican que a pesar de que las concentraciones proyectadas superan los niveles en algunos escenarios, no sea necesario implementar medidas para su reducción. Al respecto, se realizó la sensibilización a la modelación considerando el caso en que estas estaciones si fueran consideradas como representativas. Los resultados de esto, es que en los dos escenarios más ambiciosos evaluados (23,3 y 15 ng/m<sup>3</sup>) sería necesario la implementación de medidas de mitigación, e incluso de la reducción de los niveles de producción para alcanzar dichos niveles. Lo anterior conjugado con una población, en comparación con otras zonas, más pequeña, resulta en indicadores B/C por debajo de los observados en las otras fundiciones. Este indicador se encuentra en el orden de los 0,01 para estas fundiciones en el escenario de 23,3

[ng/m<sup>3</sup>] y de 0,005 en el escenario de 15,0 [ng/m<sup>3</sup>]. De esta forma, las conclusiones del estudio pueden variar de considerar estas estaciones en los escenarios normativos futuros.

## 9. Referencias

- AngloAmerican. (2021). Antecedentes para proceso de revisión Decreto Supremo 28 de 2013 que establece Norma de Emisión para fundaciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico.
- ARSENIC PENTOXIDE HSDB® - Hazardous Substances Data Bank. (1992).
- ATSDR. (2007). TOXICOLOGICAL PROFILE FOR ARSENIC U.S., 139(6), 2557–2565.  
<https://doi.org/10.1088/0004-6256/139/6/2557>
- ATSDR. (2016). Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Addendum to the toxicological profile for arsenic. Division of Toxicology and Human Health Sciences. *Agency for Toxic Substances and Disease Registry*, (February).
- CARB. (1990). *Technical support document: proposed identification of inorganic arsenic as a toxic air contaminant. Part B – health assessment*, [236p., May].
- Cochilco. (2021). *Proyección de la producción de cobre en Chile 2021-2032*.
- CODELCO. (2021). Antecedentes generales para el proceso de revisión de la norma de emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico contenida en el DS28 de 2013 del MMA.
- COPRIM. (2012). *Evaluación de costos de escenarios regulatorios para una norma de emisión de fundiciones de cobre*.
- Costa, M. (2019). Review of arsenic toxicity, speciation and polyadenylation of canonical histones. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 375(May), 1–4.  
<https://doi.org/10.1016/j.taap.2019.05.006>
- DEM-RI. (2008). Rhode Island Air Toxics Guideline. Retrieved from Rhode Island Air Toxics Guideline [REVISED]
- DIPRES. (2021). Acta de Resultados del Comité Consultivo del Precio de Referencia del Cobre 2021.
- EGLE. (2004). Table 1 . Michigan Department of Environment , Great Lakes , and Energy - Air Quality Division List of Screening Levels ( ITSL , IRSL & SRSL ) in Alphabetical Order. Retrieved from [https://www.michigan.gov/documents/deq/deq-aqd-toxics-ITSLALPH\\_244167\\_7.pdf](https://www.michigan.gov/documents/deq/deq-aqd-toxics-ITSLALPH_244167_7.pdf)
- EMEP/EEA. (2019). 2.C.7.a Copper production. In *Air pollutant emission inventory guidebook 2019* (pp. 1–22).
- Emery, C., Liu, Z., Russell, A. G., Odman, M. T., Yarwood, G., & Kumar, N. (2017). Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 67(5), 582–598.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1265027>
- Entec UK Limited. (2001). Economic evaluation of air quality targets for heavy metals. Report for the European commission. Final report. For the European Commission, (January), 196p. Retrieved from [https://ec.europa.eu/environment/enveco/air/pdf/report\\_heavy\\_metals.pdf](https://ec.europa.eu/environment/enveco/air/pdf/report_heavy_metals.pdf)
- Erraguntla, N. K., Sielken, R. L., Valdez-Flores, C., & Grant, R. L. (2012). An updated inhalation unit risk factor for arsenic and inorganic arsenic compounds based on a combined analysis of epidemiology studies. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 64(2), 329–341.  
<https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2012.07.001>

- European Commission. (2000). *Ambient Air Pollution by AS, CD and NI compounds*.
- Fang, X., Bi, X., Xu, H., Wu, J., Zhang, Y., & Feng, Y. (2017). Source apportionment of ambient PM10 and PM2.5 in Haikou, China. *Atmospheric Research*, 190, 1–9. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2017.01.021>
- Gao, S., Cong, Z., Yu, H., Sun, Y., Mao, J., Zhang, H., ... Bai, Z. (2019). Estimation of background concentration of PM in Beijing using a statistical integrated approach. *Atmospheric Pollution Research*, 10(3), 858–867. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.12.014>
- Gidhagen H. Kahelinb, P. Schmidt-Thome, C. Johansson, L. (2002). Anthropogenic and natural levels of arsenic in PM10 in Central and Northern Chile. *Atmospheric Environment*, 36, 3803–3817.
- Giostra, U., Furlani, F., Arduini, J., Cava, D., Manning, A. J., O’Doherty, S. J., ... Maione, M. (2011). The determination of a “regional” atmospheric background mixing ratio for anthropogenic greenhouse gases: A comparison of two independent methods. *Atmospheric Environment*, 45(39), 7396–7405. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2011.06.076>
- Glad, J. A., Brink, L. L., Talbott, E. O., Lee, P. C., Xu, X., Saul, M., & Rager, J. (2012). The relationship of ambient ozone and PM2.5 levels and asthma emergency department visits: Possible influence of gender and ethnicity. *Archives of Environmental and Occupational Health*, 67(2), 103–108. <https://doi.org/10.1080/19338244.2011.598888>
- Gobierno de Bolivia. (1995). Bolivia: Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica, 8 de diciembre de 1995. Retrieved from <https://www.lexivox.org/norms/BO-RE-DS24176C.xhtml>
- Gómez-Losada, Á., Pires, J. C. M., & Pino-Mejías, R. (2015). Time series clustering for estimating particulate matter contributions and its use in quantifying impacts from deserts. *Atmospheric Environment*, 117, 271–281. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.07.027>
- Government of Alberta. (2005). Alberta Canada, Ambient Air Quality Objectives and Guidelines Summary. Retrieved from <http://www.paza.ca/wp-content/uploads/2011/11/ESRD-AAAQO-Feb-2013.pdf>
- Government of Israel. (2011). Reglamento de Aire Limpio (Valores de Calidad del Aire) (Orden Temporal), 2011. Retrieved from [https://www.nevo.co.il/law\\_html/law00/77858.htm](https://www.nevo.co.il/law_html/law00/77858.htm)
- Government of Luisiana. (2004). Title 33 ENVIRONMENTAL QUALITY Part III. Air. Retrieved from <https://deq.louisiana.gov/assets/docs/Air/Enforcement/Title33.pdf>
- Government of Manitoba. (2005). Manitoba’s Ambient Air Quality Criteria (AAQCs). Retrieved from [https://www.gov.mb.ca/sd/envprograms/airquality/pdf/criteria\\_table\\_update\\_july\\_2005.pdf](https://www.gov.mb.ca/sd/envprograms/airquality/pdf/criteria_table_update_july_2005.pdf)
- Government of New Hampshire. (2004). CHAPTER Env-A 1400 REGULATED TOXIC AIR POLLUTANTS. Retrieved from [https://www.des.nh.gov/sites/g/files/ehbemt341/files/documents/env-a\\_1400-adptpstd.pdf](https://www.des.nh.gov/sites/g/files/ehbemt341/files/documents/env-a_1400-adptpstd.pdf)
- Government of North Carolina. (2018). SECTION .1100 - CONTROL OF TOXIC AIR POLLUTANTS 15A NCAC 02D. 1101 PURPOSE This Section sets forth the rules for the control of toxic air pollutants to protect human health. Retrieved from <https://files.nc.gov/ncdeq/Air Quality/rules/rules/15a-ncac-02d-Section-1100-Updated-Nov-2020.pdf>

- Government of Quebec. (1979). Clean Air Regulation (RAA). Environment Quality Act (última actualización: abril 2021). Retrieved from <http://legisquebec.gouv.qc.ca/en/showdoc/cr/q-2, r. 4.1>
- Government of Vermont. (2018). Air Pollution Control Regulations. Retrieved from [https://dec.vermont.gov/sites/dec/files/aqc/laws-regs/documents/AQCD\\_Regulations\\_ADOPTED\\_Dec132018.pdf](https://dec.vermont.gov/sites/dec/files/aqc/laws-regs/documents/AQCD_Regulations_ADOPTED_Dec132018.pdf)
- Government of Washington. (2004). Chapter 173-460 WAC CONTROLS FOR NEW SOURCES OF TOXIC AIR POLLUTANTS. Retrieved from <https://app.leg.wa.gov/wac/default.aspx?cite=173-460&full=true&pdf=true>
- GreenLab-Dictuc. (2019). *Evaluación medidas costo efectivas para diseñar un instrumento de gestión ambiental en la zona interior de la región de Valparaíso.*
- GreenLab. (2018). Estudio de metodologías para la evaluación de normas de calidad y complemento a estimación de beneficios en salud derivados de la contaminación atmosférica.
- GreenLab. (2020). *Actualización de tasas de incidencia base de mortalidad y morbilidad para contaminación atmosférica y creación de un modelo automático para la actualización.* Retrieved from <http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=8484a611-8fa9-4695-acea-c847e7b828c0&fname=200221-ATICA2-InformeFinal.pdf&access=public>
- HazardText. (2021a). Arsenic - clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values: (2021). In HAZARTEXT® Hazard Management [Electronic version]. In *In HAZARTEXT® Hazard Management [Electronic version]*. (pp. 1–75). Thomson Reuters Inc.
- HazardText. (2021b). Arsenic pentoxide. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values. In *In HAZARTEXT® Hazard Management [Electronic version]*. Thomson Reuters Inc.
- HazardText. (2021c). ARSENIC TRICHLORIDE. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values: In *In HAZARTEXT® Hazard Management [Electronic version]*. Thomson Reuters Inc.
- HazardText. (2021d). Arsenic trioxide. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values: (2021). In HAZARTEXT® Hazard Management [Electronic version]. In *In HAZARTEXT® Hazard Management [Electronic version]*. Thomson Reuters Inc.
- HazardText. (2021e). Arsine. Clinical effects, Range of toxicity, Toxicity and Risk Assessment Values. In *In HAZARTEXT® Hazard Management [Electronic version]*. Thomson Reuters Inc.
- Helsen, L. (2005). Sampling technologies and air pollution control devices for gaseous and particulate arsenic: A review. *Environmental Pollution*, 137(2), 305–315. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.01.025>
- INE. (2019a). *Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos 2019.* Retrieved from [https://geoarchivos.ine.cl/File/pub/Cd\\_Pb\\_Al\\_Cs\\_2019.pdf](https://geoarchivos.ine.cl/File/pub/Cd_Pb_Al_Cs_2019.pdf)
- INE. (2019b). Estimaciones y Proyecciones de la Población de Chile 2002-2035 a Nivel Comunal. Documento Metodológico.
- Iragüen P., & Ortúzar J. de D. (2004). Willingness-to-pay for reducing fatal accident risk in urban areas: an internet-based web page stated preference survey. *Accident Analysis and Prevention*, 36, 513–524.

- Kloog, I., Coull, B. A., Zanobetti, A., Koutrakis, P., & Schwartz, J. D. (2012). Acute and chronic effects of particles on hospital admissions in New-England. *PLoS ONE*, 7(4), 2–9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034664>
- Krewski, D., Jerrett, M., Burnett, R. T., Ma, R., Hughes, E., Shi, Y., ... Tempalski, B. (2009). Extended follow-up and spatial analysis of the American Cancer Society study linking particulate air pollution and mortality. *Health Effects Institute*, (140). Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19627030>
- Lagos, G., Peters, D., Videla, A., Jara, J. J. (2018). The effect of mine aging on the evolution of environmental footprint indicators in the Chilean copper mining industry 2001-2015. *Journal of Cleaner Production* 174 (2018) 389-400.
- Lagos, G., Peters, D., Salas, J. C., Parra, R., & Pérez, V. (2021). Análisis económico de las cadenas globales de valor y suministro del cobre refinado en países. *Comisión Económica Para América Latina y El Caribe (CEPAL)*.
- Lepeule, J., Laden, F., Dockery, D., & Schwartz, J. (2012). Chronic exposure to fine particles and mortality: An extended follow-up of the Harvard six cities study from 1974 to 2009. *Environmental Health Perspectives*, 120(7), 965–970. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104660>
- Lewis, A. S., Beyer, L. A., & Zu, K. (2015). Considerations in deriving quantitative cancer criteria for inorganic arsenic exposure via inhalation. *Environment International*, 74, 258–273. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.09.009>
- Lewis, A. S., Reid, K. R., Pollock, M. C., & Campleman, S. L. (2012). Speciated arsenic in air: Measurement methodology and risk assessment considerations. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 62(1), 2–17. <https://doi.org/10.1080/10473289.2011.608620>
- Liu, B., Li, T., Yang, J., Wu, J., Wang, J., Gao, J., ... Yang, H. (2017). Source apportionment and a novel approach of estimating regional contributions to ambient PM<sub>2.5</sub> in Haikou, China. *Environmental Pollution*, 223, 334–345. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2017.01.030>
- Mar, T. F., Koenig, J. Q., & Primomo, J. (2010). Associations between asthma emergency visits and particulate matter sources, including diesel emissions from stationary generators in Tacoma, Washington. *Inhalation Toxicology*, 22(6), 445–448. <https://doi.org/10.3109/08958370903575774>
- Martín-Cruz, Y., Vera-Castellano, A., & Gómez-Losada, Á. (2020). Characterization of background particulate matter concentrations using the combination of two clustering techniques in zones with heterogeneous emission sources. *Atmospheric Environment*, 243(August). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117832>
- Massachusetts, G. of. (2011). MassDEP Ambient Air Toxics Guidelines. Retrieved from <https://www.mass.gov/service-details/massdep-ambient-air-toxics-guidelines>
- Maud, J., & Rumsby, P. (2008). *A review of the toxicity of arsenic in air*, Science Report - SC10104/SR4.
- MECP-Ontario. (2020). Ontario's Ambient Air Quality Criteria. Retrieved from <https://www.ontario.ca/page/ontarios-ambient-air-quality-criteria>
- MEP. (2012). Estándares de calidad del aire ambiente. Anuncio 7. Retrieved from [http://english.mee.gov.cn/Resources/standards/Air\\_Environment/quality\\_standard1/201605/W020160511506615956495.pdf](http://english.mee.gov.cn/Resources/standards/Air_Environment/quality_standard1/201605/W020160511506615956495.pdf)

- Micromedex. (2021a). Arsenic. Toxicology details. In *Micromedex* (Columbia B, pp. 1–75). Columbia Basin College Library.
- Micromedex. (2021b). Arsenic pentoxide. Toxicology details. In *Micromedex* (pp. 1–45). Columbia Basin College Library ed.
- Micromedex. (2021c). Arsenic trioxide. Toxicology details. In *Micromedex* (pp. 1–57). Columbia Basin College Library.
- Micromedex. (2021d). Arsine. Toxicology details. In *Micromedex* (pp. 1–31). Columbia Basin College Library.
- Ministerio de Desarrollo Social. (2017). *Estimación del Valor de la Vida Estadística en Chile a través del Enfoque de Disposición a Pagar*.
- Ministerio de Salud. (2008). Decreto 61. *Biblioteca Del Congreso Nacional de Chile*, (2008), 121–127.
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (1998). Decreto 165 - Establece Norma de emisión para la regulación del contaminante arsénico emitido al aire. *Biblioteca Del Congreso Nacional de Chile*, 165(1998), 3. Retrieved from <https://www.leychile.cl/N?i=1015230&f=2015-12-02&p=>
- Ministry for the Environment, & Government of New Zealand. (2002). Ambient Air Quality Guidelines. Retrieved from <https://environment.govt.nz/assets/Publications/Files/ambient-guide-may02.pdf>
- MINSAL. (2018). *Plan Nacional de Cáncer 2018-2028*. Retrieved from [https://www.minsal.cl/wp-content/uploads/2019/01/2019.01.23\\_PLAN-NACIONAL-DE-CANCER\\_web.pdf](https://www.minsal.cl/wp-content/uploads/2019/01/2019.01.23_PLAN-NACIONAL-DE-CANCER_web.pdf)
- MINSEGPRES. Decreto 165 - Establece Norma de Emisión para la Regulación del Contaminante Arsenico Emitido al Aire (1998). Retrieved from <https://www.leychile.cl/N?i=1015230&f=2015-12-02&p=>
- MMA. (2013a). Decreto 28- Establece Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico.
- MMA. (2013b). *Guía Metodológica para la elaboración de un análisis general de impacto económico y social (AGIES) para instrumentos de gestión de calidad del aire*.
- MMA. (2018). Análisis General del Impacto Económico y Social del Anteproyecto del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví.
- MMA. (2019). Análisis General del Impacto Económico y Social del Anteproyecto del Plan de Descontaminación Atmosférica para la Ciudad de Calama y su Área Circundante.
- MOEF & CC, & Government of India. (2019). National Clean Air Programme. Retrieved from <https://pib.gov.in/PressReleseDetail.aspx?PRID=1559384>
- Mohammed Abdul, K. S., Jayasinghe, S. S., Chandana, E. P. S., Jayasumana, C., & De Silva, P. M. C. S. (2015). Arsenic and human health effects: A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 40(3), 828–846. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2015.09.016>
- Moolgavkar, S. H. (2000). Air pollution and hospital admissions for diseases of the circulatory system in three U.S. Metropolitan areas. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 50(7), 1199–1206. <https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464162>
- Nordberg, G. (2021). Metals : Chemical Properties and Toxicity References. Retrieved from <https://www.iloencyclopaedia.org/part-ix-21851/metals-chemical-properties-and-toxicity>

- OEHHA. (2014). Appendix D. Individual Acute, 8-Hour, and Chronic Reference Exposure Level Summaries. *TSD for Noncancer RELs, 2008*(December), 128–169.
- Ostro, B. D. (1987). Air pollution and morbidity revisited: A specification test. *Journal of Environmental Economics and Management*, 14(1), 87–98.
- Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea. (2004). Directiva 2004/107/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de diciembre de 2004, relativa al arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente. *Diario Oficial de La Unión Europea*. Retrieved from <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004L0107&from=en>
- Particuolotech. (2021). *Modelo de receptor - Fundación Chagres*.
- PubChem. (2021). Hazardous Substances Data Bank (HSDB). *National Library of Medicine*.
- Servicios Mineros SpA. (2019). INFORME DE EVALUACIÓN DE LA CONFORMIDAD AUDITORIA A LAS METODOLOGÍAS DE BALANCE DE ARSÉNICO Y AZUFRE.
- Sheppard, L. (2003). Ambient Air Pollution and Nonelderly Asthma Hospital Admissions in Seattle, Washington, 1987-1994. In: Revised Analyses of Time-Series Studies of Air Pollution and Health. *Health Effects Institute: Boston*, 227–230.
- SISTAM. (2021). Estudio de Calidad del Aire, Sector La Negra, Comuna de Antofagasta.
- Slaughter, J. C., Kim, E., Sheppard, L., Sullivan, J. H., Larson, T. V., & Claiborn, C. (2005). Association between particulate matter and emergency room visits, hospital admissions and mortality in Spokane, Washington. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 15(2), 153–159. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500382>
- SMA. (2015). RE 694- Protocolo para validación de metodologías para balance de masa de arsénico y azufre en fuentes emisoras de acuerdo al DS 28/2013 MMA.
- TCEQ. (2011). *Arsenic and inorganic arsenic compounds. TEXAS COMMISSION ON ENVIRONMENTAL QUALITY. Report on carcinogens : carcinogen profiles / U.S. Dept. of Health and Human Services, Public Health Service, National Toxicology Program* (Vol. 12).
- Tchepel, O., Costa, A. M., Martins, H., Ferreira, J., Monteiro, A., Miranda, A. I., & Borrego, C. (2010). Determination of background concentrations for air quality models using spectral analysis and filtering of monitoring data. *Atmospheric Environment*, 44(1), 106–114. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2009.08.038>
- US-EPA. (n.d.). Attachment 6 : Useful Terms and Definitions for Explaining Risk, 4, 1–14.
- US-EPA. (1988). Arsenic, inorganic; CASRN 7440-38-2. *Integrated Risk Information System (IRIS) U.S. Chemical Assessment Summary National Center for Environmental Assessment*, 27.
- US-EPA. (1994). Arsine ; CASRN 7784-42-1. *Integrated Risk Information System (IRIS) Chemical Assessment Summary U.S.*, 1–16.
- US-EPA. (1995). Primary Copper Smelting. *AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors Volume I: Stationary Point and Area Sources*. Retrieved from <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch12/final/c12s03.pdf>
- US-EPA. (2004). Air toxics and risk assessment.
- US-EPA. (2011). *Integrated Risk Information System - Arsenic, inorganic (CASRN 7440-38-2), (1968)*.
- US-EPA. (2022). National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants: Primary Copper Smelting Residual Risk and Technology Review and Primary Copper Smelting Area Source

- Technology Review (Proposed rule). Retrieved from <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OAR-2020-0430-0001>
- US-EPA, & French, C. (2020). *Evaluation of Beyond-the-floor and Ample Margin of Safety Control Options and Costs for Process Fugitive Emissions from Smelting Furnaces and Converters, and for Point Source Emissions from Anode Refining Furnaces and for the Combined Emissions S*. Retrieved from <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OAR-2020-0430-0060>
- US-EPA, & Jones, D. L. (2019). *Ample Margin of Safety Analysis for Point Sources in the II&S Industry*. Retrieved from <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OAR-2020-0430-0052>
- Wang, S. H., Hung, R. Y., Lin, N. H., Gómez-Losada, Á., Pires, J. C. M., Shimada, K., ... Takami, A. (2020). Estimation of background PM<sub>2.5</sub> concentrations for an air-polluted environment. *Atmospheric Research*, 231, 104636. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2019.104636>
- Wang, Y., Zhang, J., Bai, Z., Yang, W., Zhang, H., Mao, J., ... Chen, L. (2019). Background concentrations of PMs in Xinjiang, West China: An estimation based on meteorological filter method and Eckhardt algorithm. *Atmospheric Research*, 215, 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.09.008>
- World Health Organisation. (2000). Air Quality Guidelines for Europe, 2014(9th November). Retrieved from [http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0016/123064/AQG2ndEd\\_5\\_10PCBs.PDF](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0016/123064/AQG2ndEd_5_10PCBs.PDF)
- Wottitz, C. A., & Moreno, G. A. (2011). Fijación química del preservante CCA-C en la madera de *Pinus elliottii* Parte 1: Influencia de la temperatura y de la humedad relativa. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 13(1), 85–103. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2011000100008>
- Yáñez-Morróni, G., Gironás, J., Caneo, M., Delgado, R., & Garreaud, R. (2018). Using the Weather Research and Forecasting (WRF) model for precipitation forecasting in an Andean region with complex topography. *Atmosphere*, 9(8).
- Zanobetti, A., Franklin, M., Koutrakis, P., & Schwartz, J. (2009). Fine particulate air pollution and its components in association with cause-specific emergency admissions. *Environmental Health : A Global Access Science Source*, 8, 58. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-8-58>

## **10. Anexos**

### **10.1 Anexo 1: Identificación de valores anómalos**

### **10.2 Anexo 2: Metodología para estimación de rango de emisiones de HVL**

Figura 10-1 Observaciones con candidatos a ser excluidos para Estación J.J. Latorre, Termoeléctrica Andina

Figura 10-2 Emisión reportada mensualmente [g As/TMF Cu]

### **10.3 Anexo 3: Rosas de viento estaciones**

#### **10.3.1 Rosas de Viento Fundición Chuquicamata**

#### **10.3.2 Rosas de Viento Fundición Altonorte**

#### **10.3.3 Rosas de Viento Fundición Potrerillos**

#### **10.3.4 Rosas de Viento Fundición Hernán Videla Lira**

#### **10.3.5 Rosas de Viento Fundición Ventanas**

#### **10.3.6 Rosas de Viento Fundición Chagres**

#### **10.3.7 Rosas de Viento Fundición Caletones**

### **10.4 Anexo 4: Comparación de concentración basal de arsénico**

### **10.5 Anexo 5: Corroboración de equivalencia entre factores de corrección**

### **10.6 Anexo 6: Puntos de interés en modelación de calidad del aire**

### **10.7 Anexo 7: Inventario de emisiones modelado**

### **10.8 Anexo 8: Análisis datos modelados versus observados**

### **10.9 Anexo 9: Evaluación de metodología de modelación de emisiones**

### **10.10 Anexo 10: ACB para escenario regulatorio**

### **10.11 Anexo 11: Análisis comparativo de concentraciones de arsénico en rocas**



---

**Antecedentes para la elaboración de una Norma Primaria de  
Calidad del Aire para Arsénico y revisión de la Norma de  
Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de  
Arsénico**

**ID Licitación: 608897-23-LP21**

**Estudio solicitado por Subsecretaría del Medio Ambiente**

**INFORME FINAL – Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y  
Fuentes Emisoras de Arsénico**

**Santiago, 17 de junio de 2022**

### Título del Proyecto

Antecedentes para la elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico y revisión de la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico

### Autores:

Jefe de proyecto: Luis Cifuentes

Asesores expertos: Fabio Carrera (PUCV), Daniel Rebolledo (CITUC)

Equipo operativo: José Miguel Valdés, Viviana Cerda Gho, Valentina Morandé, Alejandro Bañados, Simón Burgos, Anne-Lise Bohaud Ausset, María Teresa Alarcón.

Dictuc S.A.

Vicuña Mackenna N° 4860, Macul – Santiago

### Datos Mandante

Razón Social: Subsecretaría del Medio Ambiente

RUT: 61.979.930-5

Dirección: San Martín 73, Santiago

### Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo general proporcionar antecedentes para la elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire de Arsénico y también para la revisión de la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico, considerando un análisis técnico y económico, así como efectos en la salud y beneficios económicos asociados a reducciones de arsénico y otros contaminantes.

### Cuerpo del informe

499 hojas (incluye portada)

### Fecha del informe

17/junio/2022

### Información Contractual

Correlativo Contrato: 6591

OC N°: 608897-132-SE21

### Contraparte técnica

Nombre: Emmanuel Mesías Rojas

Cargo: Profesional Depto. Planes y Normas, DCA

E-mail: emesias@mma.gob.cl

---

Sr. Luis Cifuentes

Director GreenLab

Dictuc S.A.

---

Sr. Felipe Bahamondes

Gerente General

Dictuc S.A.

## Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos .....	I
Lista de Tablas.....	VI
Lista de Figuras.....	XVI
Acrónimos y Abreviaturas.....	XIX
<b>0. Resumen ejecutivo.....</b>	<b>21</b>
<b>1. Objetivos del estudio .....</b>	<b>32</b>
1.1 Objetivo general.....	32
1.2 Objetivos específicos .....	32
<b>2. Regulación nacional e internacional para fundiciones y fuentes emisoras de arsénico... 34</b>	
2.1 Normas de emisión para diferentes países .....	36
2.1.1 Chile.....	37
2.1.2 Unión Europea y Caso de Alemania .....	39
2.1.1 China .....	41
2.1.2 Estados Unidos.....	43
2.1.3 Japón .....	53
2.1.4 Canadá .....	56
2.1.5 Zambia .....	60
2.2 Análisis comparativo de normas de emisión .....	61
2.2.1 Comparación de las normas de emisión de los países seleccionados.....	61
2.2.2 Definiciones relativas a fuentes emisoras y/o de interés en la materia.....	67
2.2.3 Contaminantes regulados en las normativas recopiladas.....	69
2.2.4 Valores límites de emisión específicos al arsénico y otros contaminantes de fundiciones de cobre .....	71
2.2.5 Efectos sobre salud .....	86
2.2.6 Co-beneficios identificados en las normas de emisión .....	91
2.2.7 Métodos de medición.....	93
2.2.8 Unidades de medida .....	104
2.2.1 Ejemplos de alternativas/instrumentos económicos de mejoramiento o recambio	105

<b>3. Escenario nacional e internacional para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico .....</b>	<b>107</b>
3.1 Mercado internacional.....	107
3.1.1 <i>Identificación y caracterización de fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico .....</i>	<i>107</i>
3.1.2 <i>Tecnologías pirometalúrgicas de producción de cobre: fusión, conversión, limpieza y refinación y descripción de aspectos técnicos .....</i>	<i>118</i>
3.1.3 <i>Identificación de contaminantes emitidos.....</i>	<i>139</i>
3.1.4 <i>Asociaciones relevantes .....</i>	<i>145</i>
3.2 Mercado nacional .....	149
3.2.1 <i>Identificación y caracterización de las fundiciones de cobre y fuentes emisoras existentes: tecnologías y procesos.....</i>	<i>149</i>
3.2.2 <i>Medidas implementadas para dar cumplimiento a norma y potencial de mejora</i>	<i>194</i>
3.2.3 <i>Descripción del mercado o rubros para fundiciones de cobre y fuentes emisoras existentes .....</i>	<i>205</i>
3.2.4 <i>Estimación de emisiones al aire y proyección de tendencia .....</i>	<i>211</i>
<b>4. Potenciales tecnologías de abatimiento .....</b>	<b>220</b>
4.1 Identificación de factores determinantes.....	221
4.1.1 <i>Preparación de concentrados .....</i>	<i>222</i>
4.1.2 <i>Fusión .....</i>	<i>222</i>
4.1.3 <i>Conversión.....</i>	<i>223</i>
4.1.4 <i>Limpieza de escorias .....</i>	<i>224</i>
4.1.5 <i>Refinación .....</i>	<i>224</i>
4.1.6 <i>Tratamiento de gases .....</i>	<i>225</i>
4.1.7 <i>Emisiones por contaminante .....</i>	<i>226</i>
4.2 Identificación de tecnologías o modificaciones implementadas por D.S. 28/2013 del MMA	226
4.3 Identificación y análisis de tecnologías de control de emisiones.....	229
4.3.1 <i>Almacenamiento de concentrados con control de emisiones .....</i>	<i>229</i>
4.3.2 <i>Planta de tostación .....</i>	<i>230</i>
4.3.3 <i>Filtro de mangas .....</i>	<i>231</i>
4.3.4 <i>Precipitador electrostático.....</i>	<i>232</i>
4.3.5 <i>Scrubber .....</i>	<i>234</i>

4.3.6	<i>Planta de limpieza de escorias por flotación</i>	235
4.3.7	<i>Incineradores post-combustión</i>	236
4.3.8	<i>Sistemas de captura de emisiones fugitivas</i>	237
4.3.9	<i>Planta de ácido sulfúrico</i>	237
4.3.10	<i>Planta de tratamiento de gases de cola</i>	239
4.3.11	<i>Planta de tratamiento de humos negros</i>	241
4.3.1	<i>Sistema de alimentación de carga fría a convertidores CPS</i>	242
<b>5.</b>	<b>Estimación de potencial de reducción de emisiones para las actuales fuentes emisoras de arsénico</b>	<b>243</b>
5.1	Relación emisión – nivel de procesamiento	243
5.2	Estimación de potencial de reducción	259
<b>6.</b>	<b>Estimación de evolución y cambios en calidad del aire, desde dictación del D.S. 28/2013 del MMA</b>	<b>264</b>
6.1	Instrumentos de gestión ambiental en comunas con fuentes emisoras de arsénico	264
6.2	Evaluación de calidad del aire en comunas con fuentes emisoras de arsénico	274
6.2.1	<i>Estaciones cercanas a fundición Chuquicamata</i>	274
6.2.2	<i>Estaciones cercanas a fundición Altonorte</i>	290
6.2.3	<i>Estaciones cercanas a fundición Potrerillos</i>	298
6.2.4	<i>Estaciones cercanas a fundición Hernán Videla Lira</i>	304
6.2.5	<i>Estaciones cercanas a fundición Ventanas</i>	312
6.2.6	<i>Estaciones cercanas a fundición Chagres</i>	330
6.2.7	<i>Estaciones cercanas a fundición Caletones</i>	335
6.3	Variación de la calidad del aire tras la aplicación de la norma de emisión	346
<b>7.</b>	<b>Efectos adversos y metodologías de estimación de emisiones para contaminantes asociados a la norma</b>	<b>353</b>
7.1	Efectos en salud identificados y valorizados en experiencias internacionales	353
7.2	Comparación de los beneficios calculados en evaluaciones internacionales	355
7.3	Revisión de investigaciones científicas desde 2011 sobre efectos adversos	356
7.3.1	<i>Discusión respecto a efectos adversos del arsénico</i>	356
7.3.2	<i>Identificación de efectos adversos de otras sustancias controladas por la norma de emisión en el aire</i>	357
7.4	Metodologías para la estimación de otros beneficios	362

7.4.1	<i>Identificación de impactos</i> .....	362
7.4.2	<i>Cuantificación</i> .....	363
7.4.3	<i>Valoración</i> .....	366
7.5	Estimación de beneficios económicos .....	367
7.5.1	<i>Factor Emisión Concentración (FEC)</i> .....	368
7.5.2	<i>Riesgo individual</i> .....	370
7.5.3	<i>Riesgo Social</i> .....	372
7.5.4	<i>Beneficios</i> .....	374
7.6	Agrupación de contaminantes.....	374
<b>8.</b>	<b>Escenarios de actualización de la norma existente</b> .....	<b>375</b>
8.1	Definiciones de la fuente a regular .....	375
8.2	Valores de límites de emisión .....	376
8.3	Métodos de medición para determinar los parámetros regulados en la norma de emisión.....	379
8.4	Análisis y recomendación del método por balance de masa .....	383
8.4.1	<i>Estandarización de Flujos</i> .....	384
8.4.2	<i>Material de Limpieza</i> .....	387
8.4.3	<i>Emisiones Negativas</i> .....	393
8.4.4	<i>Buenas prácticas transversales</i> .....	395
8.5	Revisión de límites de emisión.....	395
8.5.1	<i>Emisiones anuales</i> .....	396
8.5.2	<i>Eficiencia de captura y fijación</i> .....	397
8.5.3	<i>Límites para Secadores</i> .....	399
8.5.4	<i>Límites para Plantas Ácidos</i> .....	399
8.5.5	<i>Límites para Hornos de limpieza de escoria</i> .....	402
8.5.6	<i>Límites para Hornos de Refino</i> .....	404
8.6	Propuesta de límites de emisión .....	405
8.6.1	<i>Alternativa 1: asegurar niveles actuales de emisión</i> .....	405
8.6.2	<i>Alternativa 2: actualizar límites actuales a propuesta US-EPA</i> .....	406
8.6.3	<i>Alternativa 3: actualizar límites y agregar fuentes fugitivas de propuesta US-EPA</i> 407	
8.6.4	<i>Resumen alternativas</i> .....	408

8.7	Mejoras de articulado existente .....	411
8.7.1	<i>Artículos sobre objetivo, aplicación territorial y definiciones .....</i>	<i>411</i>
8.7.2	<i>Artículos sobre límites máximos de emisión al aire y plazos de cumplimiento .....</i>	<i>411</i>
8.7.3	<i>Artículos sobre fiscalización y metodologías para verificar el cumplimiento .....</i>	<i>420</i>
8.7.4	<i>Artículos sobre prácticas operacionales para reducir emisiones al aire .....</i>	<i>424</i>
8.7.1	<i>Nuevo artículo sobre requerimientos tecnológicos .....</i>	<i>426</i>
<b>9.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>427</b>
<b>10.</b>	<b>Referencias .....</b>	<b>436</b>
<b>11.</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>447</b>
11.1	Anexo 1: Resultados de investigaciones científicas sobre efectos adversos del arsénico 447	
11.1.1	<i>Resumen de resultados de investigaciones científicas sobre efectos adversos a las personas o a los recursos naturales para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico 447</i>	
11.1.2	<i>Evaluaciones de riesgos .....</i>	<i>447</i>
11.1.3	<i>Reviews .....</i>	<i>455</i>
11.1.4	<i>Estudios genéticos .....</i>	<i>463</i>
11.1.5	<i>Monitoreo biológico .....</i>	<i>466</i>
11.1.6	<i>Cáncer .....</i>	<i>470</i>
11.1.7	<i>Neurotoxicidad .....</i>	<i>472</i>
11.1.8	<i>Toxicidad .....</i>	<i>475</i>
11.1.9	<i>Exposición prenatal .....</i>	<i>476</i>
11.1.10	<i>Sistema inmunológico .....</i>	<i>478</i>
11.1.11	<i>Sistema cardiovascular .....</i>	<i>480</i>
11.1.12	<i>Reproducción .....</i>	<i>481</i>
11.1.13	<i>Función hepática .....</i>	<i>482</i>
11.1.14	<i>Sistema endocrino .....</i>	<i>483</i>
11.1.15	<i>Otros efectos .....</i>	<i>484</i>
11.1.16	<i>Tecnologías de mitigación .....</i>	<i>485</i>
11.2	Anexo 2: Riesgos individuales y sociales estimados .....	486
11.3	Anexo 3 Estadígrafos respecto del cumplimiento de límites en chimeneas .....	495

## Lista de Tablas

Tabla 0-1 Procesos de la fundición y tecnologías asociadas .....	23
Tabla 0-2 Estimación de emisiones [kg/año] totales (balance de masa) y por monitoreo continuo o mediciones discretas, año 2020 .....	24
Tabla 0-3 Potencial de reducción As [kg/año] según medida y fundición, proyectado para año 2035 .....	26
Tabla 0-4 Potencial de reducción SO <sub>2</sub> [kg/año] según medida y fundición, proyectado para año 2035 .....	26
Tabla 0-5 Beneficios unitarios por contaminante y fundición al año 2035 [UF / t/año].....	28
Tabla 0-6 Límites de emisión actuales y propuestos según alternativa .....	30
Tabla 2-1 Emisiones máximas para fundiciones de cobre, recomendadas por el Banco Mundial .....	36
Tabla 2-2 Límites máximos de emisión anual [t/año].....	37
Tabla 2-3 Límite de emisión para instalaciones de incineración de residuos y las instalaciones de co-incineración de residuos, en la Unión Europea .....	40
Tabla 2-4 Límites de emisión en empresas productoras industriales de cobre para otros contaminantes, en China .....	42
Tabla 2-5 Valores límites de emisión del NESHAP de 2007 de la US-EPA .....	48
Tabla 2-6 Valores límites de emisión disponibles en la propuesta de enmienda de la US-EPA...	52
Tabla 2-7 Límites de emisión para todos los contaminantes normados en relación a la producción de cobre en la regulación zambiana .....	61
Tabla 2-8 Normativas nacionales e internacionales recopiladas en materia de emisiones de arsénico y/o de otros contaminantes de fundiciones de cobre .....	62
Tabla 2-9 Detalles relativos a fundiciones y otras fuentes reguladas en las normativas recopiladas en materia de emisiones de arsénico y/o de otros contaminantes de fundiciones de cobre y su categoría .....	64
Tabla 2-10 Definiciones relativas a fuentes emisoras y/o de interés en la materia encontradas en las normas de emisión recopiladas.....	67
Tabla 2-11 Contaminantes y parámetros regulados en las normas de emisión recopiladas en Chile y a nivel internacional para fundiciones de cobre.....	70
Tabla 2-12 Valores límites de emisión específicos a As, o a otros contaminantes explícitamente asociados a la regulación de As en fundiciones de cobre en normas nacionales e internacionales [mg/Nm <sup>3</sup> ] .....	73
Tabla 2-13 Valores límites de emisión de otros contaminantes que el arsénico para fundiciones de cobre e instalaciones asociadas a la refinación de minerales .....	75
Tabla 2-14 Efectos sobre la salud identificados en las normas de emisión recopiladas en Chile y a nivel internacional .....	87
Tabla 2-15 Contaminantes y sus efectos sobre la salud .....	89
Tabla 2-16 Co-beneficios identificados en distintas normas de emisión recopiladas en Chile y a nivel internacional .....	92

Tabla 2-17 Métodos de medición por contaminante y parámetros regulados.....	95
Tabla 2-18 Ejemplos de alternativas o equipos complementarios para mejorar el control de las emisiones .....	106
Tabla 3-1 Producción de cobre fundido primario de los años 2000, 2010 y 2018 [TM/año], y variación anual promedio de esta producción [%] en países seleccionados .....	108
Tabla 3-2 Capacidad de ánodos de 57 fundiciones en operación en 2016 [ton ánodos] .....	113
Tabla 3-3 Comparación de parámetros de rendimiento de fundiciones de cobre de Chile, China, Japón y Alemania con datos de 2015 [unidad indicada] .....	117
Tabla 3-4 Descripción de los principales procesos desarrollados en las fundiciones de cobre .	120
Tabla 3-5 Descripción de los procesos y tecnologías en uso en el mundo para la etapa de preparación de los concentrados de cobre .....	123
Tabla 3-6 Descripción de las tecnologías en uso en el mundo para la etapa de fusión de los concentrados de cobre .....	125
Tabla 3-7 Descripción de las tecnologías en uso en el mundo para la etapa de conversión de los concentrados de cobre .....	127
Tabla 3-8 Tecnologías de limpieza de escorias .....	130
Tabla 3-9 Tecnologías de refinación .....	131
Tabla 3-10 Tecnologías de tratamiento de gases primarios.....	133
Tabla 3-11 Medidas de abatimiento de instalaciones en Estados Unidos .....	134
Tabla 3-12 Tiempos de uso asimilables la vida útil de equipos utilizados en fundiciones de cobre .....	136
Tabla 3-13 Ejemplos de mantenciones cortas y largas realizadas en la fundición Altonorte, Chile .....	137
Tabla 3-14 Capacidad de procesos/tecnologías del top 20 de las fundiciones de cobre existentes a nivel mundial, por país.....	138
Tabla 3-15 Contaminantes emitidos al aire por fundiciones, por etapa y según equipo.....	140
Tabla 3-16 Niveles de exposición a contaminantes emitidos al aire por fundiciones recomendados y efectos a la salud.....	143
Tabla 3-17 Asociaciones de procesos/tecnologías y emisiones asociadas [ $\text{kg}_{\text{contaminante}}/\text{Mg}_{\text{concentrado}}$ procesado por la fundición] .....	145
Tabla 3-18 Requerimientos de energía eléctrica y combustibles fósiles para asociaciones de tecnologías de la fundición de cobre .....	146
Tabla 3-19 Tecnología y equipos utilizados en fundiciones nacionales .....	150
Tabla 3-20 Orígenes de los concentrados de cobre por fundición.....	154
Tabla 3-21 Composición química promedia de los concentrados de cobre [ppm], año 2020...	155
Tabla 3-22 Composición química promedia anual de los concentrados manejados en Chagres, año 2020 .....	159
Tabla 3-23 Pesos bases y contenido de arsénico y azufre en concentrados de cobre, año 2020 .....	161
Tabla 3-24 Características de los procesos de secado y tostación .....	166
Tabla 3-25 Equipos de fusión disponibles por fundición .....	171
Tabla 3-26 Características de los CPS de las fundiciones nacionales .....	175

Tabla 3-27 Características de los Hornos de Refino .....	182
Tabla 3-28 Características de los sistemas de abatimiento en Ministro Hales .....	185
Tabla 3-29 Descripción de los equipos utilizados para el abatimiento en Ministro Hales.....	185
Tabla 3-30 Equipos y características de planta de ácido sulfúrico de Potrerillos .....	189
Tabla 3-31 Equipos y características de la planta de tratamiento de gases de Potrerillos .....	189
Tabla 3-32 Características de equipos de abatimiento de gases en Potrerillos .....	191
Tabla 3-33 Descripción de los equipos de abatimiento de la Fundición Ventanas .....	193
Tabla 3-34 Fechas de entrevistas a fundiciones .....	194
Tabla 3-35 Proyectos y/o medidas implementadas para dar cumplimiento a la norma de emisión, D.S. 28/2013 del MMA.....	195
Tabla 3-36 Fundiciones chilenas, capacidad y procesamiento [t/año], año 2020 .....	205
Tabla 3-37 Características de las fuentes de emisión regulada por DS28/2013 .....	208
Tabla 3-38 Estimación de emisiones [kg/año] por balance de masa, año 2020 .....	213
Tabla 3-39 Estimación de emisiones [kg/año] por monitoreo continuo o mediciones discretas, año 2020 .....	215
Tabla 3-40 Estimación de emisiones [kg/año] por factor de emisión, año 2020 .....	216
Tabla 3-41 Estimación de emisiones fugitivas de MP (kg/año), año 2020 .....	217
Tabla 3-42 Comparación de emisiones fugitivas y emisiones de chimenea principal (kg/año), año 2020 .....	217
Tabla 4-1 Principales buenas prácticas identificadas .....	220
Tabla 4-2 Principales contaminantes de fundiciones chilenas y sus fuentes y factores que determinan su emisión .....	226
Tabla 4-3 Costos y eficiencia teórica de proyectos y medidas implementadas desde la entrada en vigor del D.S. 28/2013 del MMA.....	227
Tabla 4-4 Eficiencia y costos de lugar de almacenamiento con medidas de reducción de polvo .....	230
Tabla 4-5 Eficiencia y costos de lugar de almacenamiento con medidas de reducción de polvo .....	231
Tabla 4-6 Eficiencia y costos de filtro de mangas .....	232
Tabla 4-7 Eficiencia y costos de precipitador electrostático seco .....	233
Tabla 4-8 Eficiencia y costos de precipitador electrostático húmedo.....	234
Tabla 4-9 Eficiencia y costos de diferentes scrubbers .....	235
Tabla 4-10 Eficiencia y costos de planta de limpieza de escorias por flotación .....	236
Tabla 4-11 Eficiencia y costos de incineradores post-combustión.....	236
Tabla 4-12 Costos de sistemas de captación de gases secundarios .....	237
Tabla 4-13 Eficiencia y costos de plantas de ácido sulfúrico .....	238
Tabla 4-14 Costos de cambio de planta de ácido de contacto simple a doble .....	239
Tabla 4-15 Eficiencia y costos de plantas de tratamiento de gases de cola.....	240
Tabla 4-16 Costos unitarios de inversión y operación para plantas de tratamiento de gases de cola .....	241
Tabla 4-17 Eficiencia tratamiento de gases de cola para abatimiento de mercurio.....	241
Tabla 4-18 Eficiencia y costos de plantas de tratamiento de humos negros .....	242

Tabla 4-19 Eficiencia y costos de sistema de alimentación de carga fría a convertidores CPS..	242
Tabla 5-1 Clasificación de fuentes emisoras consideradas en las fundiciones.....	246
Tabla 5-2 Capturas base pre normas propuestas por COPRIM y asignación a fundiciones.....	248
Tabla 5-3 Distribución de las emisiones de As pre-norma según configuración tecnológica ....	248
Tabla 5-4 Distribución de las emisiones de SO <sub>2</sub> pre-norma según configuración tecnológica..	249
Tabla 5-5 Principales supuestos de modelación para modelación de emisiones post norma...	250
Tabla 5-6 Estimación S emitido [t/año] en chimenea de planta de ácido y fracción respecto del total de S que entra al sistema .....	252
Tabla 5-7 As emitido [t/año] en chimeneas de planta de ácido y hornos de limpieza de escorias y fracción respecto del total de As que entra al sistema .....	252
Tabla 5-8 Fracción de captura y fijación de S y As por fundición año 2020, según balance de masa .....	253
Tabla 5-9 Estimación de emisiones de SO <sub>2</sub> [t/año] por fuente unitaria, año 2020 .....	254
Tabla 5-10 Estimación de emisiones de As [t/año] por fuente unitaria, año 2020.....	255
Tabla 5-11 Relación emisión SO <sub>2</sub> - nivel de procesamiento [g/t Concentrado] por etapa y fundición .....	257
Tabla 5-12 Relación emisión As- nivel de procesamiento [g/t Concentrado] por etapa y fundición .....	257
Tabla 5-13 Relación emisión MP- nivel de procesamiento [g/t Concentrado] por etapa y fundición .....	258
Tabla 5-14 Relación emisión Hg- nivel de procesamiento [mg/t Concentrado] por etapa y fundición .....	258
Tabla 5-15 Relación emisión MP- nivel de procesamiento [mg/t Concentrado] por etapa.....	259
Tabla 5-16 Medida de mitigación modelada en cada fundición .....	261
Tabla 5-17 Supuestos de eficiencias de mitigación consideradas para estimación de potencial .....	261
Tabla 5-18 Potencial de reducción As [kg/año] según medida y fundición, proyectado para año 2035 .....	263
Tabla 5-19 Potencial de reducción SO <sub>2</sub> [kg/año] según medida y fundición, proyectado para año 2035 .....	263
Tabla 6-1 Normas primarias y secundarias de calidad del aire .....	265
Tabla 6-2 Estaciones declaradas EMRRN en comunas con fuentes emisoras de As .....	266
Tabla 6-3 Zonas declaradas saturada o latentes por contaminación atmosférica en zonas con fuentes emisoras de As.....	268
Tabla 6-4 Planes de prevención y descontaminación atmosférica aprobados en comunas con fuentes emisoras de arsénico .....	270
Tabla 6-5 Resumen principales hitos regulatorios con efectos en fuentes emisoras de arsénico, cronológicamente .....	273
Tabla 6-6 Resumen estaciones fundición Chuquicamata.....	275
Tabla 6-7 Estadígrafos concentraciones de MP <sub>10</sub> [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Aukahuasi .....	278

Tabla 6-8 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación C.P.V.K .....	278
Tabla 6-9 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación CD 23 de Marzo .....	279
Tabla 6-10 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Centro.....	279
Tabla 6-11 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre.....	279
Tabla 6-12 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Chiu-Chiu.....	280
Tabla 6-13 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Nueva Chiu-Chiu.....	280
Tabla 6-14 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Servicio Médico Legal.....	281
Tabla 6-15 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación C.P.V.K.....	283
Tabla 6-16 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación CD 23 de Marzo.....	283
Tabla 6-17 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Centro.....	284
Tabla 6-18 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre.....	284
Tabla 6-19 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Chiu-Chiu.....	284
Tabla 6-20 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Nueva Chiu-Chiu.....	285
Tabla 6-21 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Servicio Médico Legal.....	285
Tabla 6-22 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación CD 23 de marzo .....	287
Tabla 6-23 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Centro .....	288
Tabla 6-24 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre .....	288
Tabla 6-25 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Chiu-Chiu .....	288
Tabla 6-26 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Nueva Chiu-Chiu .....	289
Tabla 6-27 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Oasis .....	289
Tabla 6-28 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Servicio Médico Legal.....	289

Tabla 6-29 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Aukahuasi .....	290
Tabla 6-30 Resumen estaciones fundición Altonorte.....	290
Tabla 6-31 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Altonorte, estación Coviefi.....	293
Tabla 6-32 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Altonorte.....	293
Tabla 6-33 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Inacal.....	294
Tabla 6-34 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Altonorte, estación Sur.....	294
Tabla 6-35 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Altonorte, estación Coviefi.....	295
Tabla 6-36 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Altonorte.....	296
Tabla 6-37 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Altonorte, estación Coviefi.....	297
Tabla 6-38 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Altonorte.....	298
Tabla 6-39 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Altonorte, estación Sur.....	298
Tabla 6-40 Resumen estaciones fundición Potrerillos.....	299
Tabla 6-41 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Potrerillos, estación CAP .....	300
Tabla 6-42 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Potrerillos, estación Cine Inca .....	301
Tabla 6-43 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Potrerillos, estación Doña Inés.....	301
Tabla 6-44 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Potrerillos, estación Intelec.....	302
Tabla 6-45 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Potrerillos, estación Cine Inca .....	303
Tabla 6-46 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Potrerillos, estación CAP .....	304
Tabla 6-47 Resumen estaciones fundición Hernán Videla Lira .....	305
Tabla 6-48 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Copiapó.....	307
Tabla 6-49 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Paipote.....	307
Tabla 6-50 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación San Fernando.....	308

Tabla 6-51 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Tierra Amarilla .....	308
Tabla 6-52 Estadígrafos concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Copiapó.....	310
Tabla 6-53 Estadígrafos concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Los Volcanes .....	310
Tabla 6-54 Estadígrafos concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Paipote.....	311
Tabla 6-55 Estadígrafos concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación San Fernando.....	311
Tabla 6-56 Estadígrafos concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Tierra Amarilla .....	311
Tabla 6-57 Resumen estaciones fundición Ventanas .....	312
Tabla 6-58 Resumen estaciones refinería ENAP .....	312
Tabla 6-59 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación La Greda.....	316
Tabla 6-60 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Los Maitenes .....	316
Tabla 6-61 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Puchuncaví .....	316
Tabla 6-62 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero .....	317
Tabla 6-63 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero Centro .....	317
Tabla 6-64 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Sur.....	317
Tabla 6-65 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Valle Alegre.....	317
Tabla 6-66 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Ventanas.....	318
Tabla 6-67 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Colmo.....	318
Tabla 6-68 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Concón .....	318
Tabla 6-69 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Junta de Vecinos .....	319
Tabla 6-70 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Las Gaviotas .....	319
Tabla 6-71 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación La Greda.....	322
Tabla 6-72 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Los Maitenes .....	322

Tabla 6-73 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Puchuncaví .....	322
Tabla 6-74 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero .....	323
Tabla 6-75 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Ventanas.....	323
Tabla 6-76 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero Centro .....	323
Tabla 6-77 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Concón .....	324
Tabla 6-78 Estadígrafos concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación La Greda.....	327
Tabla 6-79 Estadígrafos concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Los Maitenes .....	327
Tabla 6-80 Estadígrafos concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Puchuncaví .....	327
Tabla 6-81 Estadígrafos concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero .....	327
Tabla 6-82 Estadígrafos concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero Centro .....	328
Tabla 6-83 Estadígrafos concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Sur.....	328
Tabla 6-84 Estadígrafos concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Valle Alegre.....	328
Tabla 6-85 Estadígrafos concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Ventanas.....	328
Tabla 6-86 Estadígrafos concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Colmo.....	329
Tabla 6-87 Estadígrafos concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Concón .....	329
Tabla 6-88 Estadígrafos concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Junta de Vecinos .....	329
Tabla 6-89 Estadígrafos concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Las Gaviotas .....	330
Tabla 6-90 Resumen estaciones fundición Chagres .....	331
Tabla 6-91 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chagres, estación Catemu .....	332
Tabla 6-92 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chagres, estación Lo Campo.....	333
Tabla 6-93 Estadígrafos concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chagres, estación Catemu .....	334

Tabla 6-94 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chagres, estación Lo Campo.....	335
Tabla 6-95 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Chagres, estación Santa Margarita.....	335
Tabla 6-96 Resumen estaciones fundición Caletones.....	336
Tabla 6-97 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Club.....	339
Tabla 6-98 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Población.....	339
Tabla 6-99 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Caletones, estación Sewell.....	340
Tabla 6-100 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Caletones, estación Rancagua I.....	340
Tabla 6-101 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Caletones, estación Rancagua II.....	340
Tabla 6-102 Estadígrafos concentraciones de MP2.5 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Caletones, estación Rancagua I.....	342
Tabla 6-103 Estadígrafos concentraciones de MP2.5 [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Caletones, estación Rancagua II.....	342
Tabla 6-104 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Caletones, estación Cauquenes.....	344
Tabla 6-105 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Caletones, estación Cipreses.....	344
Tabla 6-106 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Club.....	345
Tabla 6-107 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Población.....	345
Tabla 6-108 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Caletones, estación Sewell.....	346
Tabla 6-109 Estadígrafos concentraciones de SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> N] en cercanías fundición Caletones, estación Rancagua I.....	346
Tabla 6-110 Variación en las mediciones de estaciones con mayores concentraciones de As [ng/m <sup>3</sup> ] luego de la aplicación de la norma de emisión.....	348
Tabla 6-111 Variación en las mediciones de estaciones con mayores concentraciones de SO <sub>2</sub> [ug/m <sup>3</sup> ] luego de la aplicación de la norma de emisión.....	349
Tabla 6-112 Concentraciones medias observadas de MP <sub>10</sub> antes y después de la aplicación de la norma [µg/m <sup>3</sup> ].....	351
Tabla 6-113 Concentraciones medias observadas de MP <sub>2,5</sub> antes y después de la aplicación de la norma [µg/m <sup>3</sup> ].....	352
Tabla 7-1 Cuantificación y valorización de cada efecto en la salud identificado.....	356
Tabla 7-2 Identificación de peligros de las sustancias de interés.....	358
Tabla 7-3 Valores de referencia exposición aguda.....	360

Tabla 7-4 Valores de referencia exposición crónica .....	361
Tabla 7-5 Tipos de impacto identificados .....	362
Tabla 7-6 Impactos en salud identificados .....	363
Tabla 7-7 Coeficientes de Dosis-Respuesta para MP2.5 (por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) .....	365
Tabla 7-8 Coeficientes de Dosis-Respuesta para Dióxido de Azufre (por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).....	365
Tabla 7-9 Población proyectada para cada localidad .....	366
Tabla 7-10 Comparación de costos unitarios directos según causa y grupo de edad [UF/caso]	367
Tabla 7-11 FEC emisión MP [(t/año)/( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )].....	369
Tabla 7-12 FEC emisión SO <sub>2</sub> [(t/año)/( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )].....	369
Tabla 7-13 FEC emisión As [(t/año)/(ng/m <sup>3</sup> )].....	370
Tabla 7-14 Efectos a la salud asociados a los contaminantes en estudio .....	370
Tabla 7-15 Riesgos individuales de mortalidad asociados a concentraciones de MP, personas sobre 30 años [casos/t/año] .....	371
Tabla 7-16 Riesgos individuales de cáncer asociados a concentraciones de arsénico, todas las edades [casos/t/año] .....	371
Tabla 7-17 Riesgo social de diferentes efectos a la salud para los diferentes tipos de contaminantes por fundición [casos/t/año].....	372
Tabla 7-18 Beneficios unitarios por contaminante y fundición al año 2035 [UF / t/año].....	374
Tabla 8-1 Límites de emisión en chimenea D.S. 28/2013 del MMA.....	376
Tabla 8-2 Límites máximos de emisión anual [t/año].....	377
Tabla 8-3 Valores límites de emisión disponibles en la propuesta de enmienda de la US-EPA.	377
Tabla 8-4 Identificación de chimeneas por fundición y contaminantes medidos.....	379
Tabla 8-5 Métodos de mediciones de contaminantes propuestos por la US-EPA.....	382
Tabla 8-6 Resoluciones que aprueban las metodologías de balances de masa por fundición ..	383
Tabla 8-7 Ejemplos de flujos reportados en el año 2020 y equivalencia con flujos estandarizados en el Protocolo .....	384
Tabla 8-8 Comparación de flujos intermedios o inventarios reportados, año 2020.....	385
Tabla 8-9 Resumen de reporte de detalles de muestre y cálculo en el período 2020.....	386
Tabla 8-10 Número de meses en los que se reporta material de limpieza por fundición, periodo 2017-2020 .....	387
Tabla 8-11 As Balance y en material de limpieza.....	391
Tabla 8-12 Límites de emisión actuales y propuestos según alternativa .....	409
Tabla 9-1 Variaciones de las concentraciones de calidad del aire entre antes y después de la norma.....	430
Tabla 11-1 Resumen del número de publicaciones por temas .....	447
Tabla 11-2 Riesgos asociados a la concentración de contaminantes por tipo de efecto y grupo etario [casos/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ].....	486
Tabla 11-3 Estadígrafos (mg/m <sup>3</sup> ) de cumplimiento de límites en chimenea .....	495

## Lista de Figuras

Figura 3-1 Capacidades de producción en fundiciones primarias y producción de cobre fundido primario [TMF/año] en el top 15 de los países fundidores de cobre en el mundo.....	109
Figura 3-2 Evolución de la capacidad de fundición por país entre 2000 y 2020 en los principales países fundidores de cobre y otros [% de participación] .....	110
Figura 3-3 Participación por país en exportaciones de concentrados de cobre entre los años 2000 y 2020 [% de participación] .....	111
Figura 3-4 Evolución de exportaciones de concentrados de cobre de principales países entre los años 2000 y 2020 [TMF/año].....	112
Figura 3-5 Participación por país en importaciones de concentrados de cobre entre los años 2000 y 2020 [% de participación] .....	113
Figura 3-6 Diagrama de flujo simplificado de las etapas de fundición del cobre.....	119
Figura 3-7 Capacidad de procesos/tecnologías del top 20 de las fundiciones de cobre primarias existentes a nivel mundial [TMF/año] .....	138
Figura 3-8 Distribución de los requerimientos en energía eléctrica y combustibles fósiles para asociaciones de tecnologías de la fundición de cobre.....	147
Figura 3-9 Contenido de plomo en concentrados [ppm], año 2020 .....	156
Figura 3-10 Contenido de cadmio en concentrados [ppm], año 2020.....	156
Figura 3-11 Contenido de mercurio en concentrados [ppm], año 2020 .....	157
Figura 3-12 Contenido de níquel en concentrados [ppm], año 2020.....	158
Figura 3-13 Contenido de arsénico en concentrados de cobre [ppm], año 2020.....	160
Figura 3-14 Contenido de azufre en concentrados [ppm], año 2020.....	161
Figura 3-15 Diagrama del secador rotatorio a vapor.....	163
Figura 3-16 Diagrama del secador de lecho fluidizado de concentrado .....	164
Figura 3-17 Esquema operacional de la División Ministro Hales.....	165
Figura 3-18 Horno Flash de Chuquicamata.....	167
Figura 3-19 Esquema descriptivo del Horno Flash Outokumpu .....	168
Figura 3-20 Esquema descriptivo del Convertidor Teniente .....	169
Figura 3-21 Esquema descriptivo del reactor Noranda .....	170
Figura 3-22 Esquema descriptivo del Convertidor Peirce-Smith .....	173
Figura 3-23 Diagrama descriptivo de Convertidor Pierce-Smith .....	174
Figura 3-24 Esquema de Horno Eléctrico de Limpieza de Escorias, ENAMI .....	176
Figura 3-25 Esquema de Horno Eléctrico de Limpieza de Escorias la Fundición Ventanas.....	177
Figura 3-26 Esquema de Hornos de Limpieza de la Fundición Chagres .....	178
Figura 3-27 Circuito de flotación y de recuperación de agua de Potrerillos .....	179
Figura 3-28 Diagrama de la unidad de refinado y moldeo de la fundición Chuquicamata .....	180
Figura 3-29 Esquema descriptivo de Horno de Refinado tipo Basculante .....	181
Figura 3-30 Esquema del proceso de refinado a fuego .....	181
Figura 3-31 Flujos de gases y efluentes en Ministro Hales.....	184
Figura 3-32 Planta de ácido sulfúrico de Chuquicamata .....	186

Figura 3-33 Planta de tratamiento de efluentes de Chuquicamata .....	187
Figura 3-34 Cronograma de proyectos asociados para el cumplimiento del D.S. 28/2013 del MMA .....	198
Figura 3-35 Gestión de gases en Chuquicamata.....	200
Figura 3-36 Proyección 2020 esperada a 2031 vs proyección 2019, según tipo de producto ...	207
Figura 3-37 Producción de cobre en fundiciones .....	207
Figura 3-38 Costos directos de fundición (USD/t de concentrado), 2020 .....	209
Figura 3-39 Costos operacionales medios de fundiciones en China y Chile [USD/TMF Cu].....	210
Figura 3-40 Aporte del sector minería en la economía regional .....	211
Figura 3-41 Distribución de emisiones según balance de masa según fundición .....	213
Figura 3-42 Proyección de producción de concentrados de cobre refinados y sin refinar .....	219
Figura 5-1 Diagrama esquemático de fuentes emisoras consideradas .....	245
Figura 5-2 Esquema conceptual para estimación de distribución de emisiones .....	247
Figura 5-3 Modulo de estimación de potencial de reducción en Analytica .....	262
Figura 6-1 Mapa fundición Chuquicamata, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas .....	275
Figura 6-2 Concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones .....	277
Figura 6-3 Concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones .....	282
Figura 6-4 Concentraciones de SO <sub>2</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones .....	287
Figura 6-5 Concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Altonorte, todas las estaciones .....	292
Figura 6-6 Concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Altonorte, todas las estaciones .....	295
Figura 6-7 Concentraciones de SO <sub>2</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Altonorte, todas las estaciones .....	297
Figura 6-8 Concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Potrerillos, todas las estaciones .....	300
Figura 6-9 Concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Potrerillos estación Cine Inca .....	302
Figura 6-10 Concentraciones de SO <sub>2</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Potrerillos, todas las estaciones .....	303
Figura 6-11 Mapa fundición Hernán Videla Lira, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas .....	305
Figura 6-12 Concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, todas las estaciones .....	306
Figura 6-13 Concentraciones de SO <sub>2</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, todas las estaciones .....	309
Figura 6-14 Concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, todas las estaciones .....	314

Figura 6-15 Concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías refinería ENAP, todas las estaciones .....	315
Figura 6-16 Concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, todas las estaciones .....	320
Figura 6-17 Concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías refinería ENAP, todas las estaciones .....	321
Figura 6-18 Concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, todas las estaciones .....	325
Figura 6-19 Concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías refinería ENAP, todas las estaciones .....	326
Figura 6-20 Mapa fundición Chagres, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas .....	330
Figura 6-21 Concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chagres, todas las estaciones .....	332
Figura 6-22 Concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chagres, todas las estaciones .....	334
Figura 6-23 Mapa fundición Caletones, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas .....	336
Figura 6-24 Concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Caletones, todas las estaciones .....	338
Figura 6-25 Concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Caletones, todas las estaciones .....	341
Figura 6-26 Concentraciones de $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Caletones, todas las estaciones .....	343
Figura 7-1 Extracto del modelo para estimación de beneficios unitarios .....	368
Figura 8-1 As en Material de Limpieza [TMF], periodo 2017-2020 .....	389
Figura 8-2 S en Material de Limpieza [TMF], periodo 2017-2020 .....	390
Figura 8-3 Razón de Material de Limpieza en Emisión Anual para Arsénico y Azufre (%), periodo 2017-2020 .....	392
Figura 8-4 Suma de balances mensuales de As y límite propuesto [ton/año] .....	397
Figura 8-5 Captura y Fijación de Arsénico (%) .....	398
Figura 8-6 Captura y Fijación de Azufre (%) .....	398
Figura 8-7 Material Particulado [ $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ] en Secadores .....	399
Figura 8-8 Percentiles anuales de concentración horaria de $\text{SO}_2$ .....	400
Figura 8-9 Arsénico [ $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ] medido en Plantas de Ácidos .....	401
Figura 8-10 Mercurio [ $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ] medido en Plantas de Ácidos .....	402
Figura 8-11 Arsénico [ $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ] medido en Hornos de Escoria .....	403
Figura 8-12 Material Particulado [ $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ] medido en Hornos de Escoria .....	404
Figura 8-13 Material Particulado [ $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ] medido en Hornos de Refino .....	405
Figura 9-1 Costos directos de fundición (USD/t de concentrado), 2020 .....	428

## Acrónimos y Abreviaturas

### Instituciones

MINSAL:	Ministerio de Salud
MMA:	Ministerio del Medio Ambiente
OCDE:	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico
OMS:	Organización Mundial de la Salud
PNUMA:	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
USEPA:	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

### Monedas

CLP:	Pesos de Chile
UF:	Unidad de Fomento Chilena
USD:	Dólares de Estados Unidos

### Abreviaturas

ACB:	Análisis Costo Beneficio
AGIES:	Análisis General del Impacto Económico y Social
CIE10:	Clasificación Internacional de Enfermedades, 10ª edición
COI:	Costo de Enfermedad, por sus siglas en inglés " <i>Cost Of Illness</i> "
FE:	Factor de Emisión
FEC:	Factor Emisión-Concentración
GEI:	Gases de Efecto Invernadero
HLE	Horno de Limpieza de Escorias
MB	Metal Blanco
MP:	Material Particulado
NESHAP:	Estándares Nacionales de Emisión de Contaminantes Atmosféricos Peligrosos, por sus siglas en inglés " <i>National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants</i> "
NPCA:	Norma Primaria de Calidad Ambiental
PAS	Plantas de Ácido
PLE	Planta de Limpieza de Escorias
PNM:	Política Nacional Minera
PPDA:	Plan de Prevención y Descontaminación Ambiental
PTE	Planta de Tratamiento de Efluentes
PTGC	Planta de Tratamiento de Gases de Cola
RAA:	Regulación sobre el aire limpio, por sus siglas en francés " <i>Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère</i> "

S.I.	Sin información
SNIFA:	Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental
TIR:	Tasa Interna de Retorno
TR:	Tracto Respiratorio
USGS:	Servicio Geológico de Estados Unidos, por sus siglas en inglés "U.S. Geological Survey"
VAN:	Valor Actual Neto
VVE:	Valor de la Vida Estadística
WTP:	Disposición a Pagar, por sus siglas en inglés "Willingness to pay"

## Prefijos

T:	Tera ( $10^{12}$ )
G:	Giga ( $10^9$ )
M:	Mega ( $10^6$ )
k:	Kilo ( $10^3$ )
m:	Mili ( $10^{-3}$ )
$\mu$ :	Micro ( $10^{-6}$ )
n:	Nano ( $10^{-9}$ )

## Unidades

<b>t:</b>	<b>Tonelada</b>
<b>h:</b>	<b>Hora</b>

## 0. Resumen ejecutivo

El presente informe se enmarca en una consultoría cuyo objetivo general es proporcionar antecedentes para la elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire de Arsénico (NPCA) y también para la revisión del D.S. 28/2013 del MMA. En particular el presente informe se refiere al segundo de los objetivos específicos, dedicado a la revisión de la Norma de Emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico. Sin perjuicio de esto, la información expuesta en el presente documento se ve complementada con los contenidos desarrollados en el informe complementario dedicado a la presentación de antecedentes para la elaboración de una NPCA para As.

### **Revisión de la regulación nacional e internacional para fundiciones y fuentes emisoras de arsénico**

En primer lugar, se realizó una revisión de las normas nacionales e internacionales existentes que regulan las emisiones de arsénico en fundiciones de cobre y otras fuentes. Se identificaron como principales países fundidores de cobre primario siete países (China, Chile, Japón, Zambia, Estados Unidos, Alemania y Canadá) y se analizó la normativa asociada a emisiones de las fundiciones de cobre y otras fuentes de arsénico de cada uno de ellos.

En esta revisión se identificaron principalmente tres tipos de normas: las que están dirigidas a fundiciones, las que son generales para todas las instalaciones y las que están dirigidas específicamente a la emisión de arsénico. Las normas controlan una variedad de contaminantes, observándose foco principalmente en las emisiones de SO<sub>2</sub>, así como de MP y algunos de sus componentes perjudiciales para la salud humana (As, Hg, Pb, Cd) proporcionando límites de emisiones para las diferentes fuentes emisoras. Se destaca el caso de EEUU el cual ha avanzado en la regulación de estas fuentes por una serie de regulaciones complementarias que han permitido un control de sus emisiones, encontrándose actualmente en revisión de una nueva propuesta de regulación (US-EPA, 2022).

Del contraste entre las diferentes normativas se observa que las regulaciones optan por un amplio rango de límites que varían según su punto de medición, frecuencia de medición, contaminantes y niveles permitidos. Aun así, de forma general se regulan las emisiones puntuales enfocándose en contaminantes asociados a las fundiciones tales como el SO<sub>2</sub>, MP, As, Hg y otros metales con impactos sobre la salud humana. En este sentido, se observa que la regulación chilena está en línea con las regulaciones internacionales, aunque se observa espacios de mejora tanto a niveles de la regulación de otros puntos de medición, y aumento de los niveles de ambición en los niveles actuales para fuentes puntuales.

### **Escenario nacional e internacional para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico**

Respecto a la producción mundial de cobre fundido, esta alcanzó 21,1 millones de toneladas el año 2020, donde un 83% corresponde a fundición primaria de cobre. Actualmente existen 121

fundiciones de cobre en operación, de las cuales se estima que más de 100 son fundiciones primarias.

Desde hace más de una década, China ha sido el principal fundidor de cobre en el mundo, fundiendo alrededor de 6,4 millones de toneladas métricas (MMTM) el año 2018. A este le sigue Chile, segundo fundidor a nivel mundial, con 1,25 MMTM de cobre fundido primario en 2018. En tercer lugar, se encuentra Japón con una magnitud similar de producción. Se observa que la producción mundial ha tendido al aumento, variando un 3% en promedio entre los años 2000 y 2018. En este sentido, si bien Chile se ha mantenido como un actor relevante en la producción, ha retrocedido en la participación del mercado frente al significativo avance de China.

En cuanto a la capacidad de fusión, China es el país con mayor capacidad instalada, la cual ha ido en aumento durante las últimas dos décadas, representando un 37,4% de la capacidad instalada mundial al año 2020. A este le siguen Chile, con un 9,6% y Japón, con un 9,5%. Por otra parte, durante el mismo periodo de tiempo la capacidad de fusión en países latinoamericanos ha disminuido, mientras que la producción de concentrados de cobre ha aumentado, lo que implicó un aumento en las exportaciones de concentrados de cobre desde la región, destacando Chile y Perú como principales exportadores. De esta forma el año 2020, más de dos tercios de los concentrados chilenos producidos no pasaron por fundiciones chilenas, implicando un aumento desde la situación observada en la década 2000-2009, donde esta proporción oscilaba entre 50%-60%. De acuerdo a las proyecciones de Cochilco (2021), se espera que esta tendencia se acentúe durante los próximos años.

Respecto del proceso de fusión, sus etapas y procesos son complejos, y cada fundición tiene sus particularidades propias. De esta forma, para sistematizar y ordenar los resultados en el presente informe se proponen las siguientes etapas: preparación de los concentrados de cobre (secado, tostación), fusión, conversión, limpieza de escorias, refinación y tratamiento de gases. En la Tabla 0-1 se presenta un resumen de cada una de las etapas y las principales tecnologías asociadas que son utilizadas nacional e internacionalmente.

**Tabla 0-1 Procesos de la fundición y tecnologías asociadas**

Proceso	Descripción	Tecnologías asociadas
Preparación de concentrados	<b>Secado:</b> Deshumidificación del concentrado	Secador giratorio de calor directo Secador giratorio de calor indirecto Secador de dispersión (Lecho fluidizado)
	<b>Tostación:</b> Calentamiento del concentrado, sin fundir, para remover S y As de los minerales sulfurados	Tostador
Fusión	Fusión de los concentrados para producir dos fases separables, una rica en Cu (mata) y otra rica en FeOx (escoria).	<b>Fusión flash:</b> Horno <i>flash</i> Outotec (ex – Outokumpu) o INCO
		<b>Fusión bath:</b> Horno reverbero, de eje/alto, eléctrico, Ausmelt/ISASMELT, Mitsubishi, Convertidor Noranda, Convertidor El Teniente (CT), Baiyin y Vanyukov
		<b>Fusión shaft:</b> Horno <i>shaft</i>
		<b>Fusión mixta:</b> Hornos <i>flash</i> y <i>bath</i>
		<b>Fusión de concentrados complejos:</b> Hornos <i>Bottom blowing furnaces (BBF)</i>
Conversión	<b>Conversión discontinua:</b> Transformación de la mata en cobre blíster para eliminar Fe, S y las otras impurezas, en proceso <i>batch</i>	Convertidor Peirce – Smith
		Convertidores Hoboken
		Hornos AUSmelt/ISASMELT utilizados para la conversión
	<b>Conversión continua:</b> Transformación de la mata en cobre blíster para eliminar Fe, S y las otras impurezas, en proceso continuo	Horno Mitsubishi (fusión y conversión integradas)
		“Doble flash”, Kennecott-Outotec flash
		Hornos de lecho empacado <i>Reactores Bottom blowing reactors (BBR)</i>
Limpieza de escorias	Limpieza de impurezas que se realiza en los procesos de fusión, conversión y refinación	Horno eléctrico (HE)
		Horno Eléctrico de Limpieza de Escoria (HLE)
		Proceso metalúrgico
Refinación	Formación de los ánodos	Hornos anódicos Rueda de moldeo
	Formación de los cátodos	Refinación electrolítica
Tratamiento de gases	Acondicionamiento de los gases metalúrgicos primarios en la fusión	Planta de Limpieza de Gases
	Captura de SO <sub>2</sub> de los gases provenientes de las etapas de fusión y conversión	Planta de ácido sulfúrico

Fuente: Elaboración propia

Respecto al contexto local, en la Tabla 0-2 se presentan las emisiones estimadas mediante método de balance de masa, así como medidas de As y SO<sub>2</sub> en las fundiciones en el marco del D.S. 28/2013 del MMA. Se puede observar que las emisiones puntuales representan un pequeño porcentaje respecto a las emisiones totales, correspondiendo a un 0,6% de las emisiones totales de As y a un 6,8% de las emisiones totales de SO<sub>2</sub>. A las emisiones presentadas en la Tabla 0-2 se suman las emisiones de la planta de tostación de Ministro Hales, la cual cuenta con sistemas de captura y tratamiento de polvos y gases, contribuyendo con una fracción muy menor de As (23 kg) y SO<sub>2</sub> (238 ton). De acuerdo a la proyección de emisiones realizada, de no mediar cambios tecnológicos se espera que el año 2035 las emisiones sean mayores a las emisiones actuales, con

los crecimientos concentrándose en las fundiciones de Chuquicamata y Potrerillos, las cuales al 2020 operaban con una producción reducida. De esta forma se espera que al año 2035, las emisiones de As se encuentren en torno a 600 [ton/año], mientras que las de SO<sub>2</sub>, en torno a 90 mil [ton/año].

**Tabla 0-2 Estimación de emisiones [kg/año] totales (balance de masa) y por monitoreo continuo o mediciones discretas, año 2020**

Fuente	Totales (Balance de masa)		Chimeneas con mediciones	
	As	SO <sub>2</sub>	As (2)	SO <sub>2</sub> (3)
Fundición Chuquicamata	180.781	9.090.334	605	578.822
Fundición Altonorte	117.721	12.827.234	91	1.384.567
Fundición Potrerillos	51.037	3.516.746	546	805.518
Fundición HVL	(1) 18.652	7.999.918	108	374.182
Fundición Ventanas	28.439	10.421.635	318	285.695
Fundición Chagres	8.640	9.014.437	424	671.701
Fundición Caletones	67.041	28.625.910	765	1.941.468
Planta Tostación MH (4)	-	-	23	238.884
<b>Total</b>	<b>472.312</b>	<b>81.496.216</b>	<b>3.148</b>	<b>6.280.836</b>

(1) Reestimación basada en intensidad de emisiones considerando los balances de masa del titular en el periodo oct2020 a sep2021. Las emisiones reportadas hasta agosto 2020 fueron estimadas con una metodología que no se ajusta a los datos operacionales, la cual contaba originalmente con dos meses con valores negativos.

(2) As reportado para plantas de ácido y hornos de escoria

(3) SO<sub>2</sub> reportado para plantas de ácido

(4) Planta de Tostación Ministro Hales no cuenta ni con secadores ni horno de escorias y luego solo reporta emisiones asociadas a planta de tostación.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes de titulares a SMA en el marco del D.S. 28/2013 del MMA

### Potenciales tecnologías de abatimiento

Las emisiones, además de estar directamente relacionadas con el nivel de la operación de las fuentes, las características de los concentrados y la tecnología instalada en las diferentes fuentes emisoras, pueden ser reducidas mediante tres líneas de acción:

1. Medidas operacionales de manejo de materia prima y maquinaria.
2. Medidas tecnológicas de recambio de tecnología a tecnología más limpia.
3. Medidas tecnológicas de equipos adicionales para abatimiento de las emisiones de ciertos contaminantes.

Las primeras corresponden a medidas asociadas a correctas mantenciones, mejoras en la operación y capacitación de los trabajadores, entre otras. Si bien pueden tener un fuerte impacto en las reducciones de emisiones, sobretodo fugitivas, su cuantificación es compleja en la medida de que depende de supuesto de cómo varíe la operación futura respecto de la operación actual. Es por esto que el análisis se centra en las medidas tecnológicas.

Para identificar potenciales tecnologías de abatimiento se realizó una comparación cruzada de las tecnologías de captura y mitigación aplicadas en las fundiciones, especialmente en el periodo desde la publicación de la Norma. Este se complementó con una búsqueda de antecedentes internacionales. En este último aspecto, el proceso de actualización de la norma de emisión de

fundiciones en EE.UU. fue una fuente de información relevante, en la medida que contaba con información actualizada del estado del arte.

Se identificó el origen de las emisiones en cada una de las etapas del proceso de fundición, para luego identificar las tecnologías de control de emisiones que permitirían reducirlas. A partir de literatura y de información de las fundiciones se identifican 12 medidas diferentes, junto a sus costos y eficiencias esperadas. Para ello se privilegiaron antecedentes nacionales que permitan contar con antecedentes de los costos y eficiencia basado en experiencias chilenas previas. En caso de no contar con antecedentes se complementó la información con literatura internacional.

### **Estimación del potencial de reducción de emisiones para las actuales fuentes emisoras de arsénico**

Para estimar el potencial de reducción de emisiones para las fuentes emisoras de arsénico, fue necesario en primer lugar estimar las emisiones a nivel de proceso para luego poder estimar la variación en las emisiones al implementar diferentes medidas de mitigación.

La metodología utilizada para determinar la distribución de las emisiones a nivel de proceso unitario consistió en estimar los efectos que las tecnologías implementadas desde la entrada en vigencia de la norma tuvieron en las emisiones de forma de poder estimar la distribución de estas entre los diferentes procesos unitarios. Es así como a partir de información obtenida del estudio de COPRIM (2012) y de supuestos de modelación pertinentes, se obtuvo la estimación de la distribución de las emisiones por fuente unitaria, y utilizando las emisiones ya estimadas por balance de masa se obtuvieron las emisiones por fuente unitaria.

Finalmente, se realizó una estimación del potencial de reducción calculando la diferencia de emisiones entre el escenario base previamente estimado y la implementación de una medida o un paquete de medidas de control de emisiones, lo anterior para un año de referencia futuro. En base a una serie de supuestos de modelación, usando la herramienta Analytica, se obtuvo el potencial de reducción para cada medida, los cuales se presentan en la Tabla 0-3 y Tabla 0-4. Se observa que las principales reducciones de As provendrían de la captura y tratamiento de las emisiones fugitivos del reactor (Horno Flash, Convertidor Teniente o Reactor Noranda), mientras que en el caso del  $SO_2$ , la mayor parte de las reducciones provendrían de la captura de las emisiones fugitivas en los convertidores (CPS).

**Tabla 0-3 Potencial de reducción As [kg/año] según medida y fundición, proyectado para año 2035**

Medida de mitigación	DCH	ALN	POT	HVL	DVE	CHG	CAL	Total
<b>Planta tostación</b>		12.882	6.654	2.219	3.119	1.047	7.352	<b>33.273</b>
<b>Captura secundaria en boca del reactor</b>			16.002	3.293	347		28.217	<b>47.860</b>
<b>Captura y tratamiento sangrado reactor</b>	54.705	38.202	13.961	1.437		1.228	9.847	<b>119.381</b>
<b>Captura techo en reactor (1)</b>	70.187	61.992	35.457	5.569	5.763	1.477	44.752	<b>225.197</b>
<b>Captura techo y filtro de manga reactor(1)</b>	78.961	69.741	39.889	6.265	6.483	1.662	50.346	<b>253.347</b>
<b>Captura y tratamiento gases secundarios CPS</b>			1.600	201		266	1.129	<b>3.196</b>
<b>Captura terciaria en CPS (2)</b>	6.323	719	1.994	251	128	332	1.407	<b>11.154</b>
<b>Alimentación carga fría CPS</b>			233			39	165	<b>437</b>
<b>Captura y tratamiento hornos escoria</b>				5.663		-		<b>5.663</b>
<b>ESP húmedo en horno anódico</b>	82.126			72				<b>82.198</b>
<b>Flotación de escorias</b>				11.325	16.780	4.551		<b>32.656</b>

(1) Potencial incluye la instalación de captura secundaria en boca del reactor y captura y tratamiento del sangrado del reactor

(2) Potencial incluye la captura y tratamiento de gases secundarios en CPS.

Nota: Las celdas en blanco significan que las medidas no son aplicables a la fundición correspondiente o que ya tienen una medida aplicada con mayor eficiencia

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 0-4 Potencial de reducción SO<sub>2</sub> [kg/año] según medida y fundición, proyectado para año 2035**

Medida de mitigación	DCH	ALN	POT	HVL	DVE	CHG	CAL	Total
<b>Planta tostación</b>		203.942	65.247	140.946	169.334	160.456	463.009	<b>1.202.935</b>
<b>Captura secundaria en boca del reactor</b>		805.756	190.989	792.286			3.076.344	<b>4.865.375</b>
<b>Captura y tratamiento sangrado reactor</b>	287.110	773.526	183.350	380.297		255.134	1.181.316	<b>3.060.733</b>
<b>Captura y tratamiento gases secundarios CPS</b>			398.785	806.151		1.641.134	2.569.362	<b>5.415.432</b>
<b>Captura terciaria en CPS (1)</b>	959.767	1.442.073	512.724	1.036.479	331.271	2.110.029	3.303.466	<b>9.695.810</b>
<b>Alimentación carga fría CPS</b>		400.576	142.423			586.119	917.629	<b>2.046.748</b>
<b>Captura y tratamiento hornos escoria</b>				40.180		59.597		<b>99.777</b>
<b>Flotación de escorias</b>				180.811	260.052	268.187		<b>709.049</b>
<b>Planta de tratamiento de gases de cola</b>							903.099	<b>903.099</b>

(1) Potencial incluye la captura y tratamiento de gases secundarios en CPS.

Nota: Las celdas en blanco significan que las medidas no son aplicables a la fundición correspondiente o que ya tienen una medida aplicada con mayor eficiencia

Fuente: Elaboración propia

## **Estimación de la evolución y cambios en calidad del aire, desde dictación del D.S. 28/2013 del MMA**

A partir de información proporcionada por la contraparte técnica, proveniente de registros y reportes de las fundiciones, y de información obtenida del SINCA, fue posible realizar un análisis de las concentraciones medidas de los contaminantes MP10, MP2,5 y SO<sub>2</sub> en las estaciones de monitoreo cercanas a las fundiciones desde el año 2013 en adelante.

Se observa que en general, luego del comienzo de la vigencia de la norma de emisión de acuerdo a la fecha correspondiente para cada una de las fundiciones, las concentraciones promedio de estos contaminantes tienden a disminuir. Se identifican algunas excepciones, observándose un aumento de las concentraciones de As luego del inicio de la vigencia de la norma en los alrededores de Hernán Videla Lira y Chagres, y un aumento de las concentraciones de SO<sub>2</sub> en las cercanías de Hernán Videla Lira y Caletones. Los casos de Chagres y Caletones se relacionarían a situaciones puntuales, observándose que no todas las estaciones presentan la misma variación, mientras que el de Hernán Videla Lira sería ocasionado por un posible aumento de las emisiones de la fundición. Lamentablemente los problemas en la aplicación de la metodología de balance de masa en esta fundición durante los años 2019 y 2020, no permiten verificar esta hipótesis.

Los aumentos en las concentraciones de MP10 y MP2,5 se dan en las cercanías de Chuquicamata, Altonorte y Potrerillos. Sin embargo, no se observan aumentos en todas las estaciones de cada una de las zonas y tampoco se condice con el comportamiento de las concentraciones de As y SO<sub>2</sub>, por lo que estos aumentos estarían asociados a otras fuentes emisoras presentes en la zona.

## **Efectos adversos y metodologías de estimación de emisiones para contaminantes asociados a la norma**

Se identificaron los efectos en la salud (asociados a exposición crónica por vía inhalatoria, exposición aguda y exposición a través de otras vías) y el medio ambiente asociados al arsénico, así como cuantificaciones de estos efectos, revisando el estudio *“Residual Risk Assessment for the Primary Copper Smelting Source Category in Support of the 2021 Risk and Technology Review Proposed Rule”* (US-EPA, 2021b). Además, se realizó una identificación de los efectos adversos de arsénico y otros contaminantes, y de coeficientes de riesgo asociados, mediante la revisión de investigaciones científicas desde el año 2011.

Por otra parte, para la estimación de otros beneficios de la aplicación de la norma, se siguió la Guía Metodológica para Elaboración de AGIES (MMA, 2013b): se identificaron impactos, se cuantificaron y luego valorizaron. Los tipos de impactos identificados son seis, relacionados a efectos a la salud, urbanos y ambientales. De estos, sólo se cuantifica el efecto en la salud, utilizando funciones de concentración-respuesta obtenidos a partir de estudios epidemiológicos y de tasas de incidencia. Por último, la valorización se hizo utilizando el Valor de la Vida Estadística en el caso de mortalidad y costos unitarios directos en el caso de morbilidad.

Una vez valorizados los impactos a la salud, se estimaron los beneficios económicos sociales de la reducción de emisiones. Para esto, se determinaron factores de emisión-concentración, con la

finalidad de cuantificar la variación de las concentraciones locales al disminuir las emisiones de contaminantes en una tonelada anual. A partir de la variación en las concentraciones, es posible determinar la variación en el riesgo de casos individuales y luego, considerando la población de cada zona, la variación en la cantidad de casos sociales evitados. Finalmente, a partir de la valorización de los impactos se obtienen los beneficios monetarios por reducción de una tonelada emitida. Estos se presentan en la Tabla 0-5.

**Tabla 0-5 Beneficios unitarios por contaminante y fundición al año 2035 [UF / t/año]**

Fundición	MP	SO2	As	
			Difusa	Puntual
Fundición Chuquicamata	33.557	1.867	20	18
Fundición Altonorte	99.895	8	23	14
Fundición Potrerillos	2.373	0	0	0
Fundición HVL	592.311	133	669	237
Fundición Ventanas	1.466.722	10.660	60	21
Fundición Chagres	482.647	4	17	32
Fundición Caletones	237	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

### Escenarios de actualización de la norma existente

Finalmente, se realizó una revisión comparativa de la norma de emisión existente (D.S. 28/2013) con normativas internacionales con la finalidad de proponer alternativas de actualización para esta. De esta revisión se concluye que:

- La definición de fuente hecha en el D.S. 28/2013 es robusta y no genera incertidumbres
- Los límites de emisión establecidos para los diferentes procesos unitarios son cumplidos actualmente, incluso con un margen, y son parecidos a los valores internacionales. Sin embargo, la normativa estadounidense se ha focalizado en las emisiones fugitivas, ya que estas corresponden a la mayor parte de las emisiones.
- Las mediciones isocinéticas son equivalentes a las utilizadas en EE.UU., usándose en secadores, hornos de limpieza de escorias y plantas de ácido. Sin embargo, la norma estadounidense también incluye este tipo de mediciones en refinación de ánodos, conversión y fundición para captación en techo.
- Si bien el método de estimación de emisiones por balance de masa se ha ido perfeccionando con el tiempo, aún se identifican espacios de mejora, destacándose tres: la estandarización de flujos, contabilidad del material de limpieza y gestión oportuna de emisiones negativas.

Por otra parte, se revisan y proponen cambios a los límites de emisión, considerando la experiencia internacional y los datos históricos de las fuentes nacionales. Los cambios propuestos se presentan en tres alternativas incrementales en su ambición para cada límite específico, las cuales podrían ser reordenadas para dar forma a nuevos escenarios regulatorios. Las alternativas propuestas se resumen en la Tabla 0-6, pero en general se refieren a:

- Ajuste de los actuales límites de emisión para procesos unitarios (secadores, hornos de escoria, plantas de ácido), de forma de garantizar que se mantengan sus niveles actuales de sobre cumplimiento.
- Nuevo límite de emisión para chimenea de plantas de ácido existentes (Hg), en línea con los valores reportados por las fundiciones.
- Revisión de los límites anuales de emisiones de arsénico, separando en límites anuales, verificables a partir de la suma de los balances mensuales (sin considerar material de limpieza) y límites trianuales, a partir de la suma de los balances anuales (considerando material de limpieza). Lo anterior para considerar de mejor forma el efecto significativo que tiene el material de limpieza en aquellas fundiciones con mantenciones con una frecuencia no anual.
- Nuevos límites de emisión para hornos de refinación (MP), en lugar de límites de opacidad, en línea con lo actualmente considerado en la nueva propuesta de la norma de emisión de EEUU (US-EPA, 2022).
- Aumentar el número de horas que se debe cumplir con los límites establecidos de SO<sub>2</sub> en plantas de ácido, acercándose a la nueva propuesta de la norma de emisión de EEUU (US-EPA, 2022), en donde se exige su cumplimiento en todo momento.
- Obligación de reportar todas las emisiones que salgan de chimenas de los procesos relevantes y obligación de generar un plan de acción cuando se supere el 80% de la norma en ciertos procesos.
- Establecer límites para las emisiones de sistemas de captura y tratamiento secundarios, así como establecer la obligación de captura de estos flujos en los CPS.
- Límite de tasa de emisión de material particulado para emisiones fugitivas, en línea con lo propuesto por la nueva propuesta de la norma de emisión de EEUU (US-EPA, 2022), como una forma de controlar las emisiones de componentes tóxicos como arsénico y mercurio.
- Prohibición de convertidores por lotes (tipo *batch*) en nuevas fundiciones, una que restricción que se encuentra vigente en Estados Unidos para todas las fundiciones construidas después de 1998 (US-EPA, 2002a).
- Agregar un límite de MP10 en los reactores de fusión de las fuentes nuevas y a nivel de sistema para cada proceso relevante.

Tabla 0-6 Límites de emisión actuales y propuestos según alternativa

Punto de medición	Contaminante	Fuente	Actual	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Método	Frecuencia de verificación
Sistema de la fundición	As	Fundiciones existentes	Emisión anual	Emisión anual	<b>Balance Anual Emisión Trianual</b>	Balance Anual Emisión Trianual	Balance masa	Anual / Trianual
	SO <sub>2</sub>	Fundiciones existentes	Balance anual	Balance anual	Balance anual	Balance anual	Balance masa	Anual
Secadores	MP	Fundiciones existentes	50 mg/Nm <sup>3</sup>	50 mg/Nm <sup>3</sup>	50 mg/Nm <sup>3</sup>	<b>30 mg/Nm<sup>3</sup></b>	CH-5	Mensual
		Fuentes nuevas	30 mg/Nm <sup>3</sup>	30 mg/Nm <sup>3</sup>	30 mg/Nm <sup>3</sup>	30 mg/Nm <sup>3</sup>	CH-5	Mensual
Planta de ácidos	SO <sub>2</sub>	Fundiciones existentes	600 ppm	600 ppm	<b>600 ppm (1)</b>	600 ppm (1)	CEMS	Mensual
		Otras fuentes industriales existentes	400 ppm	400 ppm	<b>400 ppm (1)</b>	400 ppm (1)	CEMS	Mensual
		Fuentes nuevas	200 ppm	200 ppm	<b>200 ppm (1)</b>	200 ppm (1)	CEMS	Mensual
	As	Fundiciones existentes	1 mg/Nm <sup>3</sup>	<b>0,8 mg/Nm<sup>3</sup></b>	0,8 mg/Nm <sup>3</sup>	0,8 mg/Nm <sup>3</sup>	CH-29	Mensual
		Otras fuentes industriales existentes	1 mg/Nm <sup>3</sup>	<b>0,8 mg/Nm<sup>3</sup></b>	0,8 mg/Nm <sup>3</sup>	0,8 mg/Nm <sup>3</sup>	CH-29	Mensual
		Fuentes nuevas	1 mg/Nm <sup>3</sup>	<b>0,8 mg/Nm<sup>3</sup></b>	0,8 mg/Nm <sup>3</sup>	0,8 mg/Nm <sup>3</sup>	CH-29	Mensual
	Hg	Fundiciones existentes	n.a.	<b>0,1 mg/Nm<sup>3</sup></b>	<b>0,05 mg/Nm<sup>3</sup></b>	0,05 mg/Nm <sup>3</sup>	CH-29	Mensual
		Otras fuentes industriales existentes	n.a.	<b>0,1 mg/Nm<sup>3</sup></b>	0,1 mg/Nm <sup>3</sup>	0,1 mg/Nm <sup>3</sup>	CH-29	Mensual
		Fuentes nuevas	0,1 mg/Nm <sup>3</sup>	0,1 mg/Nm <sup>3</sup>	<b>0,05 mg/Nm<sup>3</sup></b>	0,05 mg/Nm <sup>3</sup>	CH-29	Mensual
Hornos de limpieza de escoria	As	Fundiciones existentes	1 mg/Nm <sup>3</sup>	<b>1 mg/Nm<sup>3</sup> (2)</b>	1 mg/Nm <sup>3</sup> (2)	1 mg/Nm <sup>3</sup> (2)	CH-29	Mensual
		Fuentes nuevas	1 mg/Nm <sup>3</sup>	<b>1 mg/Nm<sup>3</sup> (2)</b>	1 mg/Nm <sup>3</sup> (2)	1 mg/Nm <sup>3</sup> (2)	CH-29	Mensual
	MP	Fundiciones existentes	50 mg/Nm <sup>3</sup>	<b>50 mg/Nm<sup>3</sup> (3)</b>	50 mg/Nm <sup>3</sup> (3)	50 mg/Nm <sup>3</sup> (3)	CH-5	Mensual
		Fuentes nuevas	30 mg/Nm <sup>3</sup>	<b>30 mg/Nm<sup>3</sup> (4)</b>	30 mg/Nm <sup>3</sup> (4)	30 mg/Nm <sup>3</sup> (4)	CH-5	Mensual

Punto de medición	Contaminante	Fuente	Actual	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Método	Frecuencia de verificación
Hornos de refino	Opacidad	Todas	20% Ringelman	20% Ringelman	n.a.	n.a.		Mensual
	MP	Todas	n.a.	n.a.	<b>5,8 mg/Nm3</b>	5,8 mg/Nm3	CH-5	Mensual
Techo Reactor	MP	Todas	n.a.	n.a.	n.a.	<b>1,95 kg/hr</b>	CH-5	Anual
Techo CPS	MP	Todas	n.a.	n.a.	n.a.	<b>0,77 kg/hr</b>	CH-5	Anual
Techo Hornos de refino	MP	Todas	n.a.	n.a.	n.a.	<b>0,73 kg/hr</b>	CH-5	Anual
Reactor de fusión	MP10	Fuentes nuevas	n.a.	n.a.	n.a.	<b>15 g/ton (5)</b>	CEMS	Anual
Chimeneas de campanas secundarias	MP	Fundiciones existentes	n.a.	<b>11,6 mg/Nm3</b>	11,6 mg/Nm3 (6)	11,6 mg/Nm3 (6)	CH-5	Mensual
		Fuentes nuevas	n.a.	<b>11,6 mg/Nm3</b>	11,6 mg/Nm3 (6)	11,6 mg/Nm3 (6)	CH-5	Mensual
Sistema de la fundición/fuente (7)	MP	Todas	n.a.	n.a.	n.a.	<b>300 g/ton (8)</b>	CEMS	Diario

En negrita se destacan los cambios incrementales respecto de la alternativa regulatoria anterior.

Nota: Las condiciones normales N corresponden a 25°C y 1 atm. En negrita se marcan los cambios respecto del escenario precedente.

- (1) El límite se mantiene, pero se exige el cumplimiento en el 99% de las horas de funcionamiento.
- (2) Si bien el límite se mantiene en 1 mg/Nm3, cuando se supere 0,8 mg/Nm3 se exigirá a la fuente que entregue un informe explicando la causa de superación del umbral de 80% del valor límite establecido, y un plan de acciones para reducir las emisiones correspondientes.
- (3) Si bien el límite se mantiene en 50 mg/Nm3, cuando se supere 40 mg/Nm3 se exigirá a la fuente que entregue un informe explicando la causa de superación del umbral de 80% del valor límite establecido, y un plan de acciones para reducir las emisiones correspondientes.
- (4) Si bien el límite se mantiene en 30 mg/Nm3, cuando se supere 24 mg/Nm3 se exigirá a la fuente que entregue un informe explicando la causa de superación del umbral de 80% del valor límite establecido, y un plan de acciones para reducir las emisiones correspondientes.
- (5) Gramos de MP10 por tonelada de concentrado de cobre que ingresa. El límite es para el promedio anual.
- (6) Se mantiene el límite, pero se hace obligación contar con sistemas de captura secundarios en los convertidores.
- (7) Este valor límite a nivel de sistema aplica para los gases de escape de cualquier combinación de chimeneas, salidas de gases u otras aperturas en hornos, reactores u otros tipos de procesos utilizados para la producción de cobre anódico a partir de concentrados de cobre mediante técnicas pirometalúrgicas. Incluye secadores, hornos de fusión, hornos de escoria, convertidores, unidades combinadas de fusión y conversión, hornos de refinación de ánodo (entre otros equipos).
- (8) Gramos de MP10 por tonelada de concentrado de cobre que ingresa. El límite es para el promedio diario.

Fuente: Elaboración prop

## 1. Objetivos del estudio

De acuerdo con las bases técnicas de la licitación, los objetivos son:

### 1.1 Objetivo general

Proporcionar antecedentes para la elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire de Arsénico y también para la revisión de la Norma de Emisión para fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico, considerando un análisis técnico y económico, así como efectos en la salud y beneficios económicos asociados a reducciones de arsénico y otros contaminantes.

### 1.2 Objetivos específicos

**Objetivo Específico 1: Obtener antecedentes para Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico;** a través de:

- a. Analizar el comportamiento histórico de la concentración de arsénico en material particulado, según disponibilidad de información a nivel nacional, y realizar un diagnóstico de la calidad del aire por arsénico en material particulado.
- b. Revisar y compilar inventarios de emisión disponibles a nivel nacional para arsénico en material particulado, identificando las fuentes emisoras a lo largo del país.
- c. Recopilar y sistematizar estudios sobre efectos en salud y coeficientes de riesgo asociados a la exposición a concentraciones de arsénico en el aire, en sus diferentes formas, según sea necesario.
- d. Proponer una metodología y desarrollar los antecedentes necesarios que permita estimar relaciones entre emisión y concentración de arsénico en aire.
- e. Generar y recopilar los antecedentes técnico-económico para fundamentar, a lo menos, tres alternativas de propuestas regulatorias, para la elaboración de una norma primaria de calidad del aire para arsénico.
- f. Evaluar costo de la aplicación de las alternativas de propuestas regulatorias.

**Objetivo Específico 2: Revisión de la Norma de emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico;** a través de:

- a. Estimar la evolución y cambios en calidad del aire (gases y material particulado), desde el momento de dictación de la Norma de Fundiciones (D.S. 28/2013 del MMA) hasta la actualidad, para las comunas aledañas a fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico.
- b. Analizar y describir el escenario nacional e internacional para Fundiciones de Cobre y fuentes emisoras de arsénico.
- c. Analizar la regulación internacional para emisiones al aire de Fundiciones de Cobre y fuentes emisoras de arsénico.
- d. Identificar las potenciales tecnologías de abatimiento para reducir las emisiones de gases y partículas (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, MP y arsénico) en fundiciones de cobre y fuentes emisoras de

- arsénico, en cada uno de los tipos de procesos (con y sin combustión), estimando los costos de inversión, operación y mantención.
- e. Estimar el potencial de reducción de emisiones para las actuales fuentes emisoras de arsénico.
  - f. Resumir resultados de investigaciones científicas que aporten actualizaciones sobre efectos adversos a las personas o a los recursos naturales, y metodologías de medición de emisiones para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico.
  - g. Elaborar al menos tres escenarios de actualización de la norma existente, con aplicación a nivel nacional, considerando lo solicitado por el reglamento para la dictación de normas de calidad ambiental y de emisión.

Mientras en el presente informe se describen las metodologías y resultados de las actividades asociadas al objetivo específico 2, en un informe en paralelo y complementario (Informe sobre la Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico), entregado adjunto al presente documento, se desarrollan las actividades asociadas al objetivo específico 1. En el presente informe se desarrolla un capítulo para cada una de las especificaciones del objetivo específico 2.

## 2. Regulación nacional e internacional para fundiciones y fuentes emisoras de arsénico

En Chile, desde el año 2013 existe una norma específica a fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico, el D.S. 28/2013 (MMA, 2013a). Este se estableció en el contexto de conocimiento y conciencia crecientes de los efectos adversos sobre la salud de las personas que se encuentran expuestas al arsénico y otros contaminantes del aire. Esta norma se presenta en la subsección siguiente junto a normas extranjeras existentes en estas materias, después de una presentación breve que permite entender cuál es el panorama general en materia de regulación del arsénico y otros contaminantes emitidos desde fuentes industriales. En particular, se entregan detalles relativos al arsénico emitido en el rubro de la minería y metalurgia.

Debido a que está presente de forma natural en el ambiente, por ejemplo, en sulfuros de la corteza terrestre<sup>1</sup>, el arsénico puede liberarse al ambiente tanto como resultado de procesos naturales como de actividades antropogénicas tales como la minería y la fundición de cobre y de otros metales. En el año 2012 se estimaba que, a nivel mundial, las emisiones antropogénicas de arsénico en el aire eran equivalentes a 24.000 toneladas (IARC, 2012), de las cuales alrededor del 60% se originan en la fundición de cobre y la combustión de carbón (Martin, Dowling, Pearce, Sillitoe, & Florentine, 2014). Estas cifras demuestran la importancia de la minería y metalurgia de cobre en la liberación del arsénico en el aire, entre otros medios. Además, el arsénico puede ser emitido por una variedad de fuentes industriales, por ejemplo, por instalaciones de incineración de residuos, de combustión de carbón o de energías fósiles (Maggs, 2000).

Estudios internacionales en la materia indican que, a pesar de su contribución sustancial a la cantidad de arsénico atmosférico global, el rol e impacto de la minería y metalurgia en la generación de polvo y aerosoles contaminados por arsénico ha sido poco estudiado (Csavina et al., 2012). Lo anterior se ve reflejado en que la mayoría de los estudios existentes sobre la contaminación por arsénico, en particular los primeros estudios en la materia se centran en la contaminación por arsénico en las aguas, principalmente las aguas subterráneas (Zhang L. et al., 2020).

Sin perjuicio de lo anterior, ante la amplia evidencia de los efectos sobre la salud humana de la exposición al arsénico, distintos países han establecido normas que buscan regular los niveles de emisión de arsénico en el ambiente, enfocadas en las principales fuentes de emisión del contaminante. Existe una preocupación creciente de parte de las autoridades de distintos países por las emisiones y contaminación del aire por arsénico liberado por agentes antropogénicos. Lo anterior se ve reflejado en una serie de nuevas normativas o de enmiendas a regulaciones que

---

<sup>1</sup> En su forma natural, en la tierra, el arsénico se encuentra principalmente en forma de sulfuro en complejos de minerales que contienen plata, plomo, cobre, níquel, antimonio, cobalto y hierro. Se estima que está presente en más de 200 especies minerales de la corteza terrestre y en concentraciones cercanas a 5 mg/kg, aunque puede alcanzar niveles sustancialmente más altos, por ejemplo en depósitos de sulfuro de cobre (IARC, 2012). Además, como elemento natural, el arsénico se encuentra ampliamente distribuido en el agua y el aire.

buscan regular de manera más estricta las emisiones al aire de material particulado con arsénico de instalaciones industriales en lugares cercanos a asentamientos humanos, especialmente de fundiciones de cobre. Este aumento de preocupación y regulación se observa en Chile, y también en China, primer fundidor de cobre a nivel mundial (USGS, 2018), así como en grandes países mineros que enfrentan la problemática de la exposición al arsénico de los trabajadores de la minería y del resto de la población, tales como Japón y Perú.

A continuación, se listan los principales fundidores de cobre primario en el mundo (USGS, 2018) cuya normativa fue seleccionada para ser analizada en este estudio, indicando su ranking entre paréntesis en orden de mayor a menor fundidor:

- China (1)
- Chile (2)
- Japón (3)
- Zambia (4)
- Estados Unidos (6)
- Alemania (13)
- Canadá (15)

Debido a que los países listados anteriormente son grandes actores de la fundición y/o minería del cobre, estos cuentan con normativa específica o general que abarca las fundiciones de cobre. En dichas normativas, de manera variable, se regula directa o indirectamente la emisión de arsénico de las fundiciones, y también de otras fuentes emisoras. También, en algunas de estas normativas se identifican y regulan otros contaminantes además del arsénico que son emitidos por las fundiciones de cobre y de otros metales. La recopilación de regulación internacional se centró en los países que son parte de los 15 mayores fundidores de cobre en el mundo. Dentro de ese ranking, se privilegiaron las normativas que son más completas, profundizadas y de fácil acceso, en comparación con el resto de los países no seleccionados<sup>2</sup>.

De manera general se identifican tres tipos de normas: las que están dirigidas a fundiciones (ya sea de cobre o más), las que son generales para todas las instalaciones y las que están dirigidas específicamente a la emisión de arsénico. Las regulaciones que establecen normas de emisiones para fundiciones rigen las cantidades de arsénico y otros contaminantes liberados al aire por estas instalaciones. En ciertos casos, estas regulaciones se ven complementadas por normas de calidad del aire que establecen concentraciones máximas aceptables en el aire de arsénico y otros contaminantes. La Sección a continuación presenta un resumen de la regulación encontrada para cada país relevante en cuanto a fundiciones de cobre y otras fuentes de emisión de arsénico.

---

<sup>2</sup> Así, en la subsección siguiente, las regulaciones de los países que más se detallan son las normativas que se caracterizan por un nivel de detalle y/o completitud significativos en su contenido y aplicación, en materia de exigencias sobre emisiones de todo tipo de contaminantes por fundiciones de cobre, tanto para arsénico como otras sustancias.

## 2.1 Normas de emisión para diferentes países

A continuación, se presenta el contexto asociado a la normativa chilena existente en materia de emisión de fundiciones y de instalaciones industriales y de las regulaciones comparables encontradas en la materia, para luego dar paso a un análisis comparativo entre las regulaciones.

Sin ser una regulación, es interesante notar que las emisiones máximas recomendadas por el Banco Mundial en fundiciones de cobre son las presentadas en la Tabla 2-1.

**Tabla 2-1 Emisiones máximas para fundiciones de cobre, recomendadas por el Banco Mundial**

Parámetro	Valor máximo [mg/Nm <sup>3</sup> ]
Dióxido de sulfuro (SO <sub>2</sub> )	1.000
Arsénico (As)	0,5
Cadmio (Cd)	0,05
Cobre (Cu)	1
Plomo (Pb)	0,2
Mercurio (Hg)	0,05
MP Fundición	20
MP otras fuentes	50

Nota: no se especifica la fuente dentro de la fundición sobre la cual aplica el límite

Fuente: (Banco Mundial, 1998)

Así también, el Banco Mundial particulariza 8 contaminantes como relevantes en su publicación *"Pollution prevention and abatement Handbook"* (1998). Estos son:

- Material particulado
- Arsénico
- Cadmio
- Plomo
- Mercurio
- Óxidos de Nitrógeno
- Ozono a nivel del suelo
- Óxidos de azufre

Como se puede apreciar de la Tabla 2-1, 6 de estos 8 contaminantes relevantes se encuentran dentro de las emisiones de las fundiciones de cobre (As, Cd, Pb, Hg, SO<sub>2</sub>, MP).

Para el arsénico, las principales fuentes de emisión son fuentes estacionarias, las cuales incluyen fundiciones de cobre, combustión de cobre y otras industrias de metales no férricos (Banco Mundial, 1998). También, alternativamente las normas consideran o no las emisiones fugitivas de arsénico y demás contaminantes, provenientes de fugas en distintos procesos e instalaciones.

### 2.1.1 Chile

En Chile, existe una norma de emisión dirigida a las fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico establecida en el D.S. 28/2013 del Ministerio del Medio Ambiente (MMA, 2013a) en la cual se define una serie de requisitos a cumplir para dichas fuentes. Esta norma tiene por objetivo proteger la salud de las personas y el medio ambiente en todo el territorio nacional, mediante la reducción de las emisiones al aire de material particulado, dióxido de azufre, arsénico y mercurio de estas instalaciones.

En el artículo 3 de la norma se fijan límites máximos de emisión anuales de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y As para fuentes existentes, en toneladas por año, de manera específica a cada fundición existente (ver Tabla 2-2). En el mismo artículo se establece que, simultáneamente, las fundiciones deben cumplir con un nivel de captura y fijación de ambos contaminantes de, al menos, 95%.

**Tabla 2-2 Límites máximos de emisión anual [t/año]**

Fuente emisora	SO <sub>2</sub>	As
Altonorte	24.000	126
Caletones	47.680	130
Chagres	14.400	35
Chuquicamata	49.700	476
Hernán Videla Lira	12.880	17
Potrerosillos	24.400	157
Ventanas	14.650	48

Fuente: (Tabla 1 MMA, 2013a)

Adicionalmente en su artículo 4 se establecen límites de emisión por chimenea asociados a los procesos unitarios de fundiciones de cobre existentes:

- Planta de ácido:
  - Concentración promedio horaria de SO<sub>2</sub> menor o igual a 600 ppm. Controlada por sistema de monitoreo continuo (CEMS por sus siglas en inglés).
  - Concentración de As menor o igual a 1 mg/Nm<sup>3</sup>. Controlado con muestreo isocinético mensual, bajo el método de referencia CH-29, “Determinación de Emisión de Metales desde Fuentes Estacionarias”.
- Secadores:
  - Concentración de MP inferior o igual a 50 mg/Nm<sup>3</sup>. Controlado con muestreo isocinético mensual, bajo el método CH-5 “Determinación de las Emisiones de Partículas desde Fuentes Estacionarias”.
- Hornos de Limpieza de Escorias:
  - Concentración de MP inferior o igual a 50 mg/Nm<sup>3</sup>. Controlado con mediciones mensuales.
  - Concentración de As inferior o igual a 1 mg/Nm<sup>3</sup>. Controlado con mediciones mensuales.
- Chimeneas de hornos de refino:

- Opacidad de humos inferior o igual a 20%. Determinada mediante el método escala Ringelmann o método 9, “Determinación visual de la opacidad de las emisiones de fuentes estacionarias”.

Adicionalmente se establecen límites para otras fuentes industriales emisoras<sup>3</sup> de arsénico existentes y fuentes emisoras nuevas. Para las primeras se establecen límites de emisión de SO<sub>2</sub> y As en las chimeneas de las plantas de ácido que corresponden a una concentración promedio horaria de este contaminante inferior o igual a 400 ppm, así como una concentración de As inferior o igual a 1mg/Nm<sup>3</sup> (igual a lo exigido para las fundiciones), a ser verificada una vez al mes (artículo 5 de este decreto).

Además, según el artículo 8 de esta norma, en el caso de las fuentes emisoras nuevas, se deben cumplir límites de captura y fijación de 98% para SO<sub>2</sub> y As. También, se fija para las plantas de ácido un límite de concentración de emisión de As en chimenea que es igual a lo exigido para las fundiciones existentes (1 mg/Nm<sup>3</sup>) y se establece una concentración límite horaria de SO<sub>2</sub> que es tres veces más exigente que lo establecido para las fundiciones existentes (igual a 200 ppm). Además, de manera nueva, se define un límite máximo de emisión para el mercurio en estas plantas correspondiente a 0,1 mg/Nm<sup>3</sup>, que, similarmente al arsénico, debe ser verificado una vez al mes. A su vez, en las fuentes emisoras nuevas, para MP emitido por secadores y hornos de limpieza de escoria se impone un límite casi dos veces más exigente que para las fuentes existentes, donde la concentración de MP emitida deber ser inferior o igual a 30 mg/Nm<sup>3</sup> y verificada una vez al mes. A diferencia de lo anterior, en el caso del As, se observa que se fija el mismo límite que en el caso de los hornos de limpieza de escoria de fuentes existentes, igual que para humos de chimeneas de hornos de refinación para los cuales se establece el mismo nivel de opacidad que en las instalaciones ya existentes.

En el D.S. 28/2013 se fijan también los periodos de reporte, responsabilidad de fiscalización y metodologías para determinar el valor de concentración de los parámetros de interés y poder verificar el cumplimiento de los diversos límites de emisión establecidos. En general, el cumplimiento de emisiones máximas anuales se debe verificar por medio de la aplicación de la metodología de balance de masa (ver Metodología de balance de masa en Informe complementario sobre la Norma Primaria de Calidad del Aire de Arsénico), mientras que los demás límites de emisión se deben cumplir de acuerdo a procedimientos de medición continua o discreta según los protocolos especificados en la norma y en los reglamentos emitidos por la SMA.

---

<sup>3</sup> En el contexto de la norma de emisión, fuente emisora es “toda fundición de cobre o cualquier otra fuente industrial emisora de As donde se realiza un tratamiento térmico de compuestos minerales o metalúrgicos de cobre y oro, cuyo contenido de As en la alimentación sea superior a 0,005% en peso en base mensual” (MMA, 2013a), por ejemplo, una planta de tostación.

## 2.1.2 Unión Europea y Caso de Alemania

### 2.1.2.1 Normativa existente a nivel de la Unión Europea

En la Unión Europea la regulación sobre arsénico no es específica a las fundiciones de cobre, probablemente porque la UE tiene actividades limitadas en este rubro<sup>4</sup> en su territorio. A nivel comunitario, existe la Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo (2010), sobre las emisiones industriales que abarca la producción y transformación de metales y las industrias minerales. En esta directiva, las fundiciones de cobre están comprendidas en las categorías “2.5. Transformación de metales no ferrosos”, y “3.4. Fundición de materiales minerales, incluida la fabricación de fibras minerales con una capacidad de fundición superior a 20 toneladas por día”, categorías que se detallan en el Anexo I de dicho documento. Esta norma establece que, para obtener el permiso de una instalación, los operadores de los Estados miembros de la UE deben respetar los valores límites de emisión fijados por esta regulación para todas las doce sustancias y/o grupos de sustancias contaminantes enumeradas en Anexo II para la atmósfera.

Es interesante notar que los valores límites indicados para dichas sustancias en esta regulación son específicos a las emisiones al aire por instalaciones de incineración y co-incineración de residuos (Anexo VI de esta directiva). Así, para esta categoría de instalaciones, los valores límites de emisión que se proporcionan son para un conjunto de metales pesados, del cual es parte el arsénico junto a otros contaminantes. Por ejemplo, en el caso de instalaciones de incineración, se proporciona un valor límite medio total correspondiente a 0,5 mg/Nm<sup>3</sup> para el arsénico, plomo, cromo, cobalto, cobre, manganeso, níquel, vanadio y sus compuestos respectivos, sustancias a ser medidas por separado a lo largo de un período de muestreo de un mínimo de 30 minutos y un máximo de 8 horas (Parte 3 de este mismo Anexo).

Lo anterior se presenta para una serie de contaminantes listados en la Tabla 2-3.

---

<sup>4</sup> En 2016, la Unión Europea (28) produjo 2,2 millones de toneladas de cobre refinado, lo que representa el 9,4% de la producción mundial (USGS, 2018). Debido a que el producto final mayormente fabricado es el cátodo obtenido electrolíticamente, la fundición se realiza frecuentemente en un segundo tiempo con el fin de producir palanquillas o lingotes.

**Tabla 2-3 Límite de emisión para instalaciones de incineración de residuos y las instalaciones de co-incineración de residuos, en la Unión Europea**

Contaminantes	Valor [mg/Nm <sup>3</sup> ]
Arsénico y sus compuestos	0,05
Cadmio y sus compuestos	
Talio y sus compuestos	
Mercurio y sus compuestos	
Antimonio y sus compuestos	
Plomo y sus compuestos	
Cromo y sus compuestos	
Cobalto y sus compuestos	
Cobre y sus compuestos	
Manganeso y sus compuestos	
Níquel y sus compuestos	
Vanadio y sus compuestos	

Fuente: (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2010)

### 2.1.2.2 Normativa específica a Alemania

En Alemania, desde el año 2002, el Gobierno Federal Alemán estableció las “Instrucciones Técnicas para Mantener el Aire Limpio” en el Primer Reglamento Administrativo General para la Ley Federal de Control de Inmisiones (Bundesrat, 2002), regulación que es más exigente y específica que lo existente a nivel de la UE en materia de emisiones de arsénico y otros contaminantes desde fundiciones. Estas instrucciones denominadas “TA Luft”<sup>5</sup> son un conjunto de disposiciones orientadas a reducir las emisiones e inmisiones de contaminantes del aire de instalaciones industriales que deben ser aprobadas bajo la ley alemana de control de inmisiones para poder operar, en las que se incluye el arsénico y otros contaminantes emitidos por fundiciones de cobre<sup>6</sup>.

En particular, al igual que una serie de otros contaminantes del aire, el arsénico y sus componentes inorgánicos, se encuentran regulados bajo valores límites de emisión establecidos para fundiciones de cobre, y de manera específica, para chimeneas de fundiciones, todos correspondientes a concentraciones máxicas máxicas admisibles. Además, en esta regulación, se describen los métodos de medición y cálculo de dispersión a utilizar para la estimación de las emisiones de los contaminantes.

En la última versión de esta regulación que entró en vigor en el país el 1 de diciembre de 2021 (Bundesrat, 2020), en el caso del arsénico, los valores límites de emisión para fundiciones de

<sup>5</sup> Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft).

<sup>6</sup> Ver la Sección 5.4.3.3.1 de esta regulación que es específica a las plantas para la producción de metales en bruto no ferrosos, con excepción de aluminio y ferroaleaciones, y la Sección 5.4.3.3.a dedicada al mismo tema en la nueva versión de estas instrucciones.

cobre son más exigentes que en la versión anterior, siendo fijados en  $0,05 \text{ mg/m}^3$  (excluyendo la arsina<sup>7</sup>) cuando antes el límite de emisión a no sobrepasar era tres a nueve veces más alto para estas instalaciones<sup>8</sup>.

Asimismo, en complemento de lo anterior, se regula la emisión de otros componentes emitidos por las plantas de fundición de cobre como  $\text{SO}_2$ , el polvo total, MP10,  $\text{NO}_2$  y Cd, Pb y Hg, en las fundiciones en su conjunto y/o en los gases de escape de las fundiciones. Por ejemplo, las emisiones de polvo total liberado mediante los gases de escape, no debiendo superar una concentración máscica de  $5 \text{ mg/m}^3$  (los valores para el polvo y otros contaminantes se detallan en la Tabla 2-13).

Además, el TA Luft especifica que la altura de las chimeneas de las instalaciones industriales debe determinarse de modo que la concentración de una serie de contaminantes emitidos por estas no supere el valor establecido por esta misma regulación. Por ejemplo, en el caso del arsénico, el valor correspondiente establecido es igual a  $0,00016 \text{ mg/m}^3$  (ver detalles en la Tabla 2-12).

Según lo establecido en la sección 2.7 de esta regulación sobre valores de emisión y límites de emisión, todos los valores límites deben especificarse en el aviso de aprobación de operar (o en solicitud de renovación) de la instalación con el fin de garantizar que, en el caso de mediciones individuales, se vele porque cada valor medido no exceda la concentración especificada, y en el caso de mediciones continuas, que todos los valores medios diarios no superen la concentración especificada y todos los valores medidos cada media hora no superen el doble de la concentración especificada.

Adicionalmente, esta regulación busca aplicar el principio de minimización de emisiones, mediante la implementación de las directrices de la UE sobre el intercambio de información en la materia entre los Estados Miembros para el uso de las Mejores Tecnologías Disponibles (BAT, por sus siglas en inglés) para la prevención y el control integrados de la contaminación.

### 2.1.1 China

Desde el año 2010, la regulación existente en China en la materia es la Norma de emisión de contaminantes para la industria del cobre, níquel y cobalto (MEP, 2010) que abarca las empresas de fundiciones de cobre operando en su territorio. Esta regulación fijó límites progresivos de emisión de una serie de contaminantes del aire liberados en la atmósfera por las empresas

---

<sup>7</sup> En este reglamento, a diferencia del arsénico y del resto de los componentes derivados de la misma sustancia, la arsina está clasificada en la categoría de las sustancias inorgánicas gaseosas de Clase I (Sección 5.2.4), para las cuales aplican límites específicos de emisión más permisivos que los componentes anteriores, a saber  $0,5 \text{ mg/m}^3$  y  $2,5 \text{ g/h}$ .

<sup>8</sup> En la versión anterior de estas instrucciones (Bundesrat, 2002), existía un valor límite de emisión de arsénico específico a hornos de ánodos de fundiciones de cobre que era igual a  $0,40 \text{ mg/m}^3$ . Este era significativamente menos exigente que el límite general que esta regulación indicaba para las fundiciones de cobre como categoría genérica ( $0,15 \text{ mg/m}^3$ ); esta diferenciación ya no existe en la versión actualizada de las instrucciones.

existentes de este rubro, entre los cuales está el arsénico y otros contaminantes como SO<sub>2</sub>, MP, Pb y Hg, entre otros.

Para las empresas existentes, en el primer año de implementación de esta regulación, se fijaron valores límites de emisión al aire de los distintos contaminantes regulados, que son menos exigentes que para el año subsiguiente. Por ejemplo, para el arsénico, la concentración límite correspondiente fue fijada en 0,5 mg/m<sup>3</sup>, y a partir del segundo año de implementación (año 2012) empezó a regir el valor máximo de 0,4 mg/m<sup>3</sup> para las instalaciones existentes (ver Tablas 4 y 5 de esta norma). En cambio, en el caso de las empresas nuevas del rubro, este último umbral entró en vigor desde la publicación de la norma (2010).

Además, en esta norma china se listan requisitos de monitoreo de contaminantes del aire con estándares de métodos específicos oficiales (Tabla 8 de la Sección 5.3 de esta regulación) que deben ser utilizados al momento de monitorear y controlar las concentraciones máscas de los gases de escape en las fundiciones. Por ejemplo, para la determinación de la concentración máscas de arsénico, se indica el método espectrofotométrico de dietilditiocarbamato de plata (referenciado “HJ 540-2009”), de manera provisional de acuerdo con lo indicado. La Tabla 2-4 presenta los valores límites para los contaminantes cuya emisión al aire de empresas productoras de cobre, se encuentra regulada.

**Tabla 2-4 Límites de emisión en empresas productoras industriales de cobre para otros contaminantes, en China**

Contaminante	Proceso regulado	Valor [mg/m <sup>3</sup> ]	
		Empresas existentes (2011)	Empresas nuevas y Empresas existentes desde 2012
<b>Arsénico (As)</b>	Proceso de fundición completo	0,5	0,4
<b>Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)</b>	Secado de material	800	400
	Recolección de humos	960	
	Otros procesos	900	
<b>MP</b>	Proceso de fundición completo	100	80
<b>Niebla de ácido sulfúrico</b>	Proceso de fundición completo	45	40
<b>Plomo (Pb)</b>	Proceso de fundición completo	0,7	0,7
<b>Fluoruro (F-)</b>	Proceso de fundición completo	9	3
<b>Mercurio (Hg)</b>	Proceso de fundición completo	0,012	0,012

Fuente: Elaboración propia en base a MEP (2010)

## 2.1.2 Estados Unidos

### 2.1.2.1 Regulación original y modificaciones posteriores en vigor

En la normativa estadounidense se identifican 8 fuentes de arsénico inorgánico asociadas a industrias<sup>9</sup>, de las cuales son parte las fundiciones de cobre. Todas estas fuentes hacen el objeto de algún tipo de regulación, en particular para las fundiciones de cobre se cuenta con una norma específica que busca regular las emisiones de As de estas fuentes (US-EPA, 1986).

También, adicional al arsénico, en el cuerpo normativo estadounidense, se cuenta con normativas que establecen límites de emisión de fundiciones de cobre para los siguientes contaminantes: antimonio, berilio, cadmio, cobalto, plomo, manganeso, mercurio, níquel y selenio, oficialmente clasificados como contaminantes atmosféricos peligrosos (HAP por sus siglas en inglés)<sup>10</sup>.

Adicionalmente, cabe destacar que Estados Unidos es un actor histórico en la industria de la fundición de cobre donde, en el marco del *Clean Air Act*<sup>11</sup>, la EPA promulgó un conjunto de normas (1986) regulando las emisiones de fuentes estacionarias de contaminantes atmosféricos peligrosos. Estas normas, denominadas Estándares Nacionales de Emisión de Contaminantes Atmosféricos Peligrosos (NESHAP por sus siglas en inglés), incluyeron 14 fundiciones primarias de cobre generadoras de emisiones de arsénico. En esta regulación "*National Emission Standard for Inorganic Arsenic Emissions From Primary Copper Smelters*" (US-EPA, 1986), las emisiones de arsénico se encuentran abarcadas en la Subparte O del Artículo 40 CFR 61, donde se definen

---

<sup>9</sup> Esto comprende las plantas manufactureras de vidrio: cuenta con estándares de emisión, plantas de plomo secundario (la incidencia anual y riesgos máximos son bajos para esta fuente bajo los niveles actuales de control. La EPA espera que los requerimientos por OSHA y SIP llevarán a reducciones en las emisiones, pero que no es necesario un control adicional), las máquinas procesadoras de algodón o cotton gins (se considera que estos no generan un riesgo para aquellos que viven relativamente cerca, ya que las concentraciones de arsénico bajan rápidamente con la distancia a la planta. La mayoría de las plantas están en zonas rurales. No se requiere control adicional al actual), las plantas de óxido de zinc (los requerimientos determinados por OSHA generarán reducciones importantes en las emisiones de las plantas, sin embargo, se considera que no hay riesgos significativos esperados y medidas adicionales provocarían que la planta con mayores emisiones cierre, por lo que no se requiere control adicional al actual), las plantas de producción de plomo primario (los requerimientos determinados por OSHA generarán reducciones importantes en las emisiones de las plantas. No se han identificado medidas adicionales que logran una mayor reducción de la emisión de arsénico en las plantas. No se requiere control adicional al actual), las plantas de producción de zinc primario (la incidencia anual y riesgos máximos son bajos para esta fuente bajo los niveles actuales de control. No se han identificado tecnologías que puedan reducir aún más las emisiones), y la manufactura química de arsénico (la incidencia anual y riesgos máximos son bajos para esta fuente bajo los niveles actuales de control. No se ha identificado tecnologías que puedan reducir aún más las emisiones).

<sup>10</sup> Los HAP (*hazardous air pollutants*, por sus siglas en inglés) son aquellos contaminantes presentes en el aire para los cuales se sabe o se sospecha que causan cáncer u otros efectos graves para la salud, como efectos reproductivos o defectos de nacimiento, o efectos ambientales adversos; desde el año 1980, el arsénico inorgánico fue clasificado en esta categoría por la EPA, en el artículo 112 del CAA (45 FR 37885) (US-EPA, 2013).

<sup>11</sup> El *Clean Air Act* (CAA, por sus siglas en inglés) (42 U.S.C. 7401 et seq.) es una ley federal integral que regula las emisiones al aire de fuentes fijas y móviles desde el año 1970.

requisitos para la operación para limitar esas emisiones en ciertas etapas del proceso de fundición, incluyendo la instalación de un dispositivo de control (ver descripción a continuación):

La norma sigue un enfoque de Mejores Tecnologías Disponibles (BAT, por sus siglas en inglés), pues desde el punto de vista del regulador, este enfoque es posible, disponible y económicamente accesible. Ante las observaciones respecto de los efectos que tendría esto en la innovación, el regulador destaca que la regulación es periódicamente revisada por lo que futuras innovaciones podrán ser incluidas (US-EPA, 1986). En particular el BAT considera la instalación de un sistema de campana secundaria ("*Secondary hood system*")<sup>12</sup>, equipo de captura y control de las emisiones del material particulado donde se encuentra el arsénico. La norma establece una descripción detallada de las características de diseño de sistema de control, así como las características operacionales requeridas para dar cumplimiento.

Respecto a los afectados por las disposiciones anteriores, se establece un criterio de entrada de acuerdo al promedio anual de la tasa de carga de arsénico, equivalente a 75 kg/h. Este promedio se estima considerando el contenido de arsénico en el cobre mate y cobre mate de plomo que se alimenta a los convertidores (US-EPA, 1986a, sec. 61.174).

Asimismo, la norma limita las emisiones del dispositivo de control secundario<sup>13</sup> a 11,6 miligramos de partículas por metro cúbico estándar seco de gas de escape (mg/Nm<sup>3</sup>). Se especifica que el cumplimiento del límite de emisión de material particulado se determinará utilizando el método de referencia 5 de la EPA, y que la tasa de carga de arsénico anual promedio a los convertidores se determinará utilizando el porcentaje de peso promedio mensual de arsénico en las materias primas y las tasas de carga (dicho porcentaje en peso de arsénico en las materias primas es a determinar utilizando el Método 108A). Además, se requiere presentar informes anuales de la tasa promedio de carga de arsénico inorgánico a los convertidores, así como informes trimestrales que comprueben el cumplimiento de la ley reportando el seguimiento de los flujos de aire en comparación con el caudal de referencia y niveles excesivos de opacidad (US-EPA, 1986a, sec. 61.177).

La norma de control de arsénico de fundiciones de cobre de 1986 se ve complementada por tres estándares adicionales:

- *Standards of Performance for Primary Copper Smelters* (US-EPA, 1976)
- *National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants (NESHAP) for Primary Copper Smelting* (US-EPA, 2002b)

---

<sup>12</sup> El equipo requerido se compone de un cerramiento de campana, una cortina de aire horizontal, ventiladores y equipo auxiliar.

<sup>13</sup> La norma se refiere a dispositivos de control para captura y recolección de las emisiones secundarias de los convertidores que son obligatorios de instalar en el marco de su cumplimiento. En particular, esta se refiere a sistemas de campana secundaria ("*secondary hood systems*"), y menciona explícitamente que los componentes principales de dichos dispositivos son una campana, una cortina de aire horizontal, ventiladores y equipos auxiliares.

- *National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants (NESHAP) for Primary Copper Smelting Area Sources - Subpart EEEEEEE (US-EPA, 2007)*

La primera de ellas (US-EPA, 1976) establece límites para las emisiones de MP de los secadores de 50 mg/Nm<sup>3</sup>, así como límites para el SO<sub>2</sub> emitido desde tostadores, hornos de fundición y convertidores, limitando el contenido de SO<sub>2</sub> en los gases a 0,065% del volumen de los gases emitidos. De la misma forma establece límites de opacidad (20%) para los secadores y plantas de ácido.

Por su parte, en el NESHAP de fundiciones primarias de cobre (US-EPA, 2002b) se establecen estándares específicos a cinco instalaciones donde se desarrollan las distintas etapas de la fundición del cobre (a saber, secadores de concentrado de cobre, hornos de fundición, plantas de limpieza de escorias, convertidores por lotes, y fuentes de polvo fugitivo asociadas con el manejo, transferencia y almacenamiento de concentrado de cobre, escoria, residuos y otros materiales sólidos que contienen cobre). Para varias de estas instalaciones, se especifican nuevos valores límites de emisiones de material particulado y nivel de opacidad, y buenas prácticas aplicables a todas las fundiciones de cobre primarias que cumplen con las dos condiciones siguientes: (1) ser una importante fuente de emisiones de HAP y (2) utilizar convertidores de cobre por lotes (*batch copper converters*)<sup>14</sup>.

En los documentos de información suplementaria de este NESHAP (US-EPA, 2002a) se reafirma la peligrosidad de la exposición al arsénico para las personas y se requiere explícitamente que las emisiones de arsénico inorgánico se minimicen en todo momento; no obstante, no se proporciona ningún cambio en el umbral de concentración másica específico a polvo, e indirectamente al arsénico, que se había establecido en la norma de 1986. Así en esta versión más reciente, se actualiza la definición de fundición primaria de cobre que ahora se refiere explícitamente a concentrados de cobre<sup>15</sup>. Asimismo, específicamente al arsénico, se establece como requisito la instalación y operación de las campanas secundarias de cortina de aire y el uso de prácticas de trabajo para asegurar la máxima captura de emisiones fugitivas en toda instalación donde la tasa de alimentación de arsénico del convertidor es de 75 kg/h o mayor, y en cualquier nueva fundición primaria de cobre.

Además, este NESHAP de 2002 agregó mayor exigencia en el desarrollo del plan de control de polvo fugitivo, exigiendo que este haya sido aprobado por el Estado con autoridad delegada para su aplicación, con el propósito de que el propietario u operador de la fundición cumpla en todo momento con dicho documento. En la misma línea, en su versión final, esta regulación incluye requisitos de mantenimiento adicionales como la reparación oportuna de convertidores y equipos de control de la contaminación que funcionan mal, así como revisiones menores a los

---

<sup>14</sup> Quedan exentas de esta norma las fundiciones de cobre que no utilizan convertidores por lotes.

<sup>15</sup> Una fundición primaria de cobre se define como cualquier instalación o proceso intermedio dedicado a la producción de cobre a partir de concentrados de mineral de sulfuro de cobre mediante el uso de técnicas pirometalúrgicas.

procedimientos utilizados para la inspección, el mantenimiento, la detección de fugas en filtros de mangas y acciones correctivas asociadas. Se mencionó también la posibilidad de establecer un límite operativo de alarma en los detectores de fugas de dichos filtros de mangas sin no obstante establecer ningún límite de emisión de posibles contaminantes liberados al aire por esos dispositivos. Finalmente, es interesante observar que, al momento de la publicación de esta actualización relativa a los NESHAP, se estimó que al implementarse por completo esta permitiría una reducción de las emisiones anuales de las HAP de fundiciones en su conjunto en aproximadamente un 23 por ciento a nivel nacional, o el equivalente de la evitación de 22 toneladas de HAP liberados a la atmósfera por año.

A su vez, el NESHAP de 2007 (US-EPA, 2007) incluye limitaciones de emisión de MP y estándares de prácticas laborales aplicables en el caso de los secadores de concentrado de cobre, y para instalaciones de fusión y conversión, de secado y molienda de mata, y de los sistemas de control de gases secundarios y unidades de refinación de ánodos. En particular, se establecen límites de emisión de MP en instalaciones existentes, diferenciados por fundiciones que utilizan o no convertidores por lote. Además, se definen límites específicos de emisión para nuevas fuentes, es decir, en este caso, las que fueron construidas o reconstruidas posteriormente al 6 de octubre 2006.

Primero, esta norma de 2007 define exigencias para **fuentes existentes que no usan convertidores de cobre por lotes**. En particular, esta establece que no se debe descargar a la atmósfera gases de escape de chimenea(s) u otros puntos de descarga que contengan MP10 en cantidades superiores a 41 kg/h (89,5 lb/hr), en un promedio de 24 horas. Esto aplica para secadores de concentrado de cobre, reactores de fusión, convertidores, plantas de secado y molienda de mata, sistemas de control de gases secundarios y unidades de refinación de ánodos. Para cumplir con esta exigencia, las fundiciones deben disponer de un sistema de captura que recolecte los gases y humos liberados durante la transferencia de materiales fundidos desde los reactores de fusión y convertidores, y unidades de refino de cobre blíster, que transporte los flujos de gases recolectados a dispositivos de control. Para ello, se debe realizar un monitoreo continuo desde la chimenea principal de la fundición, y permitir que se informe el MP recolectado como MP10 para cada período de 24 horas.

**Segundo, en fuentes existentes que usan convertidores por lotes**, la norma de 2007 establece que los secadores de concentrado de cobre no deben descargar a la atmósfera gases de escape que contengan MP en cantidades superiores a 50 mg/m<sup>3</sup> (0,022 gr/dscf). Asimismo, este mismo valor límite también se fija para emisiones de MP que ocurren durante la extracción de la mata o escoria de cobre de los reactores de fusión. Para cumplir con dicho valor límite, se debe instalar un sistema de captura que recolecte los gases y humos que se liberan al realizar esos procesos. En particular, la norma exige que la apertura del puerto de extracción, el lavado y el recipiente receptor (por ejemplo, cuchara, olla de escoria) de dicho sistema estén ubicados en el seno de la corriente de ventilación o adentro del área de influencia de esta, cuando fluya la mata de cobre o la escoria.

Además, de manera específica para los procesos de carga del concentrado, y de fusión en reactores (mata de cobre y escoria), se requiere el uso de equipos de control que son un sistema de control de MP y una planta de ácido sulfúrico. Además, entre dos periodos de carga del concentrado de cobre en los reactores, se debe redirigir los gases de escape generados en las unidades de fusión y conversión a precipitadores electrostáticos, depurador húmedo, o filtro de mangas, antes de su descarga a la atmósfera. En el caso de convertidores que no estén conectados con un sistema de limpieza de gases de control de MP ni con una planta de ácido sulfúrico, se tiene que instalar un sistema de captura secundario (*secondary hood system*) que recolecte los gases liberados durante todas las etapas de la conversión. El sistema de captura correspondiente debe usar campanas adicionales (por ejemplo, campanas secundarias deslizantes, campanas de cortina de aire) u otros dispositivos de captura (por ejemplo, sistemas de evacuación especiales). Solo en este último caso, la norma de 2007 establece un límite de emisión de MP para los sistemas de captura secundarios descritos antes, aplicable en fuentes existentes que realizan conversión por lotes, que es igual a  $46 \text{ mg/m}^3$  (0,02 gramos/dscf).

Si bien no se indica un período o frecuencia de pruebas para los límites establecidos en unidades que usan convertidores por lotes, se indica que se requiere realizar un monitoreo continuo de MP, y que, para cualquier superación de la norma, se debe presentar una notificación por escrito a la autoridad competente en la materia, incluyendo la causa probable y cualquier acción correctiva o medida preventiva tomada. Se debe enviar esta notificación dentro de los 14 días posteriores a la fecha en que ocurrió la superación del límite fijado por la norma. Además, en particular para el monitoreo del desempeño de los precipitadores electrostáticos, se debe usar un sistema de monitoreo continuo de opacidad (COMS, por sus siglas en inglés) que debe ser calibrado adecuadamente para permitir el reporte de la superación de 4% de opacidad en intervalos de 24 horas<sup>16</sup>. Por otro lado, para monitorear el desempeño de los filtros de mangas utilizados para cumplir los límites de emisiones de MP, se debe usar un sistema de detección de fugas en las mangas y/o filtros. Lo anterior se debe realizar mediante la operación continua de un sistema de detección de fugas que permite monitorear el rendimiento de este dispositivo. Si se detecta alguna fuga o falla, la norma exige que se tomen acciones correctivas dentro de las 24 horas siguiendo la detección de la fuga o falla.

**Tercero, en el caso de las fuentes nuevas**, la norma de 2007 establece que no se debe descargar a la atmósfera gases de escape que contengan MP total en cantidades superiores a 300 gramos por tonelada de concentrado de cobre cargado en una serie de equipos, en un promedio de 24 horas. Dichos equipos corresponden a cualquier combinación de chimeneas, salidas de gases u otras aperturas en hornos, reactores u otros tipos de procesos utilizados para la producción de cobre anódico a partir de concentrados de cobre mediante técnicas pirometalúrgicas. Estos incluyen, pero no se limitan a, secadores de concentrado de cobre, hornos flash y hornos de baño de fusión, convertidores, unidades combinadas de fusión y conversión, hornos de refinación de

---

<sup>16</sup> En un funcionamiento en régimen de la fundición, si el valor promedio medido durante 24 horas supera el valor de 15% de opacidad, se debe iniciar una investigación de los equipos clave en la materia, dentro de las 24 horas posteriores al primer descubrimiento del incidente de alta opacidad y, si es necesario, tomar medidas correctivas.

ánodo (incluidos los hornos shaft). Adicionalmente, las fuentes nuevas deben disponer de un sistema de captura que recolecte los gases y humos liberados durante la transferencia de materiales fundidos desde las unidades de fusión, conversión, y refinado, que transporte el gas recolectado a un filtro de mangas u otro dispositivo de control de MP. Para demostrar el cumplimiento con la norma, se debe además instalar, operar y mantener un sistema de monitoreo continuo de emisiones MP (*continuous emissions monitoring system*, CEMS, por sus siglas en inglés) para medir y registrar las concentraciones de MP, y controlar la carga de MP en los concentrados de cobre. Dicho monitoreo continuo de las emisiones de MP debe incluir la determinación y registro de valores para cada día, así como la carga de MP total por tonelada de concentrado que ingresa a la fundición. Para ello, cada MP CEMS utilizado debe cumplir con los requisitos establecidos en la presente norma, es decir ser conforme a la especificación de desempeño 11 de la EPA en 40 CFR parte 60, apéndice B (EPA Performance Specification 11 in 40 CFR part 60, appendix B), y los requisitos de garantía de calidad del Procedimiento 2 en 40 CFR parte 60, apéndice F (Procedure 2 in 40 CFR part 60, appendix F).

Los límites descritos anteriormente se resumen en la Tabla 2-5. Estos constituyen un avance en la regulación del MP de gases de escape de una serie de equipos utilizados durante el proceso de fundición de fuentes nuevas, incluida la conversión, mediante el establecimiento de un valor límite de emisión de MP diario (300 g/t de concentrado de cobre). Adicionalmente, esta norma se asocia a exigencias específicas de manejo de los gases de escape que son generados durante las etapas de secado del concentrado, fusión y conversión del cobre. Además, cabe destacar que esta regulación establece un límite adicional a lo existente para emisiones de MP de dispositivos de control secundarios de convertidores por lotes existentes (46 mg/m<sup>3</sup>), el cual es menos exigente que el valor establecido en la regulación de 1986 (11,6 mg/m<sup>3</sup>), sin embargo, en la norma de 2007 dicho límite aplica solo en el caso de un tipo específico de convertidor (equipos anteriores a 2006 sin conducto lateral para humos en forma de “U” y que no están asociados a un sistema de limpieza de gases que controle el MP ni a una planta de ácido sulfúrico). Las exigencias fijadas por esta norma vienen complementar el cuerpo normativo existente en la materia en EEUU, y se verán complementadas por la versión final de la modificación de la norma que está en curso de elaboración (esta se describe en la siguiente subsección 2.1.2.2).

**Tabla 2-5 Valores límites de emisión del NESHAP de 2007 de la US-EPA**

Parámetro	Valor límite de emisión	Unidad	Punto de medición o muestreo	Frecuencia de verificación y otras características de la medición
<b>MP10</b>	Fuentes existentes: 41 (89,5)	kg/h (lb/hr)	Gases de escape de chimeneas u otros puntos de descarga de secadores de concentrado de cobre, hornos/reactores de fusión, convertidores, plantas de secado y molienda de mate, sistemas de control de gases secundarios y unidades de refinación de ánodos	Monitoreo continuo Promedio de 24 horas  <u>Aplica solo para fuentes emisoras existentes que no usan convertidores de cobre por lotes</u>

Parámetro	Valor límite de emisión	Unidad	Punto de medición o muestreo	Frecuencia de verificación y otras características de la medición
MP	Fuentes existentes: 50 (0,022)	mg/m <sup>3</sup> (granos/dscf)	Gases de escape de secadores de concentrado de cobre	Monitoreo continuo  Aplica solo para <u>fuentes emisoras existentes que usan convertidores de cobre por lotes</u>
	Fuentes existentes: 50 (0,022)	mg/m <sup>3</sup> (granos/dscf)	Gases de escape de reactores de fusión	Monitoreo continuo  Aplica solo para <u>fuentes emisoras existentes que usan convertidores de cobre por lotes</u>
	Fuentes existentes: 46 (0,02)	mg/m <sup>3</sup> (granos/dscf)	<u>Gases de escape del sistema de captura secundario de convertidores por lotes sin conducto de humos lateral en forma de "U" y que no están asociados a un sistema de limpieza de gases que controle el MP ni a una planta de ácido sulfúrico.</u>	Monitoreo continuo  Exigencia de reporte de fugas o fallas dentro de las 24 horas siguiendo la detección.  Aplica solo para <u>fuentes emisoras existentes que usan convertidores por lotes sin conducto de humos lateral en forma de "U" y que no tienen un sistema de limpieza de gases que controle el MP ni a una planta de ácido sulfúrico.</u>  En el caso de este tipo de convertidores, el sistema de captura secundario es obligatorio y se debe componer de campanas adicionales (e.g. campanas secundarias deslizantes, campanas de cortina de aire) u otros dispositivos de captura.

Parámetro	Valor límite de emisión	Unidad	Punto de medición o muestreo	Frecuencia de verificación y otras características de la medición
	Fuentes nuevas: 300 (0,6)	g por tonelada de concentrado de cobre que ingresa al equipo (lbs/t)	Gases de escape de cualquier combinación de chimeneas, salidas de gases u otras aperturas en hornos, reactores u otros tipos de procesos utilizados para la producción de cobre anódico a partir de concentrados de cobre mediante técnicas pirometalúrgicas.  Incluyen secadores, hornos de fusión, convertidores, unidades combinadas de fusión y conversión, hornos de refinación de ánodo (entre otros equipos).	Monitoreo continuo, con registro diario (valores promedio de 24 horas)
<b>Opacidad</b>	Fuentes existentes: 4%	Sin unidad	Precipitadores electrostáticos de convertidores por lotes existentes	Monitoreo continuo de opacidad (COMS) Intervalos de 24 horas  Se utiliza para cumplir indirectamente con el valor límite de MP para convertidores por lotes. En un funcionamiento en régimen de la fundición, se debe realizar una investigación si se supera el 15% de opacidad en 24 horas.

Nota: La norma de 2007 define que las fuentes nuevas son las que fueron construidas o reconstruidas posteriormente al 6 de octubre 2006.

Fuente: Elaboración propia en base a (US-EPA, 2007)

### 2.1.2.2 Propuesta de modificación de la regulación actual

En el marco de la revisión periódica de los NESHAP, la US-EPA realizó una propuesta de modificación de la regulación sobre fundiciones primarias de cobre<sup>17</sup>, enmienda que está en curso de elaboración (US-EPA, 2022). Dicha propuesta tiene como base los resultados de las revisiones de riesgo residual y tecnológico<sup>18</sup> en fundiciones primarias de cobre y los resultados de la revisión de tecnología para áreas clasificadas como fuentes de fundiciones primarias de cobre, ambas realizadas por la US-EPA. En dicho documento, la US-EPA propone nuevos

<sup>17</sup> Propuesta de enmienda de los NESHAP (40 CFR Part 63), clasificada bajo la sigla "EPA-HQ-OAR-2020-0430; FRL-7522-01- OAR".

<sup>18</sup> *Residual Risk and Technology Review* (RTR, por sus siglas en inglés).

estándares de emisiones en estas fuentes<sup>19</sup>, con el fin de reducir las emisiones de metales HAP de las fundiciones primarias de cobre.

En complemento de lo anterior, se propone eliminar las exenciones de límite de emisión existentes para los períodos de encendido, apagado y mal funcionamiento de las fundiciones, y se impone que los estándares de emisión se apliquen en todo momento, lo que requiere un *reporting* específico, además de la realización de informes formales de los resultados de las pruebas de rendimiento, y la notificación de los informes de cumplimiento asociados.

Asimismo, como elemento central, lo que propone la US-EPA en este marco son nuevos estándares de emisiones para equipos y fundiciones de cobre afectas a los NESHAP, mediante la regulación de las emisiones de MP y de las partículas metálicas HAP que estas contienen, de diferentes instalaciones (principalmente, hornos de fundición, convertidores y hornos de refinación de ánodos).

La US-EPA también propone nuevos estándares de emisión para las emisiones de Hg de cualquier combinación de chimeneas de secadores, convertidores, hornos de refinación de ánodos y hornos de fundición.

En la Tabla 2-6, se presentan los nuevos límites propuestos mediante la revisión de los NESHAP de 2002 y del marco legal existente. Estos son de un nivel de exigencia mayor a la regulación estadounidense vigente, porque la mayoría son umbrales horarios, y son específicos a procesos y/o tecnologías y/o tipos de emisiones aún no reguladas (o no reguladas con la misma precisión) en las fundiciones de cobre del país.

Las modificaciones propuestas consisten en la regulación de las emisiones de fuentes puntuales de refinación de ánodos existentes y nuevas ubicadas en las fundiciones de cobre primario. Para lo anterior, se propone un límite de emisiones de MP de 5,8 mg/Nm<sup>3</sup>. Adicionalmente, se propone regular las emisiones fugitivas “de techo” (“fugitive roof vents”) mediante la inclusión de límites de emisión fugitivas de MP que contienen metales HAP, de los hornos de fundición, de convertidores y de hornos de refinación de ánodos ubicados. Para lo anterior, para las emisiones fugitivas, se propone un límite de emisiones de MP de 1,95 kg/h para hornos de fundición, de 0,77 kg/h para los convertidores, y de 0,73 kg/h para hornos de refinación de ánodos.

---

<sup>19</sup> De acuerdo con lo establecido en el CAA, la categoría de fuente principal de fundición primaria de cobre se definió como cualquier instalación de fuente principal dedicada al proceso pirometalúrgico utilizado para la extracción de cobre a partir de óxidos de azufre, concentrados de minerales nativos u otros minerales que contienen cobre. Como se definió originalmente, la categoría incluye, entre otras, las siguientes unidades de proceso de fundición: tostadores, hornos de fundición y convertidores. En la legislación en vigor a la fecha, las fuentes afectas al NESHAP como fuentes principales son los secadores de concentrado, hornos de fundición, recipientes de limpieza de escoria, convertidores y fuentes de emisiones fugitivas; la categoría de fuente de área NESHAP se agregó a la lista de categorías de fuente en 2002, la que abarca secadores de concentrado, recipientes de fundición como hornos, recipientes de conversión, plantas de secado y molienda de mata, sistemas de gas secundarios y operaciones de refinación de ánodos.

Además, estas instalaciones deberán monitorear varios parámetros de control de manera continua (por ejemplo, la velocidad del ventilador, el amperaje, las caídas de presión y/o el posicionamiento de la compuerta), para garantizar que el sistema de captura de fugas y los controles funcionen correctamente.

Asimismo, la propuesta de la US-EPA incluye un nuevo límite de emisión para reactores de fundiciones de cobre, que busca complementar el requisito actual del NESHAP mediante la inclusión de un límite de 14 gramos de MP10 por tonelada de concentrado de cobre que ingresa al reactor. Además, en esta propuesta, se reitera que se prohíbe el uso de convertidores de cobre por lotes, por lo que, de forma predeterminada, los nuevos convertidores de cobre cubiertos por NESHAP tendrían que ser convertidores continuos, o alguna otra tecnología de convertidor no por lotes, pero la regulación no incluye un estándar real para los nuevos convertidores.

Adicionalmente, se propone incluir un límite de emisión de Hg para fundiciones existentes igual a 0,002 kg/h, y de 0,0004 kg/h en las nuevas instalaciones.

Para todos esos límites propuestos, se propone que el cumplimiento se demuestre a través de una prueba de cumplimiento inicial seguida de una prueba de cumplimiento al menos una vez al año.

**Tabla 2-6 Valores límites de emisión disponibles en la propuesta de enmienda de la US-EPA**

Parámetro	Valor límite de emisión	Unidad	Punto de medición o muestreo	Frecuencia de verificación y otras características de la medición
<b>MP</b>	Fuentes existentes y nuevas: 5,8	mg/m <sup>3</sup> S	Fuentes puntuales de refinación de ánodos	Prueba de cumplimiento inicial Prueba de cumplimiento al menos 1 vez al año
	Fuentes existentes y nuevas: 1,95 (4,3)	kg/h (lbs/h)	Emisiones fugitivas de techos de hornos de fundición	Prueba de cumplimiento inicial Prueba de cumplimiento al menos 1 vez al año Valor promedio horario
	Fuentes existentes y nuevas: 0,77 (1,7)	kg/h (lbs/h)	Emisiones fugitivas de techos de convertidores	Prueba de cumplimiento inicial Prueba de cumplimiento al menos 1 vez al año Valor promedio horario
	Fuentes existentes y nuevas: 0,73 (1,6)	kg/h (lbs/h)	Emisiones fugitivas de techos de hornos de refinación de ánodos	Prueba de cumplimiento inicial Prueba de cumplimiento al menos 1 vez al año Valor promedio horario
<b>MP10</b>	Fuentes nuevas: 14 (0,031)	g/t (lbs/t) de concentrado de cobre que ingresa al reactor	Reactor de fusión (*)	Prueba de cumplimiento inicial Prueba de cumplimiento al menos 1 vez al año

Parámetro	Valor límite de emisión	Unidad	Punto de medición o muestreo	Frecuencia de verificación y otras características de la medición
Hg	Fuentes existentes: 0,002 (0,0043)	kg/h (lbs/h)	Emisiones en toda la instalación de la fundición (límite BTF) <sup>20</sup>	Prueba de cumplimiento inicial para cada uno de los equipos afectados dentro de los 3 primeros años (a partir de la entrada en vigencia)  Prueba de cumplimiento al menos 1 vez al año
	Fuentes nuevas: 0,0004 (0,00097)	kg/h (lbs/h)	Emisiones en toda la instalación de la fundición (límite MACT) <sup>21</sup>	Los propietarios u operadores deben cumplir con todos los requisitos, a más tardar en la fecha de vigencia de la enmienda final.

(\*) Los reactores de fusión corresponden a Convertidores Teniente (CT) y reactores Noranda.

Nota: En el caso de esta norma, las fuentes emisoras nuevas corresponden a fuentes cuya construcción o reconstrucción empezó después del 11/01/2022.

Fuente: Elaboración propia

### 2.1.3 Japón

En Japón no hay una ley específica que regule solamente las emisiones de fundiciones y tampoco hay un estándar para las emisiones de arsénico, pero sí hay un marco legal que regula las emisiones de todas las fuentes emisoras de varios contaminantes del aire, asociado a un marco legal de calidad de aire. Las bases de aquel marco se encuentran definidas en la Ley de Control de la Contaminación del Aire de Japón (Ministry of the Environment, 1968) que busca proteger la salud pública y preservar el medio ambiente de los daños causados por la contaminación del aire, mediante la regulación del hollín y humo. Lo anterior comprende, de acuerdo a la definición del artículo 2 de esta ley, SO<sub>x</sub>, polvo, Cd, Cl, HF, Pb, y otras sustancias que puedan dañar la salud humana o seres vivos, emitidos por diversas fuentes emisoras correspondientes a fuentes industriales y vehículos motorizados<sup>22</sup>. La ley requiere que el gabinete del primer ministro establezca estándares de emisión para cada tipo de emisión mediante la prescripción de límites máximos permisibles, para los contaminantes mencionados antes, y también para los compuestos orgánicos volátiles. Adicionalmente, en un capítulo sobre mercurio (Capítulo II-4),

<sup>20</sup> Los estándares “*beyond-the-floor*” (BTF) se conocen comúnmente como estándares más exigentes que el estándar correspondiente al grado máximo de reducción de emisiones de HAP alcanzable (MACT, por sus siglas en inglés).

<sup>21</sup> Para fuentes principales, el CAA establece que el NESHAP basado en tecnología debe reflejar el grado máximo de reducción de emisiones de HAP alcanzable (después de considerar el costo, los requisitos de energía y los impactos ambientales y de salud no relacionados con la calidad del aire). Estos estándares se conocen comúnmente como estándares MACT.

<sup>22</sup> Las fundiciones de metales entran en la categoría genérica de fuentes emisoras a las cuales se refiere esta regulación (“actividades comerciales de fábricas”), instalaciones para las cuales se encuentran regulados en el artículo 2 de esta misma ley los componentes generados por “la combustión de combustibles o similar” y “generados por el uso de electricidad como fuente de calor”, entre otros.

esta ley establece exigencias específicas que buscan permitir la implementación del Convenio de Minamata<sup>23</sup>.

Además, la ley requiere que, en áreas designadas por una orden del gabinete donde se estima que es difícil lograr los límites aplicables debido a una alta concentración de instalaciones industriales, la prefectura de dicha área formule un plan de reducción masiva de emisiones, con estándares más exigentes que lo existente a nivel nacional (Mackey, Hart, & Hart, 1993).

Asimismo, esta ley prevé que cada prefectura regule las concesiones otorgadas en el marco de la construcción e instalación de nuevas plantas, así como la modificación de instalaciones emisoras existentes. Para lo anterior, los solicitantes deben proporcionar ante la prefectura regional que les compete la información relativa a lo que se producirá en su instalación (artículo 6 de esta ley). Como consecuencia de esta regulación adaptada a nivel local, en Japón, todas las principales áreas industriales y ciudades están cubiertas por planes de reducción masiva de emisiones atmosféricas.

Adicionalmente, los límites de emisión a los cuales se refiere esta ley fueron establecidos desde 1971, y posteriormente actualizados a través del Reglamento para la aplicación de la Ley de control de la contaminación atmosférica en 1998 (MHLW & MLIT, 2017). En esta regulación, los valores límites de emisión y estándares de emisión total de SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub> en áreas de alto riesgo son la principal herramienta para regular la contaminación del aire de fuentes estacionarias (Botta & Yamasaki, 2020). Para ello, se proporcionan fórmulas para el cálculo de las emisiones totales de los contaminantes mencionados anteriormente, y concentraciones umbrales para esos contaminantes; en particular, para la determinación de los valores límites de emisión de SO<sub>x</sub>, se utilizan valores constantes K que dependen de la zona a la cual pertenece la planta (MoE, 1998c). Además, existe una lista de límites de emisiones para los demás contaminantes como hollín y polvo, NO<sub>x</sub>, Cd y Pb, de manera específica para ciertas instalaciones como las fundiciones, y para algunos procesos de la refinación del cobre, entre otros sectores (MoE, 1998a, 1998b), establecidos en el marco de la regulación sobre la contaminación del aire.

Por otra parte, cabe mencionar que en Japón se instauró desde el año 1964 el sistema único de “acuerdos de control de la contaminación” para remediar las deficiencias de la regulación considerada por la opinión pública como insuficiente para proteger el medio ambiente. Bajo este sistema, se pedía a una empresa que planeaba construir o ampliar sus instalaciones, que observara las normas que las autoridades gubernamentales locales competentes y la propia empresa habían acordado de antemano, en materia de control de las emisiones y otros aspectos ambientales. En los años noventa, este sistema pasó a ser ampliamente utilizado lo largo del

---

<sup>23</sup> Solo para el mercurio, se hace referencia a un marco de regulado oficial, el Convenio de Minamata (PNUMA, 2013), en el que las fundiciones de cobre se encuentran abarcadas en la categoría “Procesos de fundición y calcinación utilizados en la producción de metales no ferrosos” de la Lista de fuentes puntuales de emisiones de mercurio y compuestos de mercurio a la atmósfera del Anexo D.

país<sup>24</sup> ya que había demostrado su éxito en hacer frente a los problemas ambientales locales (OECD, 1999), incluido en fundiciones de metales<sup>25</sup>. Los límites de emisión que fueron establecidos en dichos acuerdos, y que por la mayoría son aún vigentes, suelen ser específicos a la zona y a la antigüedad de las instalaciones, donde los requisitos impuestos son más estrictos para las nuevas empresas que para las existentes (Botta & Yamasaki, 2020).

De forma adicional a este instrumento, existen en Japón los "planes de acción voluntarios", instrumento hoy en día ampliamente utilizado por las empresas japonesas a través de los cuales estas pueden también comprometerse en actuar en materia de contaminación del aire y otras temáticas ambientales (reducción de GEI, por ejemplo). En este marco, desde 1998, bajo el liderazgo de la Federación japonesa de Organizaciones Económicas *Keidanren*, 37 grupos industriales de diversos sectores incluyendo actores de la minería, producción de carbón, acero y aluminio, entre otros, cada uno representado por una asociación o federación comercial pertinente, adoptaron planes de este tipo (OECD, 1999). Por lo general, estos planes de acción voluntarios incluyen estándares de emisión y obligaciones relativas a las fuentes emisoras, para SO<sub>x</sub>, hollín y polvo, y NO<sub>x</sub>; además, no pueden incluir límites más permisivos que los estándares legales ya existentes.

Respecto a estos planes, la OCDE identificó que algunos solo definen límites de concentración de emisión de contaminantes, mientras que otros regulan también la cantidad total de contaminantes emitidos al año, a ser monitoreados de manera continua mediante sistemas de telémetro (OECD, 1999), y reportados en varios casos a las autoridades locales que son parte de los acuerdos.

Finalmente, la literatura indica que desde los años 2000, se aprecia que ciertos de los instrumentos voluntarios japoneses recomiendan la instalación de las mejores tecnologías de control de la contaminación (ej. sistemas de desulfuración y desnitrificación de gases de combustión, colector de polvo eléctrico) (OECD, 1999), solo de manera puntual. Sin embargo, tras la entrada en vigor del "Convenio de Minamata sobre el mercurio" en agosto de 2017, Japón modificó su ley de control de la contaminación del aire para establecer la obligación de considerar las mejores tecnologías disponibles para los estándares de emisión de nuevas instalaciones que emiten Hg en sectores seleccionados (MoE, 2016).

---

<sup>24</sup> En septiembre de 1996 habían más de 30.000 acuerdos vigentes de este tipo, y 768 en el sector de los metales no ferrosos solamente (OECD, 1999).

<sup>25</sup> Posteriormente denominados "acuerdos de conservación del medio ambiente", estos consisten en que las partes interesadas acuerden de exigencias que mejor se adapten a las condiciones de cada región y población, con en varios casos la participación del público general como parte interesada junto con las autoridades gubernamentales locales y a veces incluso sin la participación de las autoridades locales. Además, en su formato más avanzado, estos empezaron a incluir cláusulas que definen los deberes formales de las empresas en materia de protección del ambiente y sus responsabilidades en el control de la contaminación que generan (OECD, 1999).

#### 2.1.4 Canadá

En Canadá, existe desde el año 1979 la regulación sobre el aire limpio (*Clean Air Regulation*, RAA por sus siglas en francés) (Government of Quebec, 1979) elaborada en el marco de la Ley sobre la Calidad del Ambiente (*Environment Quality Act*, LQE por sus siglas en francés), cuyas últimas actualizaciones son del año 2021. En su versión actual, la RAA define normas de emisión aplicables durante el funcionamiento de una serie de instalaciones industriales<sup>26</sup> para distintos contaminantes del aire y parámetros.

Si bien esta norma no regula las emisiones de arsénico, sí establece límites de emisiones para otros contaminantes que pueden contener arsénico, así como otras exigencias relativas al arsénico. Además, la norma se basa sobre estándares de calidad del aire presentados en el Título IV y Anexo G y K, definidos para el arsénico y una serie de otros metales emitidos al aire.

Las exigencias en materia de emisiones se establecen en la Sección II de esta ley para determinadas instalaciones o actividades o determinados procesos industriales, como la “preparación, concentración, aglomeración o secado de mineral, concentrado de mineral” (numeral 12, artículo 10 de esta sección), categoría en la que entran las fundiciones de cobre.

Para todo tipo de instalación, incluidas las del numeral 12, se establece que no deben emitir ni tener el efecto de emitir a la atmósfera partículas en concentración superior a 30 mg/m<sup>3</sup>R de gas seco para cada uno de sus puntos de emisión. Además, en una sección dedicada a las plantas de producción de cobre primario y zinc en la que entran las fundiciones, se regula de manera específica ciertos contaminantes del aire. Así, se establece que dichas plantas no deben, a partir de la fecha prescrita para esa categoría, emitir a la atmósfera SO<sub>2</sub>, partículas y Hg en cantidades superiores a lo definido en los artículos 184, 185, 186 de la ley. Por ejemplo, para el SO<sub>2</sub> se establece que estas deben respetar concentraciones promedio en el aire iguales a 550 µg/m<sup>3</sup> en una hora, 288 µg/m<sup>3</sup> en 24 horas, y 52 µg/m<sup>3</sup> (Promedio anual basado en muestreo durante 1 hora), además de porcentajes máximos de azufre de entrada que son iguales a 10% para fábricas existentes y 5% para nuevas fábricas. Cabe señalar que existen exenciones de cumplimiento de los límites anteriores para las plantas construidas o puestas en funcionamiento antes del 30 de junio de 2011.

Además, se establecen disposiciones aplicables a las plantas de ácido sulfúrico utilizadas para reducir las emisiones de SO<sub>2</sub> a la atmósfera desde una planta de producción primaria de cobre. Adicionalmente, en los Anexos B y C de esta ley, se proporcionan distintos valores límites de emisión de partículas en función de la velocidad de alimentación del proceso para determinadas

---

<sup>26</sup> La norma indica que, salvo indicación contraria, estos límites no se aplican durante la puesta en marcha o parada de un dispositivo o proceso, sino solamente durante la fase de operación.

fuentes existentes instaladas o administradas<sup>27</sup>, entradas en operación antes del 14 de noviembre de 1979, o posteriormente a esa fecha, respectivamente, y lineamientos para los cálculos a realizar para el cumplimiento de los límites establecidos.

También, en el Anexo D, se proporciona la escala definida para medir la opacidad de emisiones gris o negras en la atmósfera, descrita en el artículo 16 donde se establece que no se debe superar el 20% en cada uno de sus puntos de emisión (ver detalles adicionales en la subsección 2.2). Los demás valores límites de emisión establecidos por esta ley se detallan en la Tabla 2-13.

Adicionalmente, el artículo 192 del RAA exige que las fundiciones de cobre comuniquen todos los años un informe que indique la cantidad total de concentrado de cada proveedor y de cualquier otro material introducido en el proceso, y el porcentaje en peso de arsénico, bismuto, antimonio, plomo, cadmio y contenido de mercurio del concentrado tratado. También, en los estándares de calidad del aire para metales y otros contaminantes (Anexos G y K de esta ley) que se buscan garantizar, se indica un valor límite para arsénico correspondiente a  $0,003 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y una concentración inicial de  $0,002 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , valores umbrales máximos para un año, y se proporcionan estándares de este tipo para otros contaminantes del aire.

Adicionalmente a la regulación sobre el aire limpio, existe la Ley Canadiense de Protección Ambiental (comúnmente denominada LCPE, por sus siglas en francés) (Government of Canada, 1999) que establece que el Ministerio de Medio Ambiente y el Ministerio de Salud canadienses comparten la responsabilidad de la identificación, evaluación y manejo de las sustancias tóxicas. Al ser reconocidas como tal, las sustancias se deben incluir en el Anexo 1 de la Lista de Sustancias Tóxicas de la LCPE (Government of Canada, 2021), lo que tiene implicancias directas en la aplicación de regulaciones sobre emisiones de dichas sustancias al aire.

Entre las sustancias clasificadas en esta lista, está el arsénico y los compuestos de arsénico inorgánico (numeral 28) para los cuales se reconoce que dicho(s) compuesto(s) entra(n) o puede(n) entrar al medio ambiente en una cantidad o concentración o en condiciones en las cuales tengan un efecto nocivo inmediato o a largo plazo sobre el medio ambiente o la diversidad biológica, y constituyan un peligro en Canadá para la vida o la salud humana.

Entre sus requerimientos, la LCPE prevé el establecimiento de objetivos y directrices de calidad ambiental y códigos de prácticas sobre emisiones y vertidos al ambiente. Es en el marco anterior que fue desarrollado el Código de prácticas medioambientales para fundiciones y refinerías de metales básicos (*Code de pratiques écologiques pour les fonderies et affinerías de métaux communs*) (Environment Canada, 2006). Este abarca las fundiciones de metales comunes como el cobre, pero también el plomo, zinc, níquel, además de las refinerías del mismo rubro. Su

---

<sup>27</sup> Aplica para las fuentes de “preparación, concentración, aglomeración o secado de mineral, concentrado de mineral” (correspondiente al numeral 12 del artículo 10 de la Sección II de la ley), categoría en la que entran las fundiciones de cobre y para todas las otras fuentes abarcadas por esta ley, a excepción de las instalaciones de la siderurgia, la industria de la madera y las plantas de producción de ferroalaciones.

objetivo es recomendar buenas prácticas, de manera exigible en el caso de nuevas instalaciones, y bajo un formato de mejora continua en el caso de instalaciones existentes.

Si bien este Código no es vinculante para empresas o establecimientos, en este se indica que uno de sus posibles usos es la aplicación de algunas o todas las recomendaciones como requisitos reglamentarios a nivel federal, provincial, territorial, municipal e indígena. Es importante señalar que este tiene un enfoque integral en el sentido que no solo entrega recomendaciones y exigencias en materia de emisiones atmosféricas, sino que rige otros tipos de emisiones y aspectos ambientales.

Un elemento importante de este Código es que establece que cada instalación debe desarrollar e implementar un Plan de Gestión Ambiental (EMP) específico de la instalación que debe incluir, además de la información de la empresa y el establecimiento (i), lo relativo a sistemas de gestión de la calidad del aire (iv), planificación de la prevención de la contaminación (viii), sistemas de gestión ambiental y auditorías (x), y revisión periódica del Plan de Gestión Ambiental (PGA) para su eficiencia y mejora continua (xiii), entre otros aspectos.

Para la regulación de emisiones atmosféricas, el Código se basa en estándares de calidad del aire, y recomienda un valor límite para partículas totales emitidas en la salida del sistema de reducción muestra, correspondiente a menos de 50 mg/Nm<sup>3</sup>, indicando que todas las instalaciones deben diseñarse y operarse para cumplir con este límite.

Asimismo, el Código alienta a la implementación de medidas para reducir las emisiones de SO<sub>2</sub> (4.2.4 Pautas de fijación de azufre), con el objetivo de lograr una tasa mínima de fijación de azufre igual a 90%, y que cada nueva fundición debe diseñarse y operarse para lograr una tasa mínima de fijación de azufre del 99% en el caso de cobre.

Además, en el caso del mercurio (Hg) se proporciona un límite de contenido de este contaminante en el producto final obtenido de la fundición, igual a menos de 1 gramo de mercurio por tonelada de producción de cobre terminado para cada planta nueva o ampliada. Si bien este límite no es de emisión, es un requerimiento que obliga la fundición a reducir la cantidad de mercurio en el cobre que produce, de manera indirecta, esto ayuda a limitar las emisiones de mercurio de diferentes etapas de la fundición.

También, para la limitación de las emisiones de arsénico y de cadmio, plomo, níquel, mercurio y otros metales de interés, este Código establece que cada instalación debe fijarse objetivos y cronogramas de reducción de emisiones, teniendo en cuenta los objetivos de reducción de dióxido de azufre y el material particulado, así como las opciones de prevención y control de la contaminación, desempeño relacionado con varias cargas, métodos de fundición y sistemas de control de la contaminación.

Consiguiente a lo anterior, en abril de 2006, el Ministerio de Medio Ambiente canadiense publicó en *Canada Gazette* un aviso que exigía la preparación y ejecución de planes de prevención de la

contaminación con respecto a ciertas sustancias tóxicas emitidas por fundiciones de metales básicos, refinerías y plantas de zinc (Environment Canada, 2015). Dicho aviso fue dirigido a once instalaciones ubicadas en Columbia Británica, Manitoba, Ontario, Quebec y New Brunswick y requería el cumplimiento de todas las recomendaciones del Código descrito anteriormente. Esto implicó que las instalaciones debiesen informar anualmente sobre su cumplimiento de las recomendaciones del Código, y rellenar el formulario de conformidad<sup>28</sup> con dicho código para declarar sus niveles de emisiones de contaminantes del aire, incluido el arsénico.

Así, el Informe de progreso de 2015 (Environment Canada, 2015) sobre la “Planificación para la prevención de la contaminación procedente de fundiciones, refinerías y plantas de zinc de metales comunes” proporciona una descripción general de los avances realizados en la materia, con miras al cumplimiento de las metas de emisión de SO<sub>2</sub>, material particulado, mercurio y las dioxinas y furanos. El informe describe cómo las instalaciones implementaron sus planes de prevención de la contaminación y si bien los planes debían estar completamente implementados para el 31 de diciembre de 2015, a tres de las once instalaciones sujetas a la notificación se les otorgó una extensión hasta el 31 de diciembre de 2018, para implementar plenamente sus planes de prevención de la contaminación.

Además, en Canadá, para las instalaciones industriales anteriores a la RAA, aplica el Programa de Reducción de Residuos Industriales (PRRI) adoptado por el gobierno de Quebec en 1988, que consiste en una estrategia de intervención para la reducción de los vertidos de contaminantes en el ambiente que tienen un impacto significativo. En el país, solo la fundición de cobre de Rouyn-Noranda ubicada en Quebec está cubierta por el PRRI, junto a fuentes emisoras de otros rubros. Aproximadamente el 11% de los concentrados y materiales que esta fundición procesa provienen de la región de Abitibi y noroeste de Ontario, mientras que el resto proviene de más de 200 clientes en el mundo (MDDELCC, 2018), por lo que los materiales tratados contienen proporciones variables de impurezas.

El PRRI mencionado anteriormente se hace operativo mediante el uso del denominado certificado de saneamiento (“*Attestation d’assainissement*”) que es específico a la operación de un establecimiento industrial, a diferencia de otras herramientas legales como el certificado de autorización emitido en virtud de la LQE que es previo a la realización de un proyecto<sup>29</sup>. Dicho certificado de saneamiento es renovable cada cinco años, y constituye un permiso de operación que describe las condiciones de funcionamiento del establecimiento, en el que el manejo de las emisiones atmosféricas es un elemento central.

---

<sup>28</sup> Este formulario corresponde al Anexo B de este Código (“*Fiche de renseignements sur la conformité au code de pratiques écologiques pour les fonderies et affinerías de métaux communs*”).

<sup>29</sup> Dicho certificado de saneamiento se basa en dos tipos de herramientas legales, respectivamente la LQE, sección IV.2 introducida en 1988 que incluye los establecimientos industriales, y el Reglamento sobre certificados de saneamiento industrial (RAAMI) adoptado en 1993 y modificado en 2013.

La segunda versión de este, denominada “segundo certificado de saneamiento”, debe enfatizar la reducción de las emisiones fugitivas de arsénico al aire. Para ello, el documento oficial de Orientación y referencias técnicas para el segundo certificado de saneamiento (“*Orientations et références techniques pour la deuxième attestation d’assainissement*”) (MDDELCC, 2018) define que esto comprende la aplicación adecuada de las normas y seguimiento de la RAA (1), el llevar a cabo el segundo plan de acción para reducir las concentraciones de arsénico en el aire (2), y el desarrollo de un tercer plan de acción (3). Por ende, dicho certificado debe enumerar todos los puntos de descarga a la atmósfera de uno o más contaminantes producidos o emitidos por un proceso o por cualquier equipo, especificar las emisiones al aire según criterios específicos, incluir valores límites de emisiones, así como requisitos de monitoreo y de reporte de estas emisiones, todos basados en la aplicación de las normas de emisión de la RAA.

Además, en el documento de Orientación para el segundo certificado (MDDELCC, 2018), se establecen estándares de emisión de arsénico en el aire, donde el primer umbral definido correspondía al promedio de 200 ng/m<sup>3</sup> al año<sup>30</sup> para el año 2010, y el segundo umbral a ser cumplido años después a 100 ng/m<sup>3</sup> al año (ver detalles en la Sección 2.2.4). Finalmente, los requisitos para monitorear el arsénico en el aire ambiente, los cálculos para evaluar el cumplimiento de la norma y de los estándares de calidad del aire se presentan en la Sección 8 sobre “Medios receptores” de este documento de Orientación (MDDELCC, 2018).

### 2.1.5 Zambia

Se examinó la regulación existente en Zambia, actor relevante en la extracción y fundición de cobre a nivel mundial, el “*Air Pollution Control (Licensing and Emission Standards) Regulations*” (Environmental Council of Zambia, 1997).

En el caso de Zambia, el valor límite establecido para arsénico contenido en emisiones de polvo provenientes de la producción del cobre es igual a 0,5 mg/Nm<sup>3</sup>, es decir igual a lo establecido en 1998 por la recomendación del Banco Mundial (1998). En esta regulación, se indica que deben realizarse reportes mensuales de emisiones, sin especificar la frecuencia de las mediciones<sup>31</sup>. Cabe destacar que, si bien este valor aplica para todo tipo de instalación que es parte de la producción de cobre, en el caso de las fundiciones de cobre, solo se regula directamente el SO<sub>2</sub> y el polvo. Por efecto de consecuencia, el arsénico se encuentra regulado a través de la regulación del polvo dado que se impone un valor límite de emisión de arsénico en el polvo (*dust*)

---

<sup>30</sup> La fundición se comprometió en su Plan de acción revisado (Reducción de las concentraciones de arsénico en el aire ambiente) en 2006 a cumplir con dicho estándar para una de sus estaciones de medición para el año 2010. Además, esta se comprometió a verificar el cumplimiento con aquel límite en una segunda estación de medición, posteriormente a la emisión de su segundo certificado de saneamiento.

<sup>31</sup> En el caso de esta regulación, se indica que los parámetros de la medición de los contaminantes del aire como el arsénico pueden ser definidos por la Inspección a cargo de otorgar y renovar las licencias y permisos de operar y/o de emitir contaminantes al aire.

proveniente de la producción de cobre, y que se establece un valor límite de emisión de polvo (*dust*) en fundiciones y convertidores de cobre.

Adicionalmente, esta regulación establece diferentes valores de tarifas para cuatro clases de contaminadores definidos según su intensidad de contaminación, a ser canceladas al momento de obtener o renovar un permiso o licencia de emisión de contaminantes atmosféricos, en el caso de instalaciones nuevas, existentes y ampliaciones de instalaciones existentes. La Tabla 2-7 presenta los límites de emisión para todos los contaminantes normados en relación a la producción de cobre. En esta normativa no se identifica ninguna fuente adicional de emisión de arsénico al aire.

**Tabla 2-7 Límites de emisión para todos los contaminantes normados en relación a la producción de cobre en la regulación zambiana**

Fuente de la producción de cobre	Contaminante	Valor límite [mg/Nm <sup>3</sup> ]
Fundiciones y convertidores	SO <sub>2</sub>	1.000
	Polvo (1)	50
Contenido de metales pesados en polvo	As	0,5
	Cd	0,05
	Pb	0,2
	Hg	0,05

(1) Se mantiene el término de acuerdo a lo presentado en el documento original, sin embargo, se puede entender como material particulado.

Fuente: (Environmental Council of Zambia, 1997)

## 2.2 Análisis comparativo de normas de emisión

En esta sección, se proporciona un análisis comparativo de las normas de emisión del arsénico y de otros contaminantes encontradas en las regulaciones de Chile y otros países presentadas en la sección anterior, para fundiciones de cobre y otras fuentes emisoras cuando aplica.

### 2.2.1 Comparación de las normas de emisión de los países seleccionados

A continuación, se proporciona una comparación de los valores límites establecidos por normas nacionales e internacionales de emisión de arsénico y otros contaminantes para fundiciones de cobre. También, se proporcionan límites de emisiones de arsénico de otras fuentes emisoras diferentes a las fundiciones, como los secadores y las plantas de tostación, donde se realizan etapas previas a la fundición cuyo fin es preparar los concentrados de cobre (ver detalles en la Sección 3.1.2.1).

Las principales normativas recopiladas en materia de emisiones de arsénico y/o de otros contaminantes de fundiciones de cobre se presentan en la Tabla 2-8, donde las normas que proporcionan límites de emisión para el arsénico se indican por un asterisco (\*). Además de regular de manera específica las fundiciones o de tenerlas cubiertas, varias de las normas presentadas en esta tabla regulan las emisiones de arsénico de otros tipos de fuentes emisoras

diferentes a las fundiciones. Cabe destacar que, entre estas normativas, solo la regulación chilena y el estándar estadounidense de 1986 tienen como foco principal el arsénico emitido por fundiciones.

La norma marco más reciente en materia de regulación de las emisiones de arsénico es la de Chile de 2013, junto a la regulación alemana que está en curso de actualización y cuya última versión vigente es del año 2020. Si bien las normas de Chile, Alemania, China, EEUU y Zambia regulan las emisiones de arsénico de fundiciones de cobre, las normas y/o estándares de emisión que son específicos a estas instalaciones (incluyendo, en ciertos casos, otros metales) son solo las de Chile, China y EEUU.

A su vez, las normas de Alemania y Zambia son normativas cuyo enfoque general es la regulación de la calidad del aire. Además, en esta última categoría, también se encuentran las normas de Japón y Canadá enfocadas en la calidad del aire y el control de la contaminación del aire. Cabe destacar que en ambos países no se proporcionan valores límites de emisión de arsénico en estas normativas marco, pero sí estas dan pie a que existan regímenes especiales de regulación establecidos a la medida para ciertas instalaciones; en dichos casos sí puede haber regulación de las emisiones de arsénico. Además, estas reconocen el arsénico como un compuesto tóxico a ser regulado en la emisión de fuentes industriales como las fundiciones, y en ciertos casos establecen ciertos requerimientos al respecto, como el RAA que exige que las fundiciones de cobre comuniquen todos los años un informe que indique la cantidad total de concentrado de cada proveedor y de cualquier otro material introducido en el proceso, y el porcentaje en peso de arsénico, y otros metales pesados contenidos en el concentrado tratado (ver más detalles en la Sección 2.1.2 y 2.1.4).

**Tabla 2-8 Normativas nacionales e internacionales recopiladas en materia de emisiones de arsénico y/o de otros contaminantes de fundiciones de cobre**

País	Nombre oficial de la regulación	Referencia (Autor y Año de promulgación)
Chile (*)	D.S. 28/2013 Norma de emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico establecida	(MMA, 2013a)
Alemania (*)	Technical Instructions on Air Quality Control (TA Luft)	(Bundesrat, 2002), (Bundesrat, 2020) (**)
China (*)	Norma de emisión de contaminantes para la industria del cobre, níquel y cobalto	(MEP, 2010)

País	Nombre oficial de la regulación	Referencia (Autor y Año de promulgación)
<b>Estados Unidos (*)</b>	1. <i>National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants; Standards for Inorganic Arsenic</i> 2. <i>Standards of Performance for Primary Copper Smelters</i> 3. <i>National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants (NESHAP) for Primary Copper Smelting</i> 4. <i>National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants (NESHAP) for Primary Copper Smelting Area Sources - Subpart EEEEE</i> 5. <i>Revisión de los NESHAP (40 CFR Part 63) y propuesta de enmienda asociada, clasificada bajo la sigla "EPA-HQ-OAR-2020-0430; FRL-7522-01- OAR", en curso de elaboración (consulta pública hasta el 25/02/2022).</i>	1. (US-EPA, 1986) 2. (US-EPA, 1976) 3. (US-EPA, 2002b) 4. (US-EPA, 2007) 5. (US-EPA, 2022).
<b>Japón</b>	1. Ley de Control de la Contaminación del Aire 2. Reglamento para la aplicación de la Ley de control de la contaminación atmosférica 3. <i>"Regulatory Measures against Air Pollutants Emitted from Factories and Business Sites and the Outline of Regulation"</i> y <i>"Regulatory Measures against Air Pollutants Emitted from Factories and Business Sites and the Outline of Regulation - Emission Standards for Toxic Substances"</i>	1. (Ministry of the Environment, 1968) 2. (MHLW & MLIT, 2017) 3. (MoE, 1998a) y (MoE, 1998b)
<b>Canadá</b>	1. <i>Clean Air Regulation</i> (RAA por sus siglas en francés) 2a. Ley Canadiense de Protección Ambiental (comúnmente denominada LCPE, por sus siglas en francés) 2b. Lista de Sustancias Tóxicas de la LCPE (Anexo 1)  Guías: 3. Código de prácticas medioambientales para fundiciones y refineras de metales básicos ( <i>"Code de pratiques écologiques pour les fonderies et affineries de métaux communs"</i> ) 4. Orientación y referencias técnicas para el segundo certificado de saneamiento ( <i>"Orientations et références techniques pour la deuxième attestation d'assainissement"</i> )	1. (Government of Quebec, 1979) 2a. (Government of Canada, 1999) 2b. (Government of Canada, 2021) 3. (Environment Canada, 2006) 4. (MDDELCC, 2018)
<b>Zambia (*)</b>	Air Pollution Control (Licensing and Emission Standards) Regulations. Third Schedule (Regulation 4) Cap. 204, Sections 37, 46 and 96)	(Environmental Council of Zambia, 1997)

(\*) Regulan el arsénico emitido por fundiciones de cobre.

(\*\*) Versión actualizada de la regulación alemana.

Nota: En Japón y Canadá, la norma no regula las emisiones de arsénico de fundiciones de cobre, pero sí regula otros contaminantes de las fundiciones de cobre y otras fuentes emisoras.

Fuente: Elaboración propia

A continuación (Tabla 2-9), se proporcionan detalles relativos a las fuentes reguladas y definiciones relativas a la fuente emisora cuando están disponibles en las normas revisadas que son específicas a emisiones de arsénico y/o de otros contaminantes de fundiciones de cobre, presentadas en la tabla anterior.

Tal como fue explicado anteriormente, todas estas normas abarcan las fundiciones de cobre, y algunas tratan también de otras fuentes emisoras de arsénico como las que son parte de la

preparación del concentrado de cobre antes del proceso de fundición *sensu stricto* (por ejemplo, plantas de tostación y secadores). Lo anterior se indica en la siguiente tabla, y, a título informativo, se menciona también si las normas recopiladas regulan fundiciones de otros metales que el cobre y/u otros tipos de instalaciones industriales. Como producto de la revisión de estas normas, se puede apreciar que, a pesar de incluir otras fuentes emisoras, solo los cuerpos normativos de Chile y EEUU son directamente y principalmente enfocados en las fundiciones de cobre. En ambos casos se regulan de manera específica los procesos desarrollados en dichas instalaciones, por ejemplo, principalmente las emisiones de chimeneas de secadores, hornos de distintos tipos, plantas de ácido, y plantas de limpieza de escorias. Por su parte, si bien la normativa china también regula dichos procesos, esta es más amplia que las de Chile y EEUU porque no regula solo las emisiones atmosféricas (incluye también las emisiones al agua) y está dirigida tanto a la industria del cobre como a la del níquel y cobalto.

**Tabla 2-9 Detalles relativos a fundiciones y otras fuentes reguladas en las normativas recopiladas en materia de emisiones de arsénico y/o de otros contaminantes de fundiciones de cobre y su categoría**

País	Detalles relativos a fundiciones	Otras fuentes reguladas
Chile	Fundiciones de cobre en su conjunto, donde se realiza un tratamiento térmico de compuestos minerales o metalúrgicos de cobre y oro, cuyo contenido de As en la alimentación sea superior a 0,005% en peso base mensual. De manera específica: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chimeneas de hornos de limpieza de escorias</li> <li>• Chimeneas de plantas de ácido</li> <li>• Chimeneas hornos de refinó</li> </ul>	Chimeneas de secadores de concentrado de cobre  Además: Chimeneas de otras fuentes industriales emisoras de arsénico existentes donde se realiza un tratamiento térmico de compuestos minerales o metalúrgicos de cobre y oro, cuyo contenido de As en la alimentación sea superior a 0,005% en peso en base mensual.

País	Detalles relativos a fundiciones	Otras fuentes reguladas
<b>Alemania</b>	<p>Chimeneas de fundiciones de cobre, abarcadas en la Sección 5.5 de la norma (5.4.3 en su versión anterior).</p> <p>Fundiciones de cobre, abarcadas en las Secciones 5.4.3.3a, 5.4.3.4.1a/2a, 5.4.3.7/8, 5.4.3.8, y Tabla 21 de la norma (Sección 5.4.3.3.1 en su versión anterior).</p>	<p>Secadores y tostadores de cobre</p> <p>Además:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Generación de calor, minería, energía Piedras y tierra, vidrio, cerámica (5.4.1 en la versión actualizada de la regulación), materiales de construcción (5.4.2);</li> <li>• Acero, hierro y otros metales, incluido el procesamiento (5.4.3);</li> <li>• Productos químicos, farmacéuticos, refino de aceite mineral y procesamiento (5.4.4);</li> <li>• Tratamiento superficial con sustancias orgánicas, producción de materiales en forma de láminas de plástico, otro procesamiento de Resinas y plásticos (5.4.5);</li> <li>• Madera, pulpa (5.4.6);</li> <li>• Alimentos, bebidas y piensos, productos agrícolas (5.4.7);</li> <li>• Reciclaje y eliminación de desechos y otros materiales (5.4.8);</li> <li>• Almacenamiento, carga y descarga de sustancias y mezclas (5.4.9);</li> <li>• Otro (5.4.10).</li> </ul>
<b>China</b>	<p>La norma se refiere a las empresas operadoras de la industria del cobre, el proceso de fundición de cobre está explícitamente mencionado, así como partes del proceso (e.g. dispositivos de control).</p>	<p>Secadores de concentrado de cobre</p> <p>Además: Empresas de la industria del níquel y cobalto (fundiciones).</p>
<b>Estados Unidos</b>	<p>Fundiciones primarias de cobre.</p> <p>La norma final establece estándares para:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hornos de fundición</li> <li>• Plantas de limpieza de escorias</li> <li>• Convertidores (solo para convertidores por lotes en la norma de 2002, y para todo tipo de convertidores en 2007)</li> <li>• Fuentes de polvo fugitivo asociadas con el manejo, transferencia y almacenamiento de concentrado de cobre, escoria, residuos, escoria, espesas y otros materiales sólidos que contienen cobre (2002 y 2007);</li> <li>• Plantas de ácido.</li> </ul>	<p>Secadores de concentrado de cobre (2002, 2007), tostadores de cobre (1976)</p> <p>Además:</p> <p>Existen otras NESHAP asociadas a emisión de arsénico inorgánico, incluyendo: plantas manufactureras de vidrio; plantas de recuperación de trióxido de arsénico y plantas de arsénico metálico</p>

País	Detalles relativos a fundiciones	Otras fuentes reguladas
<b>Japón</b>	Fundición de cobre en su conjunto. De manera específica: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Horno de fundición</li> <li>• Convertidor</li> <li>• Alto horno para refinar cobre</li> </ul>	Hornos de secado y Hornos de tostación de la industria del cobre  Además: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Horno de calcinación</li> <li>• Horno de secado para refinar plomo o zinc</li> <li>• Horno de sinterización y alto horno para refinar plomo o zinc</li> <li>• Combustión de combustibles y minerales en calderas e incineradoras de desechos</li> <li>• Combustión o tratamiento químico en instalaciones de reacción de productos químicos o un incinerador de desechos</li> </ul>
<b>Canadá</b>	Fundiciones y refinerías de metales comunes “Plantas de producción de cobre primario y zinc” (RAA)	Instalaciones de “preparación, concentración, aglomeración o secado de mineral, concentrado de mineral” (RAA)  Además: Fuentes industriales específicas de contaminación: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fundiciones de aluminio</li> <li>• Plantas de cemento</li> <li>• Acerías</li> <li>• Industria de la madera</li> <li>• Industria del amianto</li> <li>• Industria de plomo</li> <li>• Refinerías de petróleo y plantas petroquímicas</li> <li>• Tratamiento de superficies metálicas</li> <li>• Plantas de concentrado de mineral de hierro</li> <li>• Plantas de ferroaleaciones</li> </ul> Y otras fuentes emisoras industriales y no industriales (ej. Plantas de incineración, Motores de combustión interna estacionarios, Plantas de combustión, Plantas de producción o mezcla de fertilizantes, Molinos harineros u otras instalaciones de procesamiento de granos, Actividades de limpieza en seco, entre otras)
<b>Zambia</b>	Fundiciones de cobre en su conjunto. De manera específica: Convertidores de cobre y otras instalaciones utilizadas en la producción de cobre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Producción de cemento y cal</li> <li>• Producción de ácido nítrico y ácido sulfúrico</li> <li>• Producción de fertilizantes</li> <li>• Unidades de combustión</li> </ul>

Nota: En el caso de Chile, en el D.S. 28/2013 del MMA, se define como fuente emisora toda fundición de cobre o cualquier otra fuente industrial emisora de As donde se realiza un tratamiento térmico de compuestos minerales o metalúrgicos de cobre y oro, cuyo contenido de As en la alimentación sea superior a 0,005% en peso en base mensual.

Fuente: Elaboración propia

### 2.2.2 Definiciones relativas a fuentes emisoras y/o de interés en la materia

Además, en las normas recopiladas se encontraron las definiciones siguientes que son relativas a las fuentes emisoras o que son de interés en materia de fuentes de emisión de arsénico (Tabla 2-10).

**Tabla 2-10 Definiciones relativas a fuentes emisoras y/o de interés en la materia encontradas en las normas de emisión recopiladas**

País	Enfoque de la norma	Definiciones relativas a fuentes emisoras y/o de interés
<b>Chile</b>	Enfoque hacia la fuente emisora. Noción de fuente existente y nueva.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuente emisora: Toda fundición de cobre o cualquier otra fuente industrial emisora de As donde se realiza un tratamiento térmico de compuestos minerales o metalúrgicos de cobre y oro, cuyo contenido de As en la alimentación sea superior a 0,005% en peso en base mensual.</li> <li>• Fuente emisora existente: Corresponde a las fundiciones Altonorte, Caletones, Chagres, Chuquicamata, Hernán Videla Lira, Potrerillos y Ventanas, y a toda otra fuente industrial emisora de arsénico que hubiere obtenido una resolución de calificación ambiental favorable con anterioridad a la publicación de esta norma en el Diario Oficial.</li> <li>• Fuente emisora nueva: Fuente emisora que ha obtenido su resolución de calificación ambiental con posterioridad a la publicación de esta norma en el Diario Oficial.</li> </ul>
<b>Alemania</b>	Enfoque hacia la fuente de emisión y punto de origen de las emisiones en las plantas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emisiones: En el sentido de este reglamento administrativo, son los contaminantes atmosféricos que emanan de una instalación.</li> <li>• Fuentes de emisión: Son los lugares donde los contaminantes del aire ingresan a la atmósfera.</li> </ul>
<b>China</b>	No se habla de fuentes emisoras, pero se entregan definiciones en línea con su enfoque, es decir, la industria y la empresa. Noción de instalación existente y nueva.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Industria del cobre, níquel y cobalto: Se refiere a las industrias de minería, aprovechamiento y fundición que producen metales de cobre, níquel y cobalto. No incluye las industrias de reciclaje y fundición que utilizan materiales de desecho de cobre, níquel y cobalto como materias primas.</li> <li>• Procesamiento e instalaciones típicos: Se refiere a los procesos de producción de minería, beneficio y fundición de metales de cobre, níquel y cobalto y los dispositivos relacionados con estos procesos.</li> <li>• Instalaciones existentes de la empresa existente: Se refiere a empresas industriales o instalaciones de producción de cobre, níquel y cobalto que se han completado y puesto en producción o han pasado la aprobación de documentos de evaluación de impacto ambiental antes de la implementación de esta norma.</li> <li>• Nueva instalación: Se refiere a los proyectos de construcción de instalaciones de producción de cobre, níquel y cobalto nuevas, reconstruidas y ampliadas que hayan pasado la aprobación del documento de evaluación de impacto ambiental a partir de la fecha de implementación de esta norma.</li> </ul>

País	Enfoque de la norma	Definiciones relativas a fuentes emisoras y/o de interés
Estados Unidos	Fundiciones primarias de cobre según la definición actualizada en 2002 y procesos, y emisiones secundarias (definiciones específicas).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Una fundición primaria de cobre se define como cualquier instalación o proceso intermedio dedicado a la producción de cobre a partir de concentrados de mineral de sulfuro de cobre mediante el uso de técnicas pirometalúrgicas (definición actualizada en 2002).</li> <li>• Convertidor de cobre: significa cualquier recipiente en el que se carga mate de cobre y se oxida a cobre.</li> <li>• Emisiones de proceso: significa las emisiones de arsénico inorgánico de los convertidores de cobre que se capturan directamente en la fuente de generación.</li> <li>• Emisiones secundarias: significa las emisiones de arsénico inorgánico que escapan a la captura por un sistema primario de control de emisiones.</li> <li>• Fuentes nuevas: Fuentes emisoras que fueron construidas o reconstruidas posteriormente al 6 de octubre 2006 (definición de la norma de 2007).</li> </ul>
Japón	Unidades emisoras de contaminantes (Ministry of the Environment, 1968)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se utiliza el término “fuente emisora” pero se refiere a ella como "unidad que emite un(varios) contaminante(s)": significa una unidad que está instalada en una fábrica o lugar de negocios, que emite componente(s) que causa(n) contaminación del aire, y que está especificado por Orden de Gabinete como unidad cuya(s) emisión(es) es(son) particularmente necesaria(s) de ser regulada(s) debido a su gran volumen.</li> <li>• Partículas: sustancias que se generan o dispersan como resultado de cualquier proceso mecánico, como triturar o clasificar materiales, o como resultado de la acumulación de dichos materiales.</li> <li>• Unidad generadora de partículas ordinarias: unidad que se instala en una fábrica o lugar de negocios, que genera y emite o dispersa partículas ordinarias que causan contaminación del aire, y que se especifica por Orden de Gabinete.</li> <li>• Unidad que genera partículas especificadas: una unidad que está instalada en una fábrica o lugar de negocios, que genera y emite o dispersa partículas específicas que causan contaminación del aire, y que está especificado por Orden de Gabinete.</li> <li>• Salida (<i>outlet</i>): una apertura en una chimenea o cualquier otra unidad similar que haya sido instalada para emitir a la atmósfera el hollín o el humo que se genera en una unidad que genera hollín o humo, los compuestos orgánicos volátiles. asociado con una unidad que emite un compuesto orgánico volátil, o el mercurio o compuesto de mercurio asociado con una unidad que emite mercurio.</li> </ul>

País	Enfoque de la norma	Definiciones relativas a fuentes emisoras y/o de interés
<b>Canadá</b>	Enfoque hacia establecimientos que son fuentes de emisión fijas y puntos de emisión. Incluye también fuentes de emisión fugitivas (RAA) (Government of Quebec, 1979).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se define el término “fuente emisora” o “establecimiento” pero sí se definen los establecimientos existentes y nuevos.</li> <li>• Existente: significa establecido o puesto en funcionamiento o cuya construcción se inició antes del 30 de junio de 2011, excepto cualquier parte de la fuente de contaminación modificada o ampliada a esa fecha; (existente).</li> <li>• Nuevo: significa establecido o puesto en funcionamiento o cuya construcción comenzó a partir del 30 de junio de 2011, incluida cualquier parte de una fuente de contaminación existente que se modifique o amplíe a partir de esa fecha; (nuevo).</li> <li>• Proceso: cualquier método, reacción u operación por la cual los materiales tratados sufren un cambio químico o físico, en este último caso el proceso comprende todas las operaciones sucesivas sobre el mismo material que provocan el mismo tipo de cambio físico.</li> <li>• Velocidad de alimentación: el peso total de los materiales introducidos en un proceso industrial durante un ciclo completo de funcionamiento, excluidos los combustibles líquidos y gaseosos y el aire.</li> </ul>
<b>Zambia</b>	Enfoque hacia nuevas y existentes plantas industriales, empresa o proceso. Los operadores de dichas instalaciones deben cumplir con los límites de emisión a largo plazo; lo anterior es condición de la obtención de la licencia o permiso de operar y de emitir contaminantes del aire.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se define el término fuente emisora, y tampoco las plantas industriales, empresa o proceso.</li> <li>• Emisión: La descarga a la atmósfera de un contaminante procedente de una fuente determinada en estado sólido, líquido o gaseoso.</li> <li>• Operador: En relación con obras, industria, empresa o negocio significa la persona que tiene el control de las obras, empresa o negocio.</li> <li>• Licencia: Significa una licencia para emitir contaminantes atmosféricos al aire ambiente emitida en virtud de este Reglamento.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

### 2.2.3 Contaminantes regulados en las normativas recopiladas

Los contaminantes regulados en las normativas de Chile y otros países recopiladas, que aplican a las fundiciones de cobre, se presentan en la Tabla 2-11. En esta, se puede apreciar que además del arsénico y sus componentes que hacen el objeto de este estudio, en estas normas, se regulan también de manera común otros metales pesados como el Cd, Pb y/o Hg, que al igual que el arsénico, son impurezas encontradas a lo largo del proceso de producción del cobre. También, algunas normativas recopiladas tienen en común la regulación de otros contaminantes atmosféricos comúnmente regulados a nivel internacional, a saber, el SO<sub>2</sub>, el MP y los NO<sub>x</sub>.

De estas normas, la que cubre más contaminantes es la normativa alemana que abarca a la vez componentes específicos y varias categorías genéricas de contaminantes, seguida por la normativa china, mientras que en Chile se regulan solo tres a cuatro parámetros, además del

arsénico, a saber, el SO<sub>2</sub>, el material particulado, la opacidad, y el Hg solo en nuevas fuentes. Tal como se mencionó anteriormente, en Japón no se regula el arsénico, a diferencia del mercurio para el cual se ha implementado el Convenio de Minamata (PNUMA, 2013); en la normativa japonesa, ambos componentes están clasificados como contaminantes peligrosos del aire para los cuales se requieren esfuerzos voluntarios de parte de las empresas y personas para reducir las emisiones, el desarrollo del conocimiento científico por parte de la nación, captando la condición de contaminación por organismos autónomos (MoE, 1998a).

**Tabla 2-11 Contaminantes y parámetros regulados en las normas de emisión recopiladas en Chile y a nivel internacional para fundiciones de cobre**

País	Arsénico y componentes asociados	Otros contaminantes y parámetros regulados
<b>Chile</b>	As solamente	SO <sub>2</sub> MP Hg (solo nuevas fuentes) Opacidad
<b>Alemania</b>	As, además de arsina e hidrógeno arsénico	En fundiciones de metales no ferrosos: SO <sub>x</sub> polvo total sustancias inorgánicas sustancias orgánicas (compuestos de cloro inorgánico gaseoso) NO <sub>x</sub> NH <sub>3</sub> dioxinas, furanos y bifenilos policlorados, y otras sustancias carcinogénicas.
<b>China</b>	As y sus compuestos	SO <sub>2</sub> MP Niebla de ácido sulfúrico Cl HCl As y sus compuestos Pb y sus compuestos Fluoruro Hg y sus componentes Ni y sus compuestos Pb
<b>Estados Unidos</b>	As inorgánico (sólo en la alimentación de convertidores)	SO <sub>2</sub> MP, MP10 Opacidad Antimonio Berilio Cadmio Cobalto Plomo Manganeso Mercurio Níquel Selenio

País	Arsénico y componentes asociados	Otros contaminantes y parámetros regulados
<b>Japón</b>	No se regula As pero sí As está clasificado como contaminante peligroso del aire.	SO <sub>x</sub> Hollín y polvo NO <sub>x</sub> Cd y compuestos de Cd Pb y compuestos de Pb Hg
<b>Canadá</b>	No se regula As en la RAA.  Sí se regula en el Segundo certificado de saneamiento para una sola fundición (Rouyn-Noranda, Quebec).	RAA: SO <sub>2</sub> MP NO <sub>x</sub> S Hg Opacidad
<b>Zambia</b>	As solamente (regulado de manera indirecta en fundiciones de cobre para las cuales se regulan las emisiones de polvo en esta misma norma)	Específicamente para fundiciones y convertidores de cobre: SO <sub>2</sub> (*) Polvo Metales pesados en las emisiones de polvo de todas las instalaciones de producción de cobre (fundiciones incluidas): Cd Cu Pb Hg (*) También regulado en otras instalaciones utilizadas para la producción de cobre.

Fuente: Elaboración propia

### 2.2.4 Valores límites de emisión específicos al arsénico y otros contaminantes de fundiciones de cobre

Se proporcionan en la Tabla 2-12 los valores límites de emisión establecidos en las normas revisadas, específicos a arsénico de fundiciones de cobre o a otros contaminantes explícitamente asociados en estas normativas a la regulación del arsénico emitido por estas fuentes (ver Tabla 2-9). Así, todas estas normas regulan directamente el arsénico excepto en el caso de EEUU y Zambia donde se establecen valores límites para MP y polvo<sup>32</sup>, respectivamente, con el objetivo explícito de regular el arsénico contenido en las emisiones de aquellos contaminantes. Respecto a esta “regulación indirecta” del arsénico, en el caso de la norma zambiana, se establece tanto un valor límite específico al arsénico a ser medido en el polvo emitido (valor presentado en la Tabla 2-12), como un valor de emisión específico para el polvo que sale de chimeneas de fundiciones de cobre (ver Tabla 2-7).

---

<sup>32</sup> Se mantiene el término utilizado en el documento original, pero es asimilable a material particulado sedimentable.

Adicionalmente, solo la regulación de Alemania proporciona valores diferenciados por chimenea o por el sitio de la fundición de cobre en su conjunto, donde el valor para chimeneas se usa para calcular la altura permitida de dicha chimenea. En este caso, la norma alemana se basa en los dos principios siguientes: "eliminación sin perturbaciones de los gases de escape con el flujo de aire libre" y "dilución suficiente de los gases de escape", a partir de valores-objetivos límites de emisión (denominados "valores S")<sup>33</sup>. En la versión más reciente de esta regulación, se establecen nuevos valores S para el arsénico y para otras sustancias que son más exigentes que en la versión inicial de esta norma. Por lo anterior, para chimeneas de fundiciones de cobre, se destaca el valor de emisión de arsénico impuesto por la norma alemana, significativamente más exigente que en Chile y en Zambia donde se regula lo emitido a nivel de todas las chimeneas de fundiciones y/o de ciertas chimeneas de procesos desarrollados en estas.

En el caso de Chile se impone una medición una vez al mes, y en Zambia solo se habla de reportes mensuales, sin especificar la frecuencia de las mediciones (el intervalo puede ser definido por la Inspección a cargo de la revisión de la solicitud de licencia o de permiso de operar, y/o del permiso de emisión de contaminantes al aire durante la fase de aprobación de la operación de una planta, empresa o proceso).

Además, en el caso de las fundiciones de cobre para las cuales la norma se establece a nivel de gases de escape y/o dispositivos de control, se puede apreciar que el valor de 0,05 mg/m<sup>3</sup> de la normativa alemana es el más exigente de todos los valores recopilados ya que aplica para 30 minutos, a diferencia, por ejemplo, de China que no especifica una duración en la regulación donde se proporciona el valor límite correspondiente.

Adicionalmente, en la tabla siguiente no figura Canadá, donde en materia de arsénico, solo existe un valor límite de calidad del aire establecido por el plan de saneamiento canadiense de una sola fundición del país, Rouyn-Noranda (Quebec), que corresponde a 100 ng/m<sup>3</sup>. En el caso de dicho plan de saneamiento, se sigue la lógica de una norma de inmisión con mediciones de concentraciones de arsénico en dos estaciones de la instalación (estaciones 8006 y 8045). Finalmente, en la tabla siguiente tampoco figura Japón porque este país no establece un valor límite para arsénico emitido al aire por fundiciones de cobre.

---

<sup>33</sup> La normativa alemana indica que el estándar para una dilución suficiente de los gases de escape es la concentración máxima de un contaminante atmosférico emitido cerca del suelo en una situación de dispersión estacionaria. Esto es por ejemplo en el caso del arsénico. Según esta exigencia, la altura de la chimenea debe determinarse de tal manera que esta concentración no supere un valor especificado (el valor S).

**Tabla 2-12 Valores límites de emisión específicos a As, o a otros contaminantes explícitamente asociados a la regulación de As en fundiciones de cobre en normas nacionales e internacionales [mg/Nm<sup>3</sup>]**

Punto de medición	País	Contaminante directamente regulado	Valor [mg/Nm <sup>3</sup> ]	Frecuencia de verificación	Información adicional
Chimeneas de fundiciones de cobre	Alemania	As	0,00016	No aplica. Este valor límite se utiliza solo en el cálculo de la dispersión del contaminante para determinar la altura de la chimenea.	Sin información adicional.
	Zambia	Polvo	0,5	Reportes mensuales, frecuencia de mediciones no especificada. Cualquier emisión anormal se debe reportar inmediatamente (*). <u>No mide arsénico directamente, sino que mide polvo.</u>	Polvo emitido de chimeneas de fundiciones de cobre.
Chimeneas de plantas de ácido/hornos de limpieza de escorias	Chile	As	1	Una vez al mes.	Fuentes emisoras nuevas y existentes.
Gases de escape de fundiciones de cobre	Alemania	As	0,05 Arsina: 0,5	Medición discreta: promedio de 30 minutos, y Medición continua obligatoria en función del número de límites excedidos establecidos (10 veces).	Sin información adicional.

Punto de medición	País	Contaminante directamente regulado	Valor [mg/Nm <sup>3</sup> ]	Frecuencia de verificación	Información adicional
	China	As	0,4 Empresas existentes antes de 2012: 0,5	No especificado, de acuerdo a las especificaciones técnicas nacionales pertinentes para el seguimiento de las fuentes de contaminación (información no disponible).	Para fundiciones con volumen de escape >21.000 m <sup>3</sup> /t de cobre.  La medición se debe realizar a la salida de las instalaciones de control/tratamiento de los gases de escape del proceso de fundición.
<b>Dispositivos de control de fundiciones de convertidores</b>	Estados Unidos (1986)	MP	11,6	Inspección mensual de los dispositivos de control de la contaminación del aire, no se especifica frecuencia de medición.	Para todas las fundiciones de cobre con tasas de alimentación de As anuales promedio a los convertidores >75 kg/h.  <u>El límite es específico a MP, sin embargo, la regulación se enfoca en el control del As inorgánico contenido en MP emitido al aire</u> para lo cual se requieren específicamente dispositivos de control para captura y recolección de las emisiones secundarias de los convertidores de este contaminante.

(\*) En Zambia, los parámetros asociados a la medición de los contaminantes emitidos al aire en el caso de instalaciones industriales, empresas o proceso pueden ser definidos por la Inspección a cargo de otorgar la licencia de operar y/o permiso de emisión de contaminantes al aire.

Fuente: Elaboración propia

Se proporcionan en la Tabla 2-13 los valores límites de emisión de otros contaminantes que el arsénico, emitidos por fundiciones de cobre e instalaciones asociadas a la refinación de minerales (esta tabla está complementada por la Tabla 2-16 disponible en la Sección 2.2.7). En algunos casos, se proporcionan fórmulas de cálculo para estimar las emisiones admisibles en función de ciertos parámetros como la altura de la salida de los gases de escape de la instalación. Se destaca la completitud de las normas alemana, japonesa y canadiense, y del cuerpo normativo estadounidense, alternativamente según una diferenciación entre el sitio completo de la fundición y las chimeneas, y según los tipos de procesos de la fundición e industria del cobre. Además, en Chile se observa que se regulan los principales contaminantes del aire regulados en otros países, con una diferenciación entre fuentes existentes y nuevas encontrados en regulaciones de otros países también.

**Tabla 2-13 Valores límites de emisión de otros contaminantes que el arsénico para fundiciones de cobre e instalaciones asociadas a la refinación de minerales**

Punto de medición genérico	Contaminante	Punto de medición	País	Valor límite de emisión	Unidad	Frecuencia de verificación y otras características de la medición
<b>Fundiciones de cobre en su conjunto</b>	SO <sub>2</sub>	Chimeneas de fundiciones de cobre	Alemania (2020)	0,4	mg/m <sup>3</sup>	Este valor límite se utiliza solo en el cálculo de la dispersión del contaminante para determinar la altura de la chimenea.
		Fundiciones de cobre	Zambia	1.000	mg/m <sup>3</sup>	Reportes mensuales. Frecuencia exacta no especificada, a ser definida en permiso de operación.
		Plantas de producción de cobre primario	Canadá (3)	Plantas existentes, desde 30/06/2012: 10% Previamente: 25%	S emitido en forma de SO <sub>2</sub> en % de S de entrada prescrito	Monitoreo continuo. Se debe presentar cada año un informe detallado de azufre para cada mes del año completo, incluida la cantidad de ácido sulfúrico producido durante el año.
				Plantas nuevas: 5%	S emitido en forma de SO <sub>2</sub> en % de S de entrada prescrito	Monitoreo continuo. Se debe presentar cada año un informe detallado de azufre para cada mes del año completo, incluida la cantidad de ácido sulfúrico producido durante el año.
	Hollín/P olvo	Fundiciones de cobre	Zambia	50	mg/m <sup>3</sup>	Reportes mensuales. Frecuencia exacta no especificada, a ser definida en permiso de operación.
	MP/Partículas	Plantas de producción de cobre primario	Canadá (3)	Fuentes existentes desde 30/06/2012: 600 Hasta 30/06/2011: 1.200	mg/kg de material introducido	Muestreo en la fuente de los gases de escape al menos una vez al año. Las emisiones de MP se determinan por la suma de las emisiones del reactor, la fundición de escorias y matas, convertidores y hornos de ánodos de cobre. Las emisiones se calculan, sobre una base anual, en kg de MP/t de materiales introducidos en el proceso.
				Fuentes nuevas: 300	mg/kg de material introducido	Muestreo en la fuente de los gases de escape al menos una vez al año. Las emisiones de MP se determinan por la suma de las emisiones del reactor, la fundición de escorias y matas, convertidores y hornos de ánodos de cobre. Las emisiones se calculan, sobre una base anual, en kg de MP/t de materiales introducidos en el proceso.
	MP10	Chimeneas de fundiciones	Alemania (2020)	0,8	mg/m <sup>3</sup>	No aplica. Este valor límite se utiliza solo en el cálculo de la dispersión del contaminante para determinar la altura de la chimenea.

Punto de medición genérico	Contaminante	Punto de medición	País	Valor límite de emisión	Unidad	Frecuencia de verificación y otras características de la medición
	NO <sub>2</sub>	Chimeneas de fundiciones	Alemania (2020)	0,0001	mg/m <sup>3</sup>	No aplica. Este valor límite se utiliza solo en el cálculo de la dispersión del contaminante para determinar la altura de la chimenea.
	Cd y compuestos de Cd	Chimeneas de fundiciones	Alemania (2020)	0,0006	mg/m <sup>3</sup>	No aplica. Este valor límite se utiliza solo en el cálculo de la dispersión del contaminante para determinar la altura de la chimenea.
		Polvo emitido de chimeneas de fundiciones de cobre	Zambia	0,05	mg/m <sup>3</sup>	Reportes mensuales. Frecuencia exacta no especificada, a ser definida en permiso de operación (*). <u>No mide Cd directamente, sino que mide polvo.</u>
	Pb y compuestos de Pb	Polvo emitido de chimeneas de fundiciones de cobre	Zambia	0,2	mg/m <sup>3</sup>	Reportes mensuales. Frecuencia exacta no especificada, a ser definida en permiso de operación (*). <u>No mide Pb directamente, sino que mide polvo.</u>
	Hg	Chimeneas de fundiciones	Alemania (2020)	0,001	mg/m <sup>3</sup>	No aplica. Este valor límite se utiliza solo en el cálculo de la dispersión del contaminante para determinar la altura de la chimenea.
		Fundiciones	Japón	[Hg] ≤ 0,05 mg/m <sup>3</sup> o [Hg] <sub>particulado</sub> ≤ 5% [Hg] <sub>total</sub> y [Hg] <sub>particulado</sub> ≤ 0,0025 mg/m <sup>3</sup>	Ver columna "Valor límite de emisión"	Valor promedio anual. Mediciones regulares, cada uno o dos meses (frecuencia a ser definida en base a la ocurrencia de valores que superan el estándar).
		Plantas de producción de cobre primario	Canadá (3)	Fuentes existentes: 2	mg/kg de ánodos	Muestreo en la fuente de los gases de escape al menos una vez al año. Las emisiones de Hg corresponden a la suma de las emisiones del reactor, convertidores y hornos de ánodos. Las emisiones se calculan, sobre una base anual, en g/t de ánodos de cobre producidos.
	Fuentes nuevas: 0,2			mg/kg de ánodos	Muestreo en la fuente de los gases de escape al menos una vez al año. Las emisiones de Hg corresponden a la suma de las emisiones del reactor, convertidores y hornos de ánodos. Las emisiones se calculan, sobre una base anual, en g/t de ánodos de cobre producidos.	

Punto de medición genérico	Contaminante	Punto de medición	País	Valor límite de emisión	Unidad	Frecuencia de verificación y otras características de la medición
		Polvo emitido de chimeneas de fundiciones de cobre	Zambia	0,05	mg/m <sup>3</sup>	Reportes mensuales. Frecuencia exacta no especificada, a ser definida en permiso de operación.  <u>No mide Hg directamente, sino que mide polvo.</u>
<b>Gases de escape de fundiciones de cobre</b>	SO <sub>2</sub>	Gases de escape de fundiciones	Alemania (2020)	500	mg/m <sup>3</sup>	Medición continua en plantas donde emisiones SO <sub>2</sub> > 30 kg/h y Medición discreta: Duración específica a lote, inferior o igual a 24 horas.
		Sistemas de recolección de humos (gases de escape)	China (2010)	Empresas existentes antes de 2012: 960	mg/m <sup>3</sup>	No especificado, de acuerdo a las especificaciones técnicas nacionales pertinentes para el seguimiento de las fuentes de contaminación (información no disponible).
		Sistemas de recolección de humos (gases de escape)	China (2010)	Empresas nuevas y existentes desde 2012: 400	mg/m <sup>3</sup>	No especificado, de acuerdo a las especificaciones técnicas nacionales pertinentes para el seguimiento de las fuentes de contaminación (información no disponible).
	Niebla de ácido sulfúrico	Dispositivos de control/tratamiento de gases de escape	China (2010)	Empresas existentes antes de 2012: 45	mg/m <sup>3</sup>	No especificado, de acuerdo a las especificaciones técnicas nacionales pertinentes para el seguimiento de las fuentes de contaminación (información no disponible).
				Empresas nuevas y existentes desde 2012: 40	mg/m <sup>3</sup>	No especificado, de acuerdo a las especificaciones técnicas nacionales pertinentes para el seguimiento de las fuentes de contaminación (información no disponible).
	Hollín/Polvo	Gases de escape de fundiciones	Alemania (2020)	5	mg/m <sup>3</sup>	Medición continua en plantas donde emisiones Polvo > 3 kg/h y Medición discreta: promedio de 30 minutos (se especifica que aplica también para plantas de tostación)
	MP/Partículas	Dispositivos de control/tratamiento de gases de escape	China (2010)	Empresas existentes antes de 2012: 100	mg/m <sup>3</sup>	No especificado, de acuerdo a las especificaciones técnicas nacionales pertinentes para el seguimiento de las fuentes de contaminación (información no disponible).
				Empresas nuevas y existentes desde 2012: 80	mg/m <sup>3</sup>	No especificado, de acuerdo a las especificaciones técnicas nacionales pertinentes para el seguimiento de las fuentes de contaminación (información no disponible).

Punto de medición genérico	Contaminante	Punto de medición	País	Valor límite de emisión	Unidad	Frecuencia de verificación y otras características de la medición
		Gases de escape del sistema de captura secundario de CPS	Estados Unidos (2007)	Fuentes existentes: 46	mg/m <sup>3</sup>	<p>Monitoreo continuo</p> <p>Exigencia de reporte de fugas o fallas dentro de las 24 horas siguiendo la detección.</p> <p>Sistemas de captura secundarios: Por ejemplo, filtro de mangas.</p> <p><u>Aplica solo para fuentes emisoras existentes que usan convertidores de cobre por lotes que no están asociados a un sistema de limpieza de gases que controle el MP ni a una planta de ácido sulfúrico.</u></p>
		Gases de escape de uno o varios equipos	Estados Unidos (2007)	Fuentes nuevas: 300	g/t concentrado que ingresa al equipo	<p>Monitoreo continuo, con registro diario (valores promedio de 24 horas).</p> <p>Aplica para chimeneas, salidas de gases u otras aperturas en hornos, reactores u otros procesos de la fundición (incluye secadores).</p>
	MP10	Gases de escape de chimeneas u otros puntos de descarga	Estados Unidos (2007)	Fuentes existentes: 41	kg/h	<p>Monitoreo continuo Promedio de 24 horas</p> <p>Incluye secadores de concentrado de cobre, hornos/reactores de fusión, convertidores, plantas de secado y molienda de mate, sistemas de control de gases secundarios y unidades de refinación de ánodos.</p> <p><u>Aplica solo para fuentes emisoras existentes que no usan convertidores de cobre por lotes.</u></p>
	NO <sub>2</sub>	Gases de escape de fundiciones	Alemania (2020)	350	mg/m <sup>3</sup>	<p>Medición continua en plantas donde emisiones NO<sub>2</sub> &gt; 30 kg/h y Medición discreta: promedio de 30 minutos</p> <p>Medición en gases de escape de NO<sub>2</sub> y NO, expresado en NO<sub>2</sub>.</p>
	Cd y compuestos de Cd	Gases de escape de fundiciones	Alemania (2020)	0,2	mg/m <sup>3</sup>	<p>Medición discreta: promedio de 30 minutos, y Medición continua obligatoria en función del número de límites excedidos establecidos (10 veces).</p>

Punto de medición genérico	Contaminante	Punto de medición	País	Valor límite de emisión	Unidad	Frecuencia de verificación y otras características de la medición
	Pb y compuestos de Pb	Gases de escape de fundiciones	Alemania (2020)	0,5	mg/m <sup>3</sup>	Medición discreta: promedio de 30 minutos, y Medición continua obligatoria en función del número de límites excedidos establecidos (10 veces).
		Dispositivos de control/tratamiento de gases de escape	China (2010)	0,7	mg/m <sup>3</sup>	No especificado, de acuerdo a las especificaciones técnicas nacionales pertinentes para el seguimiento de las fuentes de contaminación (información no disponible).
	Hg	Gases de escape de fundiciones	Alemania (2020)	0,4	mg/m <sup>3</sup>	Medición continua en plantas donde emisiones Hg > 2,5 g/h y Medición discreta: promedio de 30 minutos
		Dispositivos de control/tratamiento de gases de escape	China (2010)	0,12	mg/m <sup>3</sup>	No especificado, de acuerdo a las especificaciones técnicas nacionales pertinentes para el seguimiento de las fuentes de contaminación (información no disponible).
Secadores	SO <sub>2</sub>	Secadores (gases de escape)	China (2010)	Empresas existentes antes de 2012: 800	mg/m <sup>3</sup>	No especificado, de acuerdo a las especificaciones técnicas nacionales pertinentes para el seguimiento de las fuentes de contaminación (información no disponible).
		Secadores (gases de escape)	China (2010)	Empresas nuevas y existentes desde 2012: 400	mg/m <sup>3</sup>	No especificado, de acuerdo a las especificaciones técnicas nacionales pertinentes para el seguimiento de las fuentes de contaminación (información no disponible).  Este valor límite aplica también para los gases de escape generados durante el proceso completo de fundición en fuentes nuevas y existentes desde 2012.
	Hollín/Polvo	Hornos de secado	Japón (2)	General: 150 - 200 Por área específica, según catastro oficial: 80 -100	mg/m <sup>3</sup>	4 horas consecutivas en una sola ocasión una vez o más al mes
	MP/Partículas	Chimeneas de secadores	Chile	Fuentes existentes: 50	mg/m <sup>3</sup>	Medición 1 vez al mes
Fuentes nuevas: 30				mg/m <sup>3</sup>	Medición 1 vez al mes	

Punto de medición genérico	Contaminante	Punto de medición	País	Valor límite de emisión	Unidad	Frecuencia de verificación y otras características de la medición	
		Hornos de secado	Canadá (3)	30	mg/m <sup>3</sup>	Muestreo en la fuente de los gases de escape al menos una vez al año. Las emisiones de MP se determinan por la suma de las emisiones del reactor, la fundición de escorias y matas, convertidores y hornos de ánodos de cobre. Las emisiones se calculan, sobre una base anual, en kg de MP/t de materiales introducidos en el proceso.	
		Secadores	Estados Unidos (1)	Fuentes existentes: 50	mg/m <sup>3</sup>	Mensual. Tiempo de muestreo: Mínimo 60 minutos <u>Aplica solo para fundiciones con convertidores por lotes.</u>	
				Fuentes nuevas (posteriores a 1998): 23	mg/m <sup>3</sup>	Mensual. Tiempo de muestreo: Mínimo 60 minutos <u>Aplica solo para fundiciones con convertidores por lotes.</u>	
		Secadores (gases de escape)	Estados Unidos (2007)	Fuentes existentes (anteriores a 10/2006): 50	mg/m <sup>3</sup>	Monitoreo continuo <u>Aplica solo para fuentes emisoras existentes que usan convertidores de cobre por lotes.</u>	
	NO <sub>x</sub>	Hornos de secado	Japón (2)	369	mg/m <sup>3</sup>	4 horas consecutivas en una sola ocasión una vez o más al mes	
	Cd y compuestos de Cd	Hornos de secado	Japón (2)	1,0	mg/m <sup>3</sup>	Cantidad recolectada según el método prescrito en JIS Z8808 y medida como cadmio según el método prescrito en JIS K0083.	
	Opacidad	Hornos de secado	Canadá (3)	20%, recomendado 40%, máximo aceptable	Sin unidad	Monitoreo continuo y Medición discreta durante 60 minutos	
		Secadores de fundiciones de cobre	Estados Unidos (1976)	20%	Sin unidad	Continuo. Cualquier período de seis minutos durante el cual la opacidad promedio exceda el estándar se debe reportar.	
	Plantas de tostación/Tostadores	SO <sub>2</sub>	Tostadores	Estados Unidos (1976)	1.703 (650)	mg/m <sup>3</sup> (ppm)	Continuo. Tiempo de muestreo: 6 horas
		Hollín/Polvo	Plantas de tostación	Alemania (2020)	5	mg/m <sup>3</sup>	Medición continua en plantas donde emisiones Polvo > 3 kg/h y Medición discreta: promedio de 30 minutos
Hornos de tostado			Japón (2)	General: 100 - 150 Por área específica, según catastro oficial: 50 - 80	mg/m <sup>3</sup>	4 horas consecutivas en una sola ocasión una vez o más al mes	

Punto de medición genérico	Contaminante	Punto de medición	País	Valor límite de emisión	Unidad	Frecuencia de verificación y otras características de la medición
	NO <sub>x</sub>	Hornos de tostado	Japón (2)	451	mg/m <sup>3</sup>	4 horas consecutivas en una sola ocasión una vez o más al mes
	Cd y compuestos de Cd	Hornos de calcinación	Japón (2)	1,0	mg/m <sup>3</sup>	Cantidad recolectada según el método prescrito en JIS Z8808 y medida como cadmio según el método prescrito en JIS K0083.
	Pd y compuestos de Pd	Hornos de calcinación	Japón (2)	10	mg/m <sup>3</sup>	Cantidad recolectada según el método prescrito en JIS Z8808 y medida como cadmio según el método prescrito en JIS K0083.
<b>Hornos de fusión</b>	SO <sub>2</sub>	Hornos de fundiciones	Estados Unidos (1976)	1703 (650)	mg/m <sup>3</sup> (ppm)	Continuo. Tiempo de muestreo: 6 horas
	SO <sub>x</sub>	Calderas	Japón (2)	1) Emisión admisible = $K \cdot 10^{-3} \cdot He_2$ Estándar de emisión general: K = 3,0 - 17,5 Estándar de emisión específico: K = 1,17 - 2,34 2) Estándar de uso de combustible Contenido de azufre: menos de 0,5 - 1,2% 3) Regulación de la emisión total a la medida	m <sup>3</sup> /h	Horario, extrayendo aire atmosférico continuamente durante una hora.
	Hollín/Polvo	Hornos de fundiciones	Japón (2)	General: 100 - 200 Por área específica, según catastro oficial: 50 -100	mg/m <sup>3</sup>	4 horas consecutivas en una sola ocasión una vez o más al mes
	MP/Partículas	Emisiones fugitivas de hornos de fusión durante procesos de la extracción de mata y escoria	Estados Unidos (1)	23	mg/m <sup>3</sup>	Mensual. Tiempo de muestreo: Mínimo 60 minutos <u>Aplica solo para fundiciones con convertidores por lotes.</u>

Punto de medición genérico	Contaminante	Punto de medición	País	Valor límite de emisión	Unidad	Frecuencia de verificación y otras características de la medición
		Secadores (gases de escape)	Estados Unidos (2007)	Fuentes existentes (anteriores a 10/2006): 51	mg/m <sup>3</sup>	Monitoreo continuo  <u>Aplica solo para fuentes emisoras existentes que usan convertidores de cobre por lotes.</u>
	NO <sub>x</sub>	Hornos de fundiciones	Japón (2)	370	mg/m <sup>3</sup>	4 horas consecutivas en una sola ocasión una vez o más al mes
	Cb y compuestos de Cb	Hornos de fundiciones	Japón (2)	1,0	mg/m <sup>3</sup>	Cantidad recolectada según el método prescrito en JIS Z8808 y medida como plomo según el método prescrito en JIS K0083.
	Pb y compuestos de Pb	Hornos de fundiciones	Japón (2)	10	mg/m <sup>3</sup>	Cantidad recolectada según el método prescrito en JIS Z8808 y medida como plomo según el método prescrito en JIS K0083.
<b>Convertidores</b>	SO <sub>2</sub>	Convertidores	Estados Unidos (1976)	1.703 (650)	mg/m <sup>3</sup> (ppm)	Continuo. Tiempo de muestreo: 6 horas
	Hollín/Polvo	Convertidores	Japón (2)	General: 150 Por área específica, según catastro oficial: 80	mg/m <sup>3</sup>	4 horas consecutivas en una sola ocasión una vez o más al mes
	MP/Partículas	Gas de escape de convertidores transferidos a planta de ácido sulfúrico	Estados Unidos (1)	6,2 (MP sin ácido sulfúrico)	mg/m <sup>3</sup>	Mensual. Tiempo de muestreo: Mínimo 60 minutos  <u>Aplica solo para fundiciones con convertidores por lotes.</u>
		Emisiones fugitivas de convertidores	Estados Unidos (1)	23	mg/m <sup>3</sup>	Mensual. Tiempo de muestreo: Mínimo 60 minutos.  <u>Aplica solo para fundiciones con convertidores por lotes.</u>
	Cd y compuestos de Cd	Convertidores	Japón (2)	1,0	mg/m <sup>3</sup>	Cantidad recolectada según el método prescrito en JIS Z8808 y medida como plomo según el método prescrito en JIS K0083.
		Convertidores de cobre	Zambia	0,05	mg/m <sup>3</sup>	Reportes mensuales. Frecuencia exacta no especificada, a ser definida en permiso de operación.

Punto de medición genérico	Contaminante	Punto de medición	País	Valor límite de emisión	Unidad	Frecuencia de verificación y otras características de la medición
	Pb y compuestos de Pb	Convertidores	Japón (2)	10	mg/m <sup>3</sup>	Cantidad recolectada según el método prescrito en JIS Z8808 y medida como plomo según el método prescrito en JIS K0083.
		Convertidores de cobre	Zambia	0,2	mg/m <sup>3</sup>	Reportes mensuales. Frecuencia exacta no especificada, a ser definida en permiso de operación.
	Hg	Convertidores de cobre	Zambia	0,05	mg/m <sup>3</sup>	Reportes mensuales. Frecuencia exacta no especificada, a ser definida en permiso de operación (*).
	Opacidad	Convertidores por lotes (CPS y convertidores Hoboken)	Estados Unidos (1)	4%	Sin unidad	Frecuencia no especificada. Valor promedio calculado con al menos 120 intervalos de 1 minuto medidos en el punto de máxima opacidad, durante los cuales al menos un convertidor de cobre está soplando sin interferencias (2002).
		Precipitadores electrostáticos de convertidores por lotes	Estados Unidos (2007)	Fuentes existentes (anteriores a 10/2006): 4%	Sin unidad	Monitoreo continuo de opacidad (COMS) Intervalos de 24 horas  Se utiliza para cumplir indirectamente con el valor límite de MP para convertidores por lotes. En un funcionamiento en régimen de la fundición, se debe realizar una investigación si se supera el 15% de opacidad en 24 horas.
Horno de Limpieza de escorias	MP/Partículas	Chimeneas de hornos de limpieza de escorias	Chile	Fuentes existentes: 50	mg/m <sup>3</sup>	Medición 1 vez al mes
				Fuentes nuevas: 30	mg/m <sup>3</sup>	Medición 1 vez al mes
		Gas de escape de instalaciones de limpieza de escorias transferidos a planta de ácido sulfúrico	Estados Unidos (1)	6,2 (MP sin ácido sulfúrico)	mg/m <sup>3</sup>	Mensual. Tiempo de muestreo: Mínimo 60 minutos  Aplica solo para fundiciones con convertidores por lotes

Punto de medición genérico	Contaminante	Punto de medición	País	Valor límite de emisión	Unidad	Frecuencia de verificación y otras características de la medición
		Gas de escape de instalaciones de limpieza de escorias transferidos a depurador húmedo	Estados Unidos (1)	46 (Partículas totales)	mg/m <sup>3</sup>	Mensual. Tiempo de muestreo: Mínimo 60 minutos Aplica solo para fundiciones con convertidores por lotes
	Hollín/Polvo	Hornos de limpieza de escorias a carbón	Japón (2)	General: 150 Por área específica, según catastro oficial: 80	mg/m <sup>3</sup>	4 horas consecutivas en una sola ocasión una vez o más al mes
	NO <sub>x</sub>	Hornos de limpieza de escorias	Japón (2)	922	mg/m <sup>3</sup>	4 horas consecutivas en una sola ocasión una vez o más al mes
<b>Refinación</b>	Opacidad	Chimeneas de hornos de refino	Chile	20%	Sin unidad	Método de medición es la escala Ringelmann. Frecuencia no especificada.
<b>Planta de ácido sulfúrico</b>	SO <sub>2</sub>	Chimeneas de planta de ácido	Chile	1.572 (600)	mg/m <sup>3</sup> (ppm)	Concentración promedio horaria durante cada hora de operación de la planta de ácido de una fundición de cobre existente.
				1.048 (400)	mg/m <sup>3</sup> (ppm)	Concentración promedio horaria durante cada hora de operación de la planta de ácido de otra fuente industrial emisora de arsénico existente.
				524 (200)	mg/m <sup>3</sup> (ppm)	Concentración promedio horaria durante cada hora de operación de la planta de ácido para fuentes emisoras nuevas.
	S	Plantas de ácido sulfúrico	Canadá (3)	Al menos 96% de eficiencia en la fijación de S de gases de escape	Sin unidad	Solo se especifica el informe a presentar con el detalle del azufre emitido, para cada mes del año completo.
MP/Partículas	Gas de cola de plantas de ácido sulfúrico de hornos de fusión	Estados Unidos (1)	6,2 (MP sin ácido sulfúrico)	mg/m <sup>3</sup>	Mensual. Tiempo de muestreo: Mínimo 60 minutos Aplica solo para fundiciones con convertidores por lotes	

Punto de medición genérico	Contaminante	Punto de medición	País	Valor límite de emisión	Unidad	Frecuencia de verificación y otras características de la medición
	Hg	Chimeneas de planta de ácido	Chile	Fuentes nuevas (solo): 0,1	mg/m <sup>3</sup>	Medición 1 vez al mes
	Opacidad	Plantas de ácido	Estados Unidos (1976)	20%	Sin unidad	Continuo. Cualquier período de seis minutos durante el cual la opacidad promedio exceda el estándar se debe reportar.

**Notas:**

(1) Los valores de EEUU presentados en esta tabla son los de 2002 excepto cuando se indica otro año. La propuesta de enmienda de la regulación estadounidense descrita en la Sección 2.1.2.2 incluye valores más exigentes para las emisiones fugitivas de MP de hornos de fundición que los valores vigentes.

El estándar general de emisión de SO<sub>x</sub> (el valor K) se reforzó el 28 de septiembre de 1976 y, como resultado, actualmente todo Japón está controlado por debajo de 16 rangos K que van de 3,00 a 17,5.

(2) La fuente de los valores de Japón: (MoE, 1998a) y (MoE, 1998b), excepto en el caso del mercurio donde la fuente es (MHLW & MLIT, 2017).

(3) La fuente de los valores de Canadá es RAA (Government of Quebec, 1979), excepto en el caso de SO<sub>2</sub>, de S y de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> es (MDDELCC, 2014).

(\*) Bajo la "regulación del valor K", se calculan las emisiones admisibles de acuerdo con la fórmula  $K \cdot 10^{-3} \cdot He^2$ , donde q es el volumen por hora de SO<sub>x</sub> emitidos (en unidades de Nm<sup>3</sup>) y He, la altura efectiva de la chimenea es la suma de la altura real de la chimenea y la altura de ascenso del humo. El tamaño de K, que varía según la región, determina inversamente el grado de regulación, ya que el efecto de una reducción de K es un estándar de control mucho más rígido.

El estándar general de emisión de SO<sub>x</sub> (el valor K) se reforzó el 28 de septiembre de 1976 y, como resultado, actualmente todo Japón está controlado por debajo de 16 rangos K que van de 3,00 a 17,5.

Fuente: Elaboración propia

### 2.2.5 Efectos sobre salud

A continuación, se describen los efectos sobre la salud humana y/o animal que se mencionan en las distintas normas de emisión recopiladas en Chile y a nivel internacional (Tabla 2-14). Las normativas más completas en la materia son las de Chile, Alemania y EEUU, en las que las consideraciones al respecto hacen referencia a documentos de fuentes expertas. Se destaca el caso de EEUU, donde desde el año 1984 se reconoce de manera precisa los efectos adversos a la salud humana de la exposición al arsénico en el aire en los antecedentes de la norma sobre arsénico proveniente de fundiciones de cobre. Esta información se ve complementada por la norma de 2002 que describe los efectos en la salud provocados por la exposición a los HAP emitidos por fundiciones de cobre primarias regulados por esta norma (a saber, antimonio, arsénico, berilio, cadmio, cobalto, plomo, manganeso, níquel y selenio). Adicionalmente, en la enmienda de la regulación estadounidense que la US-EPA publicó en 2022 (ver Sección 2.1.2.2), en base a la revisión de los riesgos asociados a la fundición primaria de cobre, la organización afirma que los riesgos de las emisiones de distintas sustancias tóxicas de todos los equipos regulados por el estándar NESHAP son inaceptables. Además, esta realizó un análisis demográfico que muestra que los riesgos elevados de cáncer asociados a las emisiones afectan de manera desproporcionada a las comunidades con preocupaciones de justicia ambiental, incluidos las personas con bajos ingresos, los nativos americanos y los hispanoamericanos que viven cerca de las fundiciones de cobre. En dicha propuesta de enmienda, para abordar estos riesgos, la US-EPA propone nuevos estándares de emisiones para distintos procesos realizados en las fundiciones de cobre, con el fin de reducir los riesgos a un nivel aceptable. En esta se indica que se espera que la implementación de las modificaciones regulatorias propuestas reduzca las emisiones de metales HAP de las fundiciones primarias de cobre, mejore la salud humana y reduzca los impactos ambientales asociados con esas emisiones.

Además, en el caso de Alemania, se hace referencia a reglamentos de salud ocupacional y a otras regulaciones nacionales y de la UE que entregan conocimientos científicos sólidos para actividades con sustancias peligrosas, y una clasificación de aquellas sustancias según su carácter carcinógeno, mutagénico y tóxico, por ejemplo, para la reproducción. Adicionalmente, en el documento anexo al D.S. 28/2013 existente en Chile (GEOAIRE, 2012), se mencionan tres tipos de cánceres, a la piel, pulmón y vejiga, y la mortalidad cardiovascular y fetal asociados a la exposición al arsénico en el aire; en este caso, se indaga más en cuanto al cáncer del pulmón, enfermedad para la cual se proporciona una cuantificación de la reducción estimada de mortalidad anual asociada, según escenario regulatorio. Además, este documento menciona otros efectos en la salud provocados por la exposición a otros contaminantes en el aire, como SO<sub>2</sub> (e.g. admisión hospitalaria por causas respiratorias y cardiovasculares), MP<sub>2,5</sub> (e.g. desde visitas de urgencia por asma a mortalidad prematura de las personas), Pb y Hg (e.g. pérdida de coeficiente intelectual en niños) y Cd (e.g. osteoporosis, disfunción renal).

**Tabla 2-14 Efectos sobre la salud identificados en las normas de emisión recopiladas en Chile y a nivel internacional**

País	Efectos en salud
Chile	<p>La norma solo menciona “efectos adversos crónicos y agudos sobre la salud de las personas” (MMA, 2013a).</p> <p>El informe de beneficios de norma de emisión para fundiciones de cobre (GEOAIRE, 2012) identifica efectos para distintos contaminantes (MP2,5, SO<sub>2</sub>, As, Pb, Hg, Cd). En particular se destacan los efectos de arsénico:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cáncer a la piel</li> <li>• Cáncer al pulmón</li> <li>• Cáncer a la vejiga</li> <li>• Mortalidad cardiovascular</li> <li>• Muerte fetal</li> </ul> <p>De estos solo se cuantifica la reducción de mortalidad anual por cáncer al pulmón según escenario regulatorio.</p> <p>Además, el informe de GEOAIRE menciona otros efectos en la salud provocados por la exposición a otros contaminantes en el aire, por ejemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Admisión hospitalaria por causas respiratorias y cardiovasculares, en el caso de SO<sub>2</sub>.</li> <li>• Visitas de urgencia por asma a mortalidad prematura de las personas, en el caso de MP2,5.</li> <li>• Pérdida de coeficiente intelectual en niños, en el caso de Pb y Hg.</li> <li>• Osteoporosis y disfunción renal, en el caso de Cd.</li> </ul>
Alemania	<p>En la versión actual completa la regulación (Bundesrat, 2020) y en su versión antigua, no se mencionan ni se explicitan los impactos a la salud, pero sí se hace referencia a las clasificaciones oficiales de la OMS y otras entidades expertas de las sustancias peligrosas y carcinogénicas. En estas, se proporcionan valores de inmisión a no superar en materia de exposición total para no poner en peligro la salud de los seres humanos; se entregan valores límites específicos a 7 sustancias y/o grupos de sustancias que no se deben exceder en ningún punto de evaluación (Tabla 1 de la regulación). Adicionalmente, se proporciona una clasificación de las sustancias cancerígenas según tres clases, según su peligrosidad, y flujos máxicos asociados que no deben ser superados en los gases de escape de las instalaciones.</p> <p>En la nueva versión de este reglamento (Bundesrat, 2020) y en una versión complementaria de esta (Bundesrat, 2020), se mencionan:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Los "Límites de exposición ocupacional" (TRGS 900) (AGS, 2006) y las "Reglas Técnicas para Sustancias Peligrosas" (TRGS 905) (AGS, 2016) que reflejan el estado del arte, medicina ocupacional e higiene industrial, así como otros conocimientos científicos confiables para actividades con sustancias peligrosas,</li> <li>• El Anexo VI del Reglamento (CE) No. 1272/2008 (Comisión Europea, 2008) que califica la peligrosidad de sustancias químicas en categorías según un código de clasificación de sustancias peligrosas (carcinogénicas, mutagénicas y tóxicas para la reproducción, entre otras).</li> </ul>
China	<p>No se mencionan los efectos sobre la salud en el cuerpo de la norma revisada.</p>

País	Efectos en salud
Estados Unidos	<p>Los antecedentes de la norma referencian el “<i>Health Assessment Document for Inorganic Arsenic</i>” (US-EPA, 1984), donde se presentan las propiedades del arsénico, su distribución, metabolismo y toxicología (incluyendo propiedades cancerígenas).</p> <p>Entre los efectos de salud asociados a la exposición vía aire, se identifica:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos agudos frente a altos niveles de concentración: irritación severa de mucosa nasal, laringe, y bronquios. Secuelas ante contacto agudo incluye perturbaciones al sistema nervioso periférico, y efectos reversibles en sistema hematopoyético</li> <li>• Efectos ante exposición crónica cancerígenas: puede afectar al ADN e inhibir el proceso de reparación del ADN. Cáncer y lesiones pre cancerígenas se han asociado al arsénico. Esto incluye aumento en la mortalidad por cáncer pulmonar y cáncer de piel</li> <li>• Otros efectos ante exposición crónica: efectos neurológicos, cardiovasculares y otros efectos sistémicos</li> </ul> <p>Se cuantifica y valoriza el exceso de riesgo de cáncer.</p> <p>Además, la norma de 2002 indica que los compuestos metálicos HAP emitidos por las fundiciones primarias de cobre regulados por esta (a saber, antimonio, arsénico, berilio, cadmio, cobalto, plomo, manganeso, níquel y selenio), están asociados con una variedad de efectos adversos para la salud. Estos efectos adversos para la salud incluyen trastornos crónicos de la salud (e.g. enfermedades de los pulmones, los riñones, el sistema nervioso central) y trastornos agudos de la salud (e.g. irritación y congestión pulmonar, efectos alimentarios como náuseas y vómitos y efectos en el sistema nervioso central). Los compuestos de arsénico y níquel han sido clasificados por la EPA como carcinógenos humanos, y los compuestos formados a partir de otros cuatro metales HAP (berilio, cadmio, plomo y níquel) han sido clasificados como posibles carcinógenos. Los datos de emisión recopilados durante el desarrollo de esta norma indican que los HAP emitidos en las cantidades más grandes son compuestos de arsénico y plomo. Se ha demostrado que la exposición de humanos al arsénico por inhalación o por ingestión está asociada con formas de cáncer de pulmón, vejiga, hígado y otros tipos de cáncer. Además, se pueden producir daños cerebrales, renales y gastrointestinales debido a la exposición aguda a altos niveles de plomo en humanos. Asimismo, la exposición crónica al plomo por parte de los seres humanos produce efectos en el sistema nervioso central, la sangre, la presión arterial y los riñones. También, esta norma indica que, si bien se desconoce en qué medida se producen los efectos adversos, se puede garantizar que su aplicación permitirá reducir las emisiones y exposiciones posteriores a estos contaminantes.</p>
Japón	<p>El propósito principal de la regulación japonesa es proteger la salud de las personas (mencionado en artículo 1 de la Ley de Control de la Contaminación del Aire de Japón (Ministry of the Environment, 1968) y varias otras ocasiones).</p> <p>En el cuerpo del Reglamento para la aplicación de la Ley de control de la contaminación atmosférica (MHLW &amp; MLIT, 2017), solo se mencionan los efectos a la salud de otros contaminantes del aire, a saber el asbesto y las partículas radioactivas.</p>

País	Efectos en salud
Canadá	<p>En los antecedentes revisados en el marco de la inclusión del arsénico y sus compuestos inorgánicos (Government of Canada, 2007) en la Lista de Sustancias Tóxicas, se identificaron los siguientes efectos a la salud:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Posible relación exposición-reacción entre inhalación de arsénico y cáncer de pulmón en trabajadores de fundición.</li> <li>• Posible exceso de incidencia de cáncer de pulmón o mortalidad asociada.</li> <li>• Cáncer de las vías respiratorias (informes, estudios epidemiológicos de trabajadores de fundiciones o fábricas que producen productos arsénicos para el control de plagas). Se mencionan estudios sobre tres cohortes de trabajadores de la fundición realizados en Estados Unidos y Suecia que presentaron suficiente información sobre la exposición para permitir realizar estimaciones cuantitativas del mayor riesgo de desarrollar cáncer respiratorio. Las tasas de mortalidad estandarizadas (SMR) por cáncer respiratorio aumentaron a medida que aumentaba la exposición acumulada al arsénico.</li> <li>• Posible aumento del riesgo de cáncer del tracto gastrointestinal y del tracto urinario/vejiga e hígado.</li> <li>• Prevalencia del cáncer de piel.</li> <li>• Efectos adversos sobre la vida silvestre canadiense (ej. pequeños mamíferos).</li> </ul> <p>También se menciona que los estudios revisados por las autoridades en el marco de la elaboración de las normas revisadas para este estudio se centraron en los efectos de la exposición al arsénico y que no se tuvo en cuenta la exposición simultánea al SO<sub>2</sub> en todos los estudios, y que tampoco se consideró la información sobre el hábito tabáquico de los sujetos en todos los antecedentes revisados.</p>
Zambia	<p>Solo se menciona la relevancia de que el Consejo de Medio Ambiente evaluó la calidad del aire ambiente con el fin de salvaguardar la salud general, la seguridad o el bienestar de las personas, la vida animal, la vida vegetal o la propiedad afectada por las obras, las actividades industriales o comerciales realizadas por un operador.</p>

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en la siguiente tabla se presentan los contaminantes normados para fundiciones de cobre y otras fuentes de arsénico y un resumen de sus principales efectos sobre la salud humana.

**Tabla 2-15 Contaminantes y sus efectos sobre la salud**

Contaminante	Efecto en la salud
<b>Antimonio (Sb)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Efectos de exposición aguda en ojos y piel por inhalación</li> <li>▪ Efecto primario de exposición crónica es problemas respiratorios como inflamación pulmonar y alteraciones en la función pulmonar, además de diversas enfermedades asociadas al sistema respiratorio</li> </ul>
<b>Berilio (Be)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Efectos de exposición aguda causan inflamación de los pulmones y neumonitis aguda</li> <li>▪ Efectos de exposición crónica por inhalación son beriliosis, irritación de membranas mucosas, disminución de la capacidad pulmonar, fatiga, anorexia, pérdida de peso, entre otros</li> <li>▪ Puede causar efectos inmunológicos y alergias a la piel</li> </ul>
<b>Cadmio (Cd)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Efectos de exposición aguda en pulmones, irritación e inflamación, cuando esta exposición se vuelve crónica puede provocar enfermedades asociadas al sistema respiratorio (bronquiolitis, enfisema)</li> <li>▪ Exposición crónica genera acumulación en los riñones, provocando enfermedades renales</li> </ul>

<b>Cloro (Cl)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Exposición aguda genera irritación fuerte en ojos, sistema respiratorio superior y pulmones, niveles mayores de exposición pueden generar tos, dolor, vómitos e irritación en la piel</li> <li>▪ Exposición crónica tiene efectos en el sistema respiratorio como irritación y obstrucción</li> </ul>
<b>Cobalto (Cb)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Efectos de exposición aguda en sistema respiratorio como disminución significativa en función ventilatoria, congestión, edema y hemorragia del pulmón</li> <li>▪ Exposición crónica por inhalación puede generar problemas en el sistema respiratorio tales como irritación, asma, disminución en la función pulmonar, neumonía y fibrosis</li> <li>▪ Exposición crónica puede tener efectos gastrointestinales (náuseas, vómitos, diarrea), efectos en la sangre, daño hepático, dermatitis alérgica</li> </ul>
<b>Cobre (Cu)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La inhalación de niveles altos de cobre puede producir irritación de la nariz y la garganta.</li> <li>▪ La ingestión de niveles altos de cobre puede producir náusea, vómitos y diarrea.</li> <li>▪ Cantidades muy altas de cobre pueden dañar el hígado y los riñones y pueden aun causar la muerte.</li> </ul>
<b>Cromo (Cr)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cromo VI: efectos agudos en el trato respiratorio, en grandes concentraciones puede tener efectos gastrointestinales y neurológicos. Efectos a exposición crónica incluyen perforaciones y úlceras en el tracto respiratorio, bronquitis, neumonía, disminución de la función pulmonar, asma, entre otros. Grandes concentraciones en exposición crónica pueden producir efectos en los riñones, hígado, sistemas inmune y gastrointestinal y en la sangre</li> <li>▪ Es un compuesto cancerígeno</li> </ul>
<b>Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Contribuye a la lluvia ácida, la cual impacta la salud humana por su exposición dermal, ingesta, inhalación. Puede crear problemas pulmonares crónicos</li> <li>▪ Efectos a corto plazo pueden afectar el sistema respiratorio</li> </ul>
<b>Dioxinas y furanos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La exposición excesiva a los dioxinas y furanos puede causar los efectos significativos sobre la salud humana, afectando a órganos importantes como el corazón, sistema inmune, hígado, piel y la glándula de tiroides, llegando incluso a provocar cáncer reproductivo</li> </ul>
<b>Estaño (Sn)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Los compuestos inorgánicos de estaño generalmente no causan efectos perjudiciales debido a que generalmente entran y abandonan el cuerpo rápidamente cuando los respira o los ingiere. Sin embargo, personas que tragaron grandes cantidades de estaño inorgánico en un estudio clínico sufrieron dolores de estómago, anemia, y problemas del hígado y del riñón.</li> <li>▪ Se ha demostrado que la inhalación, ingestión o contacto de la piel con algunos compuestos orgánicos de estaño produce efectos perjudiciales en seres humanos, pero el efecto principal depende del tipo de compuesto orgánico de estaño.</li> </ul>
<b>Fluoruro (F-)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La exposición a niveles altos de fluoruro puede dañar la salud. Comer, beber o respirar cantidades altas de fluoruros puede causar fluorosis del esqueleto. Esta enfermedad ocurre solamente después de exposiciones prolongadas y puede producir un aumento de la densidad de los huesos, dolor de las articulaciones y limitar el movimiento de la articulación. En los casos más graves, la columna vertebral adquiere rigidez total.</li> </ul>
<b>Manganeso (Mn)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Exposición crónica por inhalación puede generar problemas en el sistema nervioso y en el sistema respiratorio</li> <li>▪ Altas concentraciones pueden generar un síndrome llamado manganismo, que comienza con debilidad y letargia, para progresas a torpeza, temblores, perturbaciones en el habla , entre otros</li> </ul>
<b>Material particulado (MP)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Efectos en el sistema respiratorio, en diversidad de enfermedades, dependiendo de la edad, género, inmunidad, entre otros</li> </ul>
<b>Mercurio y sus compuestos (Hg)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La inhalación de mercurio impacta principalmente al sistema renal y nervioso central</li> <li>▪ Efectos de exposición aguda pueden ser gastrointestinales y respiratorios</li> <li>▪ Exposición crónica afecta al sistema nervioso central con efectos como, eretismo, irritabilidad, insomnio gingivitis, salivación severa, temblores y timidez excesiva</li> </ul>

<b>Niebla de ácido sulfúrico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El ácido sulfúrico y otros ácidos son muy corrosivos e irritantes y afectan directamente el área de la piel, los ojos, y de las vías respiratorias y el tubo digestivo con la que entran en contacto si ocurre exposición a concentraciones suficientes</li> <li>▪ Inhalación de vapores de ácido sulfúrico puede producir erosión de los dientes e irritación de las vías respiratorias.</li> <li>▪ La ingesta de ácido sulfúrico concentrado puede quemar la boca y la garganta y puede producir un agujero en el estómago y producir la muerte.</li> </ul>
<b>Ni y sus compuestos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Compuesto carcinógeno</li> <li>▪ En altas concentraciones puede provocar daño severo a los pulmones y riñones</li> <li>▪ La ingesta puede provocar problemas gastrointestinales y efectos neurológicos</li> <li>▪ Efectos de exposición crónica pueden ser dermatitis, problemas en la respiración</li> </ul>
<b>NO<sub>x</sub></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Contribuye a la lluvia ácida, la cual impacta la salud humana por su exposición dermal, ingesta, inhalación. Puede crear problemas pulmonares crónicos</li> <li>▪ Contribuye a la contaminación por material particulado fino</li> </ul>
<b>Plomo y sus compuestos (Pb)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Puede afectar de manera importante la salud en niños, en relación con el sistema nervioso central y la función renal</li> <li>▪ Altas concentraciones de Pb en la sangre (&gt;15 µ/dL) puede causar problemas con fertilidad, sistema cardiovascular, desórdenes nerviosos, disminución de la función de los riñones, entre otros, en adultos</li> <li>▪ Otros efectos de exposición crónica son efectos en la presión sanguínea, sistema inmunológico, e interferencia con el metabolismo de la vitamina D</li> </ul>
<b>Talio (Tl)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Puede afectar el sistema nervioso, los pulmones, el corazón, el hígado y los riñones si se consumen o beben grandes cantidades durante períodos cortos de tiempo. También puede ocurrir pérdida temporal del cabello, vómito y diarrea, así como la muerte después de la exposición a grandes cantidades de talio por períodos cortos de tiempo</li> <li>▪ El talio puede ser mortal a dosis tan bajas como 1 gramo</li> </ul>
<b>Selenio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Efectos de exposición aguda pueden ser respiratorios como irritación, tos, sangrado de nariz, bronquitis, neumonía química, entre otros. También puede tener efectos gastrointestinales (náuseas, vómitos, diarrea, dolor) y cardiovasculares (taquicardia)</li> </ul>
<b>Vanadio (V)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Personas que han tomado metavanadato de sodio o sulfato de vanadio como tratamiento experimental para la diabetes han experimentado náusea, diarrea leve y calambres estomacales</li> <li>▪ La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) ha determinado que el vanadio es posiblemente carcinogénico en seres humanos</li> </ul>

Fuente: (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, n.d.; Saxena & Sonwani, 2019; US-EPA, n.d.; US Department of Health and Human Services, n.d.)

### 2.2.6 Co-beneficios identificados en las normas de emisión

A continuación, en la Tabla 2-16 se presentan los co-beneficios identificados en las normas de emisión de Chile y en las normas internacionales donde se encontró alguna información al respecto, a saber, las regulaciones de Alemania, EEUU y Japón.

Mientras que en Chile y EEUU se menciona la salud humana y la importancia de cuidar el medioambiente en general mediante la limitación de las emisiones de contaminantes al aire por fundiciones de cobre, en la norma alemana, se menciona la importancia de implementar en las fuentes emisoras medidas de sobriedad y eficiencia energética. En este último caso, de manera implícita, pueden existir co-beneficios en materia de ahorro y optimización de los recursos naturales, y de limitación de las emisiones de GEI y sus efectos sobre el cambio climático.

Adicionalmente, tanto en Chile como en EEUU, se hace mención de la importancia de la asequibilidad de las medidas impuestas a los dueños y operadores de fundiciones, principalmente en el marco de la instalación de nuevas tecnologías; por lo anterior, en ambos casos, se busca garantizar que la obtención de los beneficios y co-beneficios esperados gracias a la implementación de dichas normas no perjudique la sostenibilidad económica de este rubro, y lo fortalezca para el futuro.

**Tabla 2-16 Co-beneficios identificados en distintas normas de emisión recopiladas en Chile y a nivel internacional**

País	Co-beneficios
<b>Chile</b>	<p>La norma sólo menciona la prevención del riesgo sobre la calidad de vida y el medio ambiente (MMA, 2013a).</p> <p>Como co-beneficios, el informe de beneficios de norma de emisión para fundiciones de cobre (GEOAIRE, 2012) identifica beneficios por la reducción de otros contaminantes que As, en salud (fundamentalmente por reducción de MP<sub>2,5</sub>), agricultura, visibilidad y materiales.</p> <p>De estos se cuantifica reducción en la mortalidad, admisiones hospitalarias, visita a sala de urgencia ausentismo y actividad restringida, como co-beneficios en salud. También se valorizan beneficios en agricultura por la reducción de SO<sub>2</sub>, beneficios en visibilidad por la reducción del material particulado y NO<sub>x</sub>, y sobre materiales por efecto del MP.</p> <p>Además, la norma explica que los valores límites para arsénico se fijaron según la mayor eficiencia y costo efectividad en las reducciones de emisión logradas, y en base a las mejores técnicas disponibles para lograr dicha disminución. Se tomó en cuenta el criterio de no imponer costos incrementales para las fundiciones en operación que en su resolución de calificación ambiental ya tienen límites de emisión menores a lo que impone el D.S. 28/2013, las que corresponden a Altonorte y Chagres (MMA, 2013a).</p>
<b>Alemania</b>	<p>En cuanto a requisitos generales en materia de energía para limitar las emisiones, la norma entrega medidas para ahorrar energía, incluida la energía eléctrica, y para utilizar la energía de manera eficiente que pueden aplicar al modernizar todo tipo de fuente emisora, que pueden ser consideradas como generadoras de co-beneficios del control de las emisiones de arsénico y de otros contaminantes. Esto considera medidas generales, y medidas específicas a la energía térmica (e.g. uso de sistemas de postcombustión de energía optimizada, como la postcombustión regenerativa o recuperativa) y a la energía eléctrica (e.g. optimización de los sistemas de aspiración con el fin de reducir los caudales volumétricos de los gases de escape a descargar y tratar).</p> <p>La norma menciona que las medidas deben determinarse teniendo en cuenta los resultados de los sistemas de gestión operativos y sus posibles efectos sobre las reducciones de emisiones directas o indirectas.</p> <p>Si bien no se formula de manera explícita en la norma, lo anterior conlleva co-beneficios ambientales implícitos como el ahorro y la optimización de los recursos naturales, y la limitación de las emisiones de GEI. La protección de dichos recursos también aparece en la versión de la regulación de 2002 en la que se afirma que las disposiciones sobre los límites y el control de las emisiones tienen en cuenta los posibles cambios de efectos adversos de un recurso protegido a otro; están destinados a garantizar un alto nivel de protección del medio ambiente en conjunto.</p>

País	Co-beneficios
<b>China</b>	No se identificaron co-beneficios en la regulación revisada.
<b>Estados Unidos</b>	Si bien se mencionan los impactos a la salud de manera precisa en los antecedentes de esta norma en el <i>"Health Assessment Document for Inorganic Arsenic"</i> (US-EPA, 1984), también se mencionan en el documento <i>"EPA's Emission Standards for Low-Arsenic Primary Copper Smelters"</i> (US-EPA, 1987) asociado a esta norma las consecuencias económicas asociadas a la implementación de un estándar demasiado estricto y costoso, el que elimine de manera completa los riesgos a la salud de la exposición al arsénico en el aire. La EPA concluye que, ante posibles consecuencias económicas drásticas que podrían ser provocadas por una norma de ese tipo, es aceptable considerar que algún nivel de riesgo residual proporciona un amplio margen de seguridad para proteger la salud pública. Por lo tanto, la EPA estableció los estándares de emisión de arsénico inorgánico a un nivel que puede presentar algún riesgo para la salud humana, con el fin de asegurar que se obtuvieran cobeneficios económicos en comparación con un escenario regulatorio más estricto. Finalmente, bajo el mismo enfoque, en el estándar complementario a esta norma (US-EPA, 2002b), la EPA menciona que de acuerdo a la estimación de los costos de cumplimiento con dicho estándar incurridos por los dueños y operadores de fundiciones, se evaluó que en comparación con los ingresos de producción estimados para cada fundición afectada, los costos totales anualizados son mínimos.
<b>Japón</b>	En la Ley de control de la contaminación del aire (Ministry of the Environment, 1968) se menciona la voluntad de lograr un mejoramiento de las políticas públicas en la materia gracias al reporte y monitoreo adecuado de los datos. Los planes voluntarios tienen tanto el enfoque de la contaminación del aire como también la reducción de los GEI, esto conlleva de manera indirecta co-beneficios en ambos casos.
<b>Canadá</b>	Si bien no se identificaron co-beneficios en la regulación revisada, en el estudio de Fonderie Horne (2019) se habla de implementar proyectos y medidas de mitigación de las emisiones de arsénico, dando como ejemplo un proyecto que permitiría reducir la huella ambiental y las emisiones de GEI de la fundición. Además, se indica que en el marco de un estudio de 2018 asociado a la regulación de la actividad de la Fundición Horne de Rouyn-Noranda, se encontró que "la concentración de arsénico es en promedio 3,7 veces mayor en las uñas de los niños del distrito de Notre-Dame (el de la fundición) en comparación con otro grupo de control" y es asociada a los depósitos de polvo en los suelos aledaños a la fundición (no se observó una correlación similar en el caso del material en suspensión en el aire). Por lo anterior, además de permitir la reducción de la exposición directa al arsénico en otros medios que el aire, la regulación permitiría limitar la acumulación de arsénico a largo plazo en los sujetos viviendo en las zonas impactadas por las emisiones.
<b>Zambia</b>	No se identificaron co-beneficios en la regulación revisada.

Fuente: Elaboración propia

### 2.2.7 Métodos de medición

En la Tabla 2-17, se detallan los métodos de medición por contaminante y parámetros regulados en el caso de normas nacionales e internacionales recopiladas, para fundiciones de cobre (además, a título informativo, se indica en el caso del arsénico qué otras fuentes relacionadas con actividades de fundición de metales se encuentran reguladas).

En todas las normas recopiladas, se especifica de manera clara que se deben medir las emisiones de arsénico y de otros contaminantes (e.g. SO<sub>2</sub>, MP/polvo). En el caso del arsénico, se trata principalmente de mediciones discretas a la salida de chimeneas (Chile, Alemania) o de convertidores (EEUU) de las fundiciones, en general con exigencias mensuales, pero también en

otras etapas del proceso de fundición. Además, en todos los casos, en materia de arsénico, si bien no se impone un monitoreo continuo, sí se requiere cumplir con un estándar anual o de largo plazo. Adicionalmente, en Chile, Alemania y EEUU, se debe realizar un monitoreo continuo de las emisiones de otros contaminantes (e.g. SO<sub>2</sub>) o parámetros (e.g. opacidad) de chimeneas de las fundiciones.

Además, en el caso de todas las normas recopiladas, se espera que las mediciones discretas se hagan con sistemas y/o métodos de medición específicos. Para ello, en todos los países menos Zambia, se especifica la necesidad de usar ciertos estándares o protocolos que definen los parámetros y procedimientos a seguir para la medición.

En el caso de Japón, en el Reglamento de la Ley de control de la contaminación del aire (MHLW & MLIT, 2017), se proporcionan distintos métodos de medición a ser utilizados por contaminante (artículo 6 de este Reglamento), además de detalles metodológicos a ser aplicados para calcular los promedios aritméticos de los valores medidos.

En el caso de Zambia, si bien no se establece una frecuencia específica para la medición del arsénico y de los demás contaminantes, sí se definen exigencias de reporte de emisiones (arsénico incluido) y duraciones de medición propias a la mayoría de los contaminantes (arsénico excluido), así como de manera general, la obligación de presentar declaraciones mensuales de emisiones, y de informar inmediatamente a la Inspección de cualquier emisión anormal.

Además, en Canadá, en 2013 se elaboró el *“Guidance Document for Reporting of Releases from the Base Metals Smelting Sector”* (Government of Canada, 2013) para orientar al sector sobre la medición, cálculo, estimación y reporte de liberaciones ambientales. Este documento se centra en los parámetros relevantes para el Sector de Fundición de Metales Base, incluidos los metales declarados como tóxicos según la Ley de Protección Ambiental de Canadá. Este trabajo consideró las emisiones de dióxido de azufre, material particulado, arsénico, cadmio, y plomo, entre otros contaminantes.

**Tabla 2-17 Métodos de medición por contaminante y parámetros regulados**

País	Contaminantes y parámetros regulados	Punto de medición de la(s) fuente(s) regulada(s)	Método de medición	Frecuencia y otras características de la medición
Chile	As	<p>Chimeneas de hornos de limpieza de escorias de fundiciones existentes y nuevas.</p> <p>Chimeneas de plantas de ácido de fundiciones existentes y nuevas</p> <p>Otras fuentes: Chimeneas de plantas de ácido de otras fuentes industriales emisoras de As.</p>	<p>1. Emisión anual – Balance de Masa</p> <p>2. Emisión chimenea – Medición discreta CH-29 denominado "Determinación de emisión de metales desde fuentes fijas", aprobado por el Ministerio de Salud</p>	<p>1. Mensual/anual</p> <p>2. Mensual</p>
	SO <sub>2</sub>	Chimeneas de plantas de ácido de fundiciones existentes y nuevas, y de otras fuentes industriales emisoras de As.	<p>1. Emisión anual- Balance de Masa</p> <p>2. Emisión chimenea – Monitoreo continuo</p>	<p>1. Mensual/anual</p> <p>2. Continuo</p>
	MP	Chimeneas de secadores y hornos de limpieza de escorias en fundiciones existentes y nuevas.	Emisión chimenea – Medición discreta CH-5 denominado "Determinación de las emisiones de partículas desde fuentes estacionarias", aprobado por el Ministerio de Salud	Mensual
	Hg	Chimeneas de plantas de ácido de fundiciones nuevas	Emisión chimenea – Medición discreta CH-29 denominado "Determinación de emisión de metales desde fuentes fijas", aprobado por el Ministerio de Salud	Mensual
	Opacidad	Chimeneas de los hornos de refino en fundiciones existentes y nuevas.	Emisión chimenea – Método 9 (Escala Ringelmann) Determinación visual de la opacidad de las emisiones de fuentes estacionarias de la US-EPA (40 CFR Part 60)	No especificado

País	Contaminantes y parámetros regulados	Punto de medición de la(s) fuente(s) regulada(s)	Método de medición	Frecuencia y otras características de la medición
Alemania (2020)	As	Gases de escape de plantas de fundiciones de cobre y chimeneas de fundiciones de cobre	Monitoreo continuo Medición discreta	Medición discreta: promedio de 30 minutos, y Medición continua obligatoria en función del número de límites excedidos establecidos (10 veces). Sin información adicional.  En chimeneas, la medición se utiliza solo en el cálculo de la dispersión del contaminante para determinar la altura de la chimenea.
	SO <sub>2</sub>	Gases de escape de plantas de fundiciones de cobre y chimeneas de fundiciones de cobre	Monitoreo continuo, o específico a lote	Medición continua en plantas donde emisiones SO <sub>2</sub> > 30 kg/h y Medición discreta: Duración específica a lote, inferior o igual a 24 horas.
	Polvo	Gases de escape de plantas de fundiciones de cobre  Plantas de tostación	Monitoreo continuo Medición discreta	Medición continua en plantas donde emisiones Polvo > 3 kg/h y Medición discreta: promedio de 30 minutos
	MP10	Chimeneas de fundiciones de cobre	Monitoreo continuo	Medición continua  La medición se utiliza solo en el cálculo de la dispersión del contaminante para determinar la altura de la chimenea.

País	Contaminantes y parámetros regulados	Punto de medición de la(s) fuente(s) regulada(s)	Método de medición	Frecuencia y otras características de la medición
	NO <sub>2</sub>	Gases de escape de plantas de fundiciones de cobre y chimeneas de fundiciones de cobre	Monitoreo continuo Medición discreta	Medición continua en plantas donde emisiones NO <sub>2</sub> > 30 kg/h Medición en gases de escape de NO <sub>2</sub> y NO, expresado en NO <sub>2</sub>  En chimeneas, la medición se utiliza solo en el cálculo de la dispersión del contaminante para determinar la altura de la chimenea.
	Cd y compuestos de Cd	Gases de escape de plantas de fundiciones de cobre y chimeneas de fundiciones de cobre	Monitoreo continuo Medición discreta	Medición discreta: promedio de 30 minutos, y Medición continua obligatoria en función del número de límites excedidos establecidos (10 veces).  En chimeneas, la medición se utiliza solo en el cálculo de la dispersión del contaminante para determinar la altura de la chimenea.
	Pb y compuestos de Pb	Gases de escape de plantas de fundiciones de cobre	Medición continua Medición discreta	Medición discreta: promedio de 30 minutos, y Medición continua obligatoria en función del número de límites excedidos establecidos (10 veces).

País	Contaminantes y parámetros regulados	Punto de medición de la(s) fuente(s) regulada(s)	Método de medición	Frecuencia y otras características de la medición
	Hg	Gases de escape de plantas de fundiciones de cobre y chimeneas de fundiciones de cobre	Monitoreo continuo Medición discreta	Medición continua en plantas donde emisiones Hg > 2,5 g/h y Medición discreta: promedio de 30 minutos  En chimeneas, la medición se utiliza solo en el cálculo de la dispersión del contaminante para determinar la altura de la chimenea.
China	As	Dispositivos de control/tratamiento de gases de escape de fundiciones de cobre	Determinación de arsénico en aire y gases de escape - Método espectrofotométrico de dietilditiocarbamato de plata, provisional (ref. HJ 540-2009) (MEP, 2009). Determinación de arsénico en emisión de fuente estacionaria - Método espectrofotométrico de dietilditiocarbamato de plata (ref. HJ 540-2016) (MEP, 2016).	No especificado
	SO <sub>2</sub>	Sistemas de recolección de humos (gases de escape)  Secadores de fundiciones de cobre	Requisitos de monitoreo de contaminantes del aire con estándares de métodos específicos oficiales, listados en la Tabla 8 de la norma.	No especificado
	Niebla de ácido sulfúrico  MP/Partículas  Pb y compuestos de Pb  Hg	Dispositivos de control/tratamiento de gases de escape de fundiciones de cobre	Requisitos de monitoreo de contaminantes del aire con estándares de métodos específicos oficiales, listados en la Tabla 8 de la norma.	No especificado

País	Contaminantes y parámetros regulados	Punto de medición de la(s) fuente(s) regulada(s)	Método de medición	Frecuencia y otras características de la medición
Estados Unidos	As	Gases de escape de dispositivo de control de todas las fundiciones primarias de cobre nuevas y existentes	<p>Tasa alimentación de convertidores – según método 108A de la EPA (US-EPA, 1986)</p> <p>Períodos donde la fundición de cobre primaria contiene un alto nivel de impurezas volátiles: Registro mensual de la carga total de la fundición y el porcentaje en peso (base seca) de As en esta carga. Los métodos y procedimientos analíticos empleados para determinar el peso de la carga total de fundición y el porcentaje en peso de As deberán ser aprobados por el Administrador y tendrán una precisión de más o menos 10% (2015).</p>	<p>Inspección mensual de los dispositivos de control de la contaminación del aire, no se especifica frecuencia de medición.</p> <p>Nota: <u>El límite es específico a MP, sin embargo, la regulación se enfoca en el control del As inorgánico contenido en MP emitido al aire</u> para lo cual se requieren específicamente dispositivos de control para captura y recolección de las emisiones secundarias de los convertidores de este contaminante.</p>
	SO <sub>2</sub>	<p>Chimeneas de cualquier tostador, horno de fundición o convertidor de cobre (2015)</p> <p>Excluye los hornos de fundición de reverberación durante los períodos en que la carga total de fundición en la fundición de cobre primaria contenga un alto nivel de impurezas volátiles</p>	<p>Sistema de monitoreo continuo con amplitud de concentración de SO<sub>2</sub> promedio durante 6 horas.</p> <p>La desviación del sistema de monitoreo durante la ejecución no puede exceder el 2% del valor del intervalo.</p>	<p>Continuo</p> <p>Tiempo de muestreo: 6 horas</p> <p>Reporte de los periodos de exceso de emisiones: Cualquier intervalo de 6 horas que exceda el estándar, con flexibilidad de 1,5% para instalaciones que cumplen con el resto de la normativa (2015).</p>

País	Contaminantes y parámetros regulados	Punto de medición de la(s) fuente(s) regulada(s)	Método de medición	Frecuencia y otras características de la medición
	MP	Gases de escape del dispositivo de control (1986 y 2007)	<p>Norma de 1986: Emisión chimenea – Medición discreta método 5 de la EPA (US-EPA, 2020)</p> <p>Norma de 2007: Monitoreo continuo de acuerdo con la Especificación de desempeño 11 de la EPA en 40 CFR parte 60, apéndice B (EPA Performance Specification 11), y requisitos de garantía de calidad del Procedimiento 2 en 40 CFR parte 60, apéndice F</p>	<p>Medición discreta: Frecuencia mensual</p> <p>Tiempo de muestreo: Mínimo 60 minutos</p> <p>Volumen de la muestra: 0,85 dscm (30 dscf).</p> <p>Monitoreo continuo: Frecuencia diaria</p> <p>Tiempo de muestreo: 24 horas, en base a lo cual se estima la carga total de MP por tonelada de concentrado que ingresa a la fundición.</p>
	Opacidad	Gases de escape de dispositivos de control (2007), de convertidores por lotes y secadores (2002), y flujo de aire de la campana secundaria del convertidor (1986)	<p>Sistema de monitoreo continuo según método 9 (US-EPA, 1993), con amplitud entre 80 y 100% de opacidad (2007, 2015).</p> <p>Requisitos de presentación de informes desde 1986: (1) Informes anuales de la tasa promedio de carga de arsénico inorgánico a los convertidores; (2) informes trimestrales de flujos de aire inferiores al 80% del caudal de referencia; (3) informes trimestrales de niveles excesivos de opacidad.</p>	<p>Continuo desde 1976.</p> <p>Valor promedio calculado con al menos 120 intervalos de 1 minuto (2002).</p> <p>Sistema de monitoreo continuo de opacidad "COMS" (norma de 2007)</p> <p>Reporte de intervalos de 24 horas y de los periodos de exceso de emisiones: Cualquier intervalo de 6 minutos que exceda el estándar (2007, 2015).</p>
Japón	SO <sub>x</sub>	Chimeneas de calderas y hornos de fusión de fundiciones de cobre	<p>Método conductimétrico</p> <p>Nota: El promedio de un día de los valores horarios se calcula como un promedio aritmético de los valores medidos durante todas las horas de medición válidas en un día (pero solo si esto es al menos 20 horas.</p>	<p>Horario, extrayendo aire atmosférico continuamente durante una hora</p> <p>Cálculos por realizar de acuerdo a valores de K según catastro oficial.</p>

País	Contaminantes y parámetros regulados	Punto de medición de la(s) fuente(s) regulada(s)	Método de medición	Frecuencia y otras características de la medición
	Hollín y polvo	Horno de secado Horno de tostación Horno de limpieza de escorias Alto horno (horno de limpieza de escorias que utiliza carbón o coque como combustible o agente reductor) Horno de fusión  Convertidores	<p>Aplica solo para instalaciones de capacidad de consumo de materias primas superiores o iguales a 0,5 t/h.</p> <p>Directrices para el uso de muestreador de aire de alto volumen o un muestreador de aire de bajo volumen.</p> <p>El valor promedio anual de la cantidad de hollín y polvo en la atmósfera se calcula como un promedio aritmético de los valores medidos durante todas las horas de medición válidas (pero solo si es al menos 6,000 horas).</p>	4 horas consecutivas en una sola ocasión una vez o más al mes
	NO <sub>x</sub>	Horno de tostación Horno de limpieza de escorias Alto horno (horno de limpieza de escorias que utiliza carbón o coque como combustible o agente reductor) Horno de fusión	<p>Calculado de los parámetros <i>C</i> medido y <i>On</i>, siendo <i>C</i> la cantidad de óxidos de nitrógeno en centímetro cúbico y <i>On</i> el valor correspondiente proporcionado en la Tabla 3-2 de la norma (MHLW &amp; MLIT, 2017).</p> <p>Aplica solo para instalaciones de capacidad de consumo de materias primas superiores o iguales a 0,5 t/h.</p>	No especificado
	Pb y compuestos de Pb	Hornos de fusión Convertidores	Cantidad recolectada por el método prescrito en JIS Z8808 y medida como plomo por el método prescrito en JIS K0083.	No especificado
	Cd y compuestos de Cd	Hornos de fusión	Cantidad recolectada por el método prescrito en JIS Z8808 y medida como cadmio.	No especificado

País	Contaminantes y parámetros regulados	Punto de medición de la(s) fuente(s) regulada(s)	Método de medición	Frecuencia y otras características de la medición
	Hg	Fundiciones de cobre	Acorde a Convenio de Minamata	Valor promedio anual.  Mediciones regulares, cada uno o dos meses (frecuencia a ser definida en base a la ocurrencia de valores que superan el estándar).
Canadá <sup>(1)</sup>	SO <sub>2</sub>	Planta de producción de cobre primario	Monitoreo y grabación continuos de concentración y caudal de los gases emitidos a la atmósfera. Mínimo de 5 estaciones de muestreo. – según procedimiento establecido por EPA en “ <i>List of designated reference and equivalent methods</i> ” (US-EPA, 2021a).	Continuo
	Partículas	1. Planta de producción de cobre primario existentes y nuevas  2. Instalación de secado de mena.  Aplicable en cada uno de los puntos de emisión de gases de escape secos.	1. Monitoreo y grabación continuos 2. Muestreo en la fuente de los gases emitidos a la atmósfera para calcular la tasa de emisión de partículas Las emisiones de MP se determinan por la suma de las emisiones del reactor, la fundición de escorias y matas, convertidores y hornos de ánodos de cobre. Las emisiones se calculan, sobre una base anual, en kg de MP/t de materiales introducidos en el proceso.	1. Continuo 2. Al menos una vez al año

País	Contaminantes y parámetros regulados	Punto de medición de la(s) fuente(s) regulada(s)	Método de medición	Frecuencia y otras características de la medición
	Hg	Planta de producción de cobre primario existentes y nuevas	<p>Muestreo en la fuente de los gases emitidos a la atmósfera para calcular la tasa de emisión de mercurio.</p> <p>Las emisiones de Hg corresponden a la suma de las emisiones del reactor, convertidores y hornos de ánodos. Las emisiones se calculan, sobre una base anual, en g/t de ánodos de cobre producidos.</p>	Al menos una vez al año
	Opacidad	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Instalaciones de secado de mena</li> <li>2. En todos los puntos de emisiones donde la opacidad es máxima (RAA)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Monitoreo y grabación continuos.</li> <li>2. Medición discreta según la escala de medición de Micro-Ringelmann (Anexo D, RAA).</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>2. Medición discreta durante 60 minutos</li> </ol> <p>240 observaciones en 60 minutos, o dos veces 30 minutos con una interrupción de medio tiempo (120 observaciones en 30 minutos en 2 ocasiones)</p>
Zambia <sup>(2)</sup>	As	Polvo de instalaciones de producción de cobre, incluidas las fundiciones y convertidores de cobre	<p>Dispositivo de medición de aire y sistema interno de monitoreo de emisiones al aire para todos los contaminantes del aire regulados.</p> <p>Medición discreta en emisiones de polvo de fundiciones de cobre.</p>	Reportes mensuales de emisiones, no se especifica frecuencia de mediciones.
	SO <sub>2</sub>	Fundiciones y convertidores de cobre	<p>Medición discreta solo de SO<sub>2</sub>.</p> <p>Medición discreta de SO<sub>2</sub> en combinación con partículas en suspensión.</p>	Reportes mensuales de emisiones, no se especifica frecuencia de mediciones.
	Hollín/Polvo	<p>Fundiciones y convertidores de cobre</p> <p>Preparación del carbón en la producción de cobre</p>	Medición discreta de la caída de polvo.	Reportes mensuales de emisiones, no se especifica frecuencia de mediciones.

País	Contaminantes y parámetros regulados	Punto de medición de la(s) fuente(s) regulada(s)	Método de medición	Frecuencia y otras características de la medición
	Cd, Pb, Hg	Polvo de instalaciones de producción de cobre, incluidas las fundiciones y convertidores de cobre	Dispositivo de medición de aire y sistema interno de monitoreo de emisiones al aire para todos los contaminantes del aire regulados.  Medición discreta en emisiones de polvo de fundiciones de cobre.	Reportes mensuales de emisiones, no se especifica frecuencia de mediciones.

1) Contaminantes y valores proporcionados en la RAA (Government of Quebec, 1979). Se indica que el muestreo de emisiones a la atmósfera requerido para asegurar la aplicación de este reglamento debe realizarse según los métodos de referencia detallados en la Guía de muestreo para fines de análisis ambiental (MDDELCC, 2016).

(2) En Zambia, los parámetros asociados a la medición de los contaminantes emitidos al aire en el caso de instalaciones industriales, empresas o proceso pueden ser definidos por la Inspección a cargo de otorgar la licencia de operar y/o permiso de emisión de contaminantes al aire.

Fuente: Elaboración propia

### 2.2.8 Unidades de medida

En las regulaciones de cada uno de los países, las unidades de medida utilizadas para el establecimiento de valores límites asociados a las emisiones de contaminantes no presentan mucha variabilidad. Se encuentran dos categorías generales: la primera son valores de emisión en el tiempo, con una cierta cantidad másica en un espacio de tiempo determinado, como gramos por hora o toneladas al año. La segunda categoría son limitaciones en el flujo de emisión, lo cual especifica una cantidad másica máxima a emitir por flujo de salida, esta se presenta como mg o  $\mu\text{g}$  por  $\text{m}^3$  o  $\text{Nm}^3$ . El tipo de unidad de medida más recurrente es el de límite en flujo másico, lo cual facilita el rol de verificación al ir de la mano con exigencias de monitoreo continuo.

En el caso de los límites en unidades como toneladas/año, como ocurre en Estados Unidos (US-EPA, 2002a), al normar para plantas de manufactura de vidrio, entra en duda el tipo de reporte a solicitar debido a que se exige un monitoreo continuo pero el valor es anual. En el caso de Alemania, se presentan límites tanto en gramos por hora como en miligramos por metro cúbico (Bundesrat, 2002).

Es relevante notar que, para aquellos países que utilizan la medida por flujo másico, Estados Unidos (US-EPA, 2002a), Chile (MMA, 2013a) y Zambia (Environmental Council of Zambia, 1997), en sus normas para fundiciones de cobre, y la Unión Europea (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2010), en su límite generalizado para arsénico y otros contaminantes, utilizan el metro cúbico normal ( $\text{Nm}^3$ ). Esto se torna particularmente relevante al tratarse de volumen de gases, ya que un metro cúbico normal establece condiciones estándares de temperatura y presión. Estas condiciones estándares evitan cualquier manipulación que se quiera hacer a las concentraciones másicas solicitadas debido al comportamiento diferenciado de gases a diferentes temperaturas y presiones. Además, se facilita la comparación entre diferentes

industrias y países, ya que cada caso particular generará variaciones en las características de temperatura y presión de los gases de salida de un proceso.

### **2.2.1 Ejemplos de alternativas/instrumentos económicos de mejoramiento o recambio**

En la Tabla 2-18, se proporcionan ejemplos de alternativas o equipos complementarios que al usarse en las instalaciones que regulan las normas de emisión recopiladas pueden permitir mejorar el control de las emisiones. No se aborda por ahora ningún aspecto ni instrumento de naturaleza económica. Estas corresponden a técnicas de optimización de la gestión de las emisiones de contaminantes y/o a su abatimiento, en las fundiciones de cobre.

Específicamente, en el caso de Chile, Alemania y de EEUU, se afirma la voluntad de implementar las Mejores Tecnologías Disponibles (BAT, por sus siglas en inglés), sin más detalles en el cuerpo de la norma en el caso de Chile. Si bien algunas técnicas complementarias para mejorar el control de las emisiones no están directamente dirigidas a controlar el arsénico, como se puede observar en el caso de Alemania, estas sí podrían permitir finalmente la reducción de las emisiones de más que un solo tipo de contaminante. Por ejemplo, al reducir las emisiones de MP, se podría también lograr una reducción de la cantidad total de otros contaminantes contenidos en dichas partículas, por ejemplo, el arsénico.

Adicionalmente, de manera singular, en Japón, la Ley incluye un instrumento de compensación económica de las personas por pérdidas y daños hasta 3 años después del perjuicio (Capítulo IV-2), no aplicable a los trabajadores (Ministry of the Environment, 1968). Sobre dicha herramienta, el artículo 25 declara que “si la emisión o dispersión a la atmósfera de una sustancia nociva para la salud humana en asociación con actividades comerciales en una fábrica o lugar de negocios causa lesiones corporales o fatales a una persona, el negocio asociado a las emisiones es responsable de compensar las pérdidas o daños derivados de ello”. Además, en dicho capítulo se prevén los casos en los que la pérdida o daño previsto es causado por dos o más empresas, o en conjunto con la ocurrencia de un desastre natural u otra fuerza mayor, casos en los cuales el tribunal podrá tener en cuenta esa(s) circunstancia(s) al decidir la responsabilidad y el monto de la compensación.

**Tabla 2-18 Ejemplos de alternativas o equipos complementarios para mejorar el control de las emisiones**

País	Equipo/Instrumento	Ejemplo y/o Detalles
Chile	Prácticas operacionales para reducir emisiones al aire	<p>- Informar a lo menos con un mes de anticipación, a la Superintendencia del Medio Ambiente y a la Seremi del Medio Ambiente respectiva, sobre el encendido o detención programada de la planta de ácido y del horno de fusión, así como también la duración de cada período de mantención.</p> <p>- Incorporar ciertas directrices en el Plan de operación y mantención de los sistemas de captura de gases; por ejemplo, un plan de contingencia que tenga por objetivo informar a las autoridades inmediatamente cuando ocurra un evento, así como las acciones correctivas para enfrentar las fallas relacionadas con fugas o emisiones al aire, y la implementación de un sistema de detección de rotura de manga.</p>
	Compensación o cesión de emisiones	Como instrumento de incentivo a la reducción de emisiones más allá de los umbrales establecidos, en su Artículo 10, la norma establece la posibilidad de compensación o cesión de emisiones para las fuentes emisoras que reduzcan emisiones para cumplir con los límites establecidos. Estas sólo podrán compensar o ceder emisiones si acreditan una reducción adicional, permanente y verificable a lo requerido para el cumplimiento de la presente norma.
China	Procesos de producción y los equipos que producen contaminantes atmosféricos	Sistema de recolección de gas local o general y un dispositivo de tratamiento de purificación centralizado, en los que el gas purificado se descarga por el tubo de escape cuya altura está definida en esta normativa (Sección 4.2.6).
Estados Unidos	Convertidores de cobre por lotes ( <i>batch copper converters</i> ).	La normativa estadounidense fue pionera en cuanto al uso de sistemas de captura tales como sistemas de campana de cortina de aire y uso de campanas primarias. En las regulaciones revisadas, se especifica que al usar esos equipos a una tasa de ventilación sustancialmente más alta que lo habitual permite lograr una mayor eficiencia de captura y emisiones fugitivas mínimas.
Japón	Compensación económica por pérdidas y daños provocados por contaminantes	Compensación económica de las personas por pérdidas y daños provocados por la emisión o dispersión a la atmósfera de una sustancia nociva para la salud humana en asociación con actividades comerciales en una fábrica o lugar de negocios. Aplicable hasta 3 años después del perjuicio (Capítulo IV-2), el tribunal está encargado de definir el monto de la compensación y los pagadores, en base a circunstancias y responsabilidades (Ministry of the Environment, 1968). Nota: No aplica a los trabajadores.
Zambia	No se encontraron equipos/instrumentos de este tipo en lo revisado.	No aplica.

Fuente: Elaboración propia

### **3. Escenario nacional e internacional para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico**

#### **3.1 Mercado internacional**

En 2020, la producción mundial de cobre fundido total alcanzó los 21,1 millones de toneladas de cobre, de la cual el cobre de fundición primaria representó un 83% (equivalente a unos 17,5 millones de toneladas). Si bien la proporción de cobre fundido secundario está en aumento desde al menos el año 1980, el cobre fundido primario se ha mantenido como producto principal de la fundición de cobre en el mundo por lejos (International Copper Study Group, 2021). Además, actualmente las actividades de fundición primaria de cobre se realizan en aproximadamente un sexto de los países del mundo, y estas están altamente concentradas en China, principal líder que produce alrededor del 37% del cobre primario fundido, seguido por Chile (ver detalles a continuación).

##### **3.1.1 Identificación y caracterización de fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico**

###### **3.1.1.1 Caracterización de fundiciones de cobre**

De acuerdo al Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) (2021a), actualmente a nivel mundial existen 121 fundiciones de cobre que están en operación, presentes en alrededor de treinta países (USGS, 2002, 2018), de las cuales se estima que más de 100 instalaciones son fundiciones primarias<sup>34</sup>.

En la Tabla 3-1 se presenta la producción de cobre fundido primario de los años 2000, 2010 y 2018 y la variación anual promedio de esta producción en países seleccionados. Es importante destacar que, desde hace más de una década, China se ha posicionado como el primer fundidor de cobre en el mundo, aumentando su producción un 10,7% cada año en promedio entre 2000 y 2018. Así, a la fecha, China funde más de 6 millones de toneladas métricas de cobre primario al año (alrededor de 6,40 MMTM de cobre en 2018) (USGS, 2018)(2021). Lejos detrás de China en términos de producción, pero segundo a nivel mundial, está Chile quien es un actor histórico de la fundición de cobre primario, con 1,25 MMTM de cobre fundido primario en 2018. En tercera posición está Japón, quien es segundo en el ranking de los productores de cobre fundido total gracias a su producción de cobre secundario.

---

<sup>34</sup> No se encontró ningún catastro de fundiciones de cobre primarias que fuese posterior al año 2002, sin embargo, mediante un cruce de las cifras revisadas en materia de producción y capacidad, se puede estimar que hay más de 100 fundiciones primarias de cobre actualmente en operación en el mundo. En 2002, había 109 fundiciones de cobre primarias en operación (USGS, 2002).

**Tabla 3-1 Producción de cobre fundido primario de los años 2000, 2010 y 2018 [TM/año], y variación anual promedio de esta producción [%] en países seleccionados**

País	2000	2010	2018	Variación anual promedio (2000-2018)
China	1.020.000	2.800.000	6.400.000	10,7%
Chile	1.460.400	1.559.800	1.246.100	-0,9%
Japón	1.331.352	1.382.700	1.142.778	-0,8%
Zambia	308.300	490.000	828.700	5,6%
Rusia	600.000	590.000	754.300	1,3%
EEUU	1.000.000	601.000	536.000	-3,4%
Corea del Sur	410.000	476.000	530.000	1,4%
India	256.000	654.000	481.500	3,6%
Polonia	462.800	452.200	461.865	0,0%
Australia	394.000	410.000	378.000	-0,2%
Kazajstán	413.859	370.900	330.000	-1,3%
Perú	366.700	312.968	327.821	-0,6%
Alemania	275.000	378.700	311.200	0,7%
Bulgaria	173.000	265.000	304.900	3,2%
Canadá	543.600	318.000	290.100	-3,4%
<b>Total</b>	<b>9.065.011</b>	<b>11.061.268</b>	<b>14.323.264</b>	<b>3%</b>

Fuente: Elaboración propia a partir de (USGS, 2000, 2010, 2018)

Además, en la Figura 3-1, se presenta la capacidad anual de fundición primaria del top 15 de los países fundidores de cobre en el mundo, junto a la producción anual de cobre fundido primario realizada en estos países.

En materia de capacidad de fundición, según la disponibilidad de datos encontrados, se consideraron las fuentes siguientes:

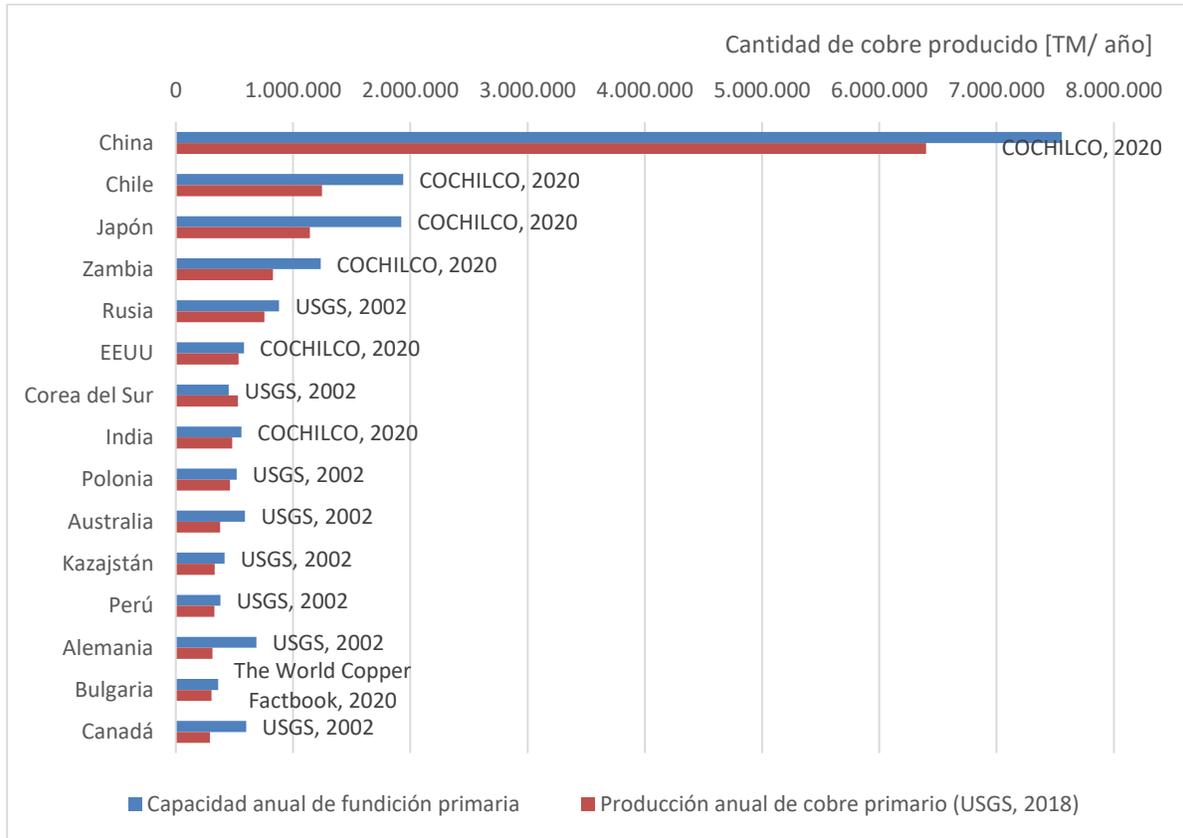
- *“Exportación de concentrados de cobre: caracterización de condiciones comerciales”* (COCHILCO, 2021), con valores del año 2020 presentados,
- *“The World Copper Factbook 2021”*, International Copper Study Group (2021), con valores de 2019 o posterior<sup>35</sup>,
- *“Copper smelter locations and characteristics. Map and table of world copper smelters (Excel “CSTable”).”* USGS (2002).

En materia de producción anual de cobre fundido primario, se consideró la fuente siguiente:

- *“Copper Statistics and Information. Annual Publications. Copper. 2018 tables-only release”* (USGS, 2018).

Respecto a la capacidad, China posee la mayor capacidad anual de fundición primaria para este material, estimada en unos 7,56 MMTM de cobre fundido al año (cifras de 2020). A su vez, Chile ocupa el segundo lugar con una capacidad anual de 1,94 MMTM de cobre primario fundido en 2020.

<sup>35</sup> A pesar de que esta fuente indica que los datos utilizados son del año 2021, se detectó un error de actualización en la tabla *“Top 20 Copper Mines by Capacity (basis 2021)”* en el caso de Chuquicamata, que demuestra los datos son de 2019 o posterior.



Nota:

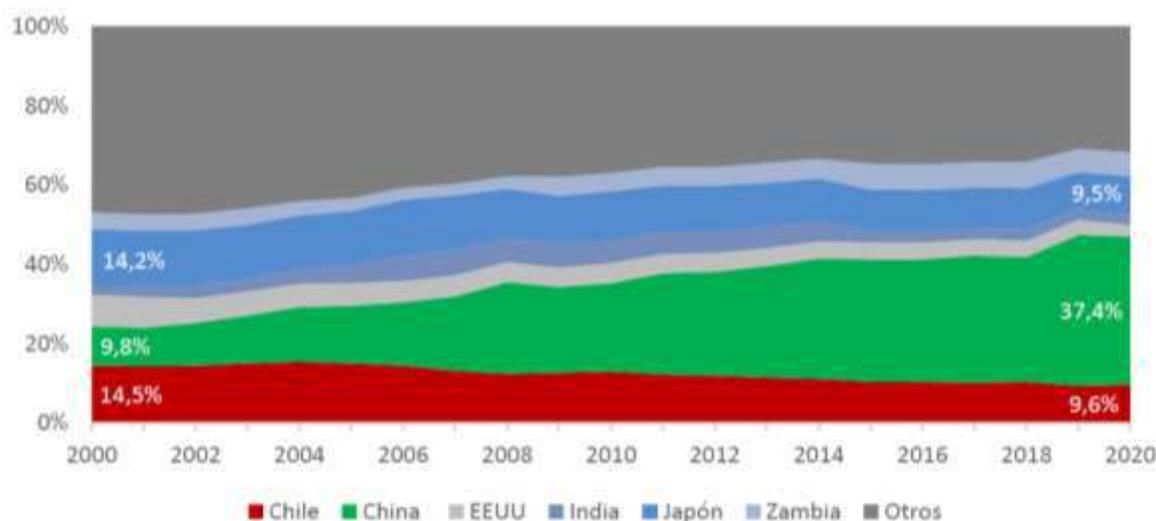
- (1) En esta Figura, los países son ordenados según su producción anual de cobre fundido y no según su capacidad de producción estimada.
- (2) Las capacidades reportadas tienen diferentes fuentes y años (2020 y 2002), lo cual puede producir ciertas inconsistencias. Se detalla el año y fuente del dato en la Figura. Los datos de producción son del año 2018.

### Figura 3-1 Capacidades de producción en fundiciones primarias y producción de cobre fundido primario [TMF/año] en el top 15 de los países fundidores de cobre en el mundo

Fuente: Elaboración propia en base a (COCHILCO, 2021; USGS, 2002, 2018) y The World Copper Factbook (International Copper Study Group, 2021)

Para complementar lo anterior, en la Figura 3-2 se proporciona la evolución de la capacidad de fundición por país entre 2000 y 2020, para los principales países fundidores de cobre, a saber, China, Chile, Japón, Zambia, EEUU, India, y otros. En cuanto a dichas capacidades, primaria y secundaria, en el año 2000 China poseía 9,8% del total de la capacidad de fundición de cobre mundial, mientras que hoy día dispone de un 37,4% de la capacidad existente en el mundo (2020). Es decir que, en 20 años, China multiplicó su participación en porcentaje del total de la capacidad de fundición de cobre mundial por aproximadamente 3,8 veces. Consiguiente a lo anterior, Chile, que en el año 2000 era el país con mayor capacidad de fundición de cobre en el mundo (14,5% del total), vio su participación porcentual decrecer desde hace 15 años. A la fecha, el país se sitúa segundo detrás de China, con una participación equivalente a 9,8% del total de la capacidad existente a nivel mundial. De la misma forma Japón, anteriormente segundo en el ranking mundial en la materia (14,2% del total), es a la fecha el tercer país con más capacidad de fundición de cobre, primaria y secundaria, en el mundo (9,8% del total).

Adicionalmente, es interesante notar que a nivel de América Latina, entre 1990 y 2020, la participación de la región en la capacidad de fusión mundial decreció desde constituir el 21,9% del mundo a ser el 11,2%, respectivamente (Lagos, Peters, Salas, Parra, & Pérez, 2021). Lo anterior es consistente con la situación en Chile. También, se observa que en los últimos años ha habido un descenso en la producción chilena de cobre fundido (CODELCO, 2021a), lo cual se explicaría por los ajustes mayores requeridos para dar cumplimiento a las exigencias de la normativa ambiental, así como a un continuo descenso en la ley de cobre de los concentrados. De esta forma, Chile tendría margen para aumentar su producción de cobre fundido sin tener que ampliar su capacidad de fundición, recuperando niveles similares a los que presentaba hacia inicios de la década.



**Figura 3-2 Evolución de la capacidad de fundición por país entre 2000 y 2020 en los principales países fundidores de cobre y otros [% de participación]**

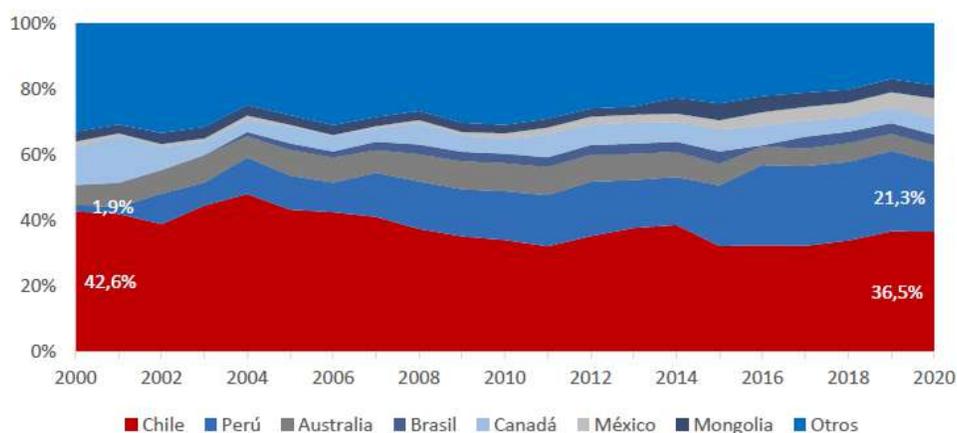
Fuente: (COCHILCO, 2021) con base en datos de Wood Mackenzie

Si bien en las últimas dos décadas se observó un descenso de la capacidad de fusión en países latinoamericanos y un descenso en la producción de cobre fundido, se vio un aumento de la producción de cobre en esos países, lo que significó que las exportaciones de concentrados de cobre desde la región aumentaron (Lagos et al., 2021). En este escenario, China estuvo en paralelo desarrollando en su territorio nuevas capacidades de fundición de gran envergadura (ver lo descrito anteriormente).

Las evoluciones descritas anteriormente tienen implicancias actuales en la configuración del mercado internacional de concentrado de cobre, principal insumo de la fundición de cobre. En la Figura 3-3 y Figura 3-4 se puede observar la participación por país en exportaciones de concentrados de cobre entre los años 2000 y 2020, y su evolución en valores absolutos; en este escenario, como país líder a escala internacional en la minería del cobre, Chile es también el primer exportador de concentrados de cobre. Además, en la Figura 3-5, se puede observar que

el mayor importador de dicho insumo es China desde finales de los años 2000, durante los cuales reemplazó a Japón en este lugar (ver detalles a continuación).

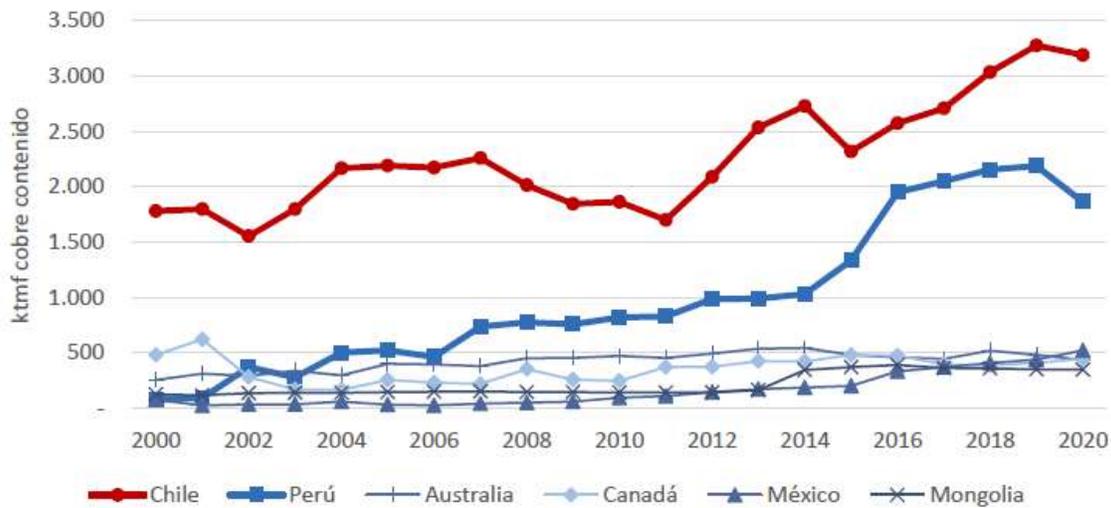
Así, en cuanto a la evolución de la distribución de las exportaciones de concentrados de cobre en el mundo (Figura 3-3), Chile es el primer exportador de concentrados de cobre, y su mayor cliente es China (COCHILCO, 2021) (ver detalles sobre importaciones en la Figura 3-4). Desde el año 2000, Chile se ha mantenido como líder mundial en este mercado con una participación de 36,5% en el año 2020 (a pesar de que esta bajó de 6 puntos porcentuales entre los años 2000 y 2020). A su vez, la participación de Perú, según el ranking mundial de los exportadores de concentrados de cobre, ha crecido sustancialmente ya que esta ha sido multiplicada por 11,2 durante el mismo periodo. Se destacan también las tendencias de disminución de la participación de Canadá y el aumento de las participaciones de México y Mongolia en este mercado, durante ese periodo.



**Figura 3-3 Participación por país en exportaciones de concentrados de cobre entre los años 2000 y 2020 [% de participación]**

Fuente: (COCHILCO, 2021) en base a World Metal Statistics

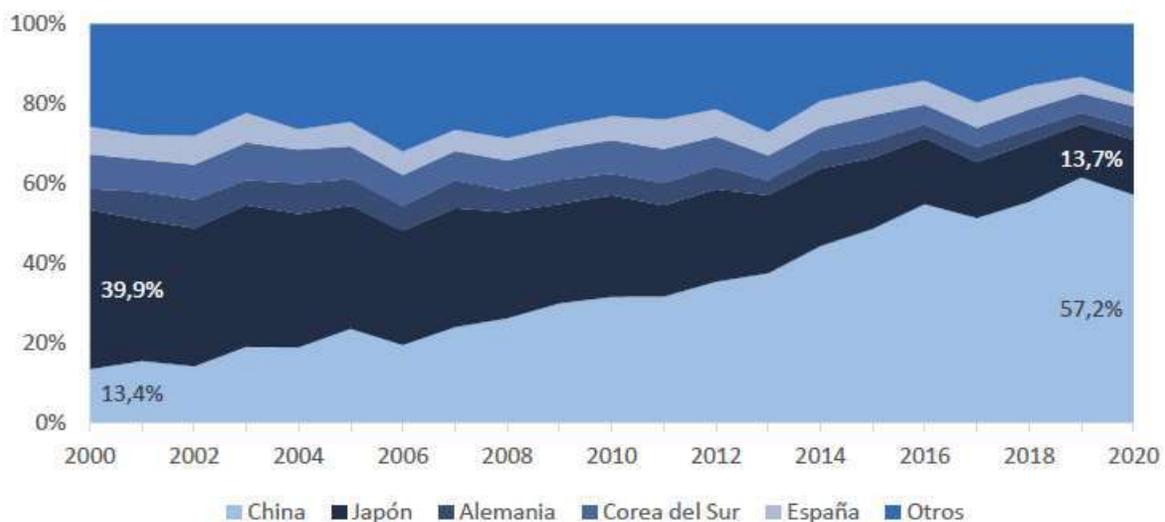
En complemento de lo anterior, en la Figura 3-4, se proporciona la evolución de las exportaciones de concentrado de cobre en valores absolutos para los 6 principales países exportadores de concentrados de cobre a nivel mundial; estos representan el 78% de los servicios de fundición demandados al año 2020 (COCHILCO, 2021). Durante el periodo observado, a nivel macro, se destaca la tendencia creciente de exportación de concentrados de cobre en el caso de Chile y Perú (sobre todo desde el año 2014), con la existencia de ciclos de decrecimiento cuyos niveles mínimos fueron alcanzados en los años 2002, 2011 y 2015 en el caso de Chile, y en 2003 y 2006 en el caso de Perú. También, entre 2019 y 2020, en ambos países se observó una disminución de la cantidad de concentrados de cobre exportada.



**Figura 3-4 Evolución de exportaciones de concentrados de cobre de principales países entre los años 2000 y 2020 [TMF/año]**

Fuente: (COCHILCO, 2021) en base a World Metal Statistics

Adicionalmente, se presenta a continuación el detalle de las importaciones de concentrados de cobre en el mundo (Figura 3-5). Al ser el primer fundidor de cobre mundial, China es también el primer país importador de concentrados de cobre con una participación de 52,7% a nivel mundial. Se puede apreciar que su participación porcentual en el total de las importaciones mundiales de concentrados de cobre ha sido multiplicada por 4,3 entre 2000 y 2020. Japón ocupa el segundo lugar en el ranking de los importadores de concentrados de cobre, con una participación que ha sido dividida por 2,9 durante esos 20 años. Chile no aparece en esta figura porque utiliza concentrados que provienen de su industria minera nacional.



**Figura 3-5 Participación por país en importaciones de concentrados de cobre entre los años 2000 y 2020 [% de participación]**

Fuente: (COCHILCO, 2021) en base a World Metal Statistics

En cuanto a la capacidad de producción de ánodos, primer y principal producto de la fundición de concentrados de cobre, está concentrada en pocos países, principalmente en China, Chile y Japón, los que poseen el 51% de la capacidad de producción (cifras de 2016). Además, según COCHILCO (2017), el 88% de la capacidad mundial de fabricación de ánodos de cobre está localizada en solo 57 fundiciones ubicadas en esos países y en el resto del mundo, mientras que en total hay unas 120 fundiciones en operación (cifras de 2016). Se muestra el detalle correspondiente en la Tabla 3-2.

**Tabla 3-2 Capacidad de ánodos de 57 fundiciones en operación en 2016 [ton ánodos]**

Zona/ País	Número de fundiciones	Capacidad de producción de ánodos (2016) [ton]	Participación (%)
China	16	5.834.000	31%
Chile	7	2.008.000	11%
Japón	5	1.923.000	10%
Asia (resto)	5	2.732.000	14%
Europa	9	2.685.000	14%
América (excepto Chile)	8	2.226.000	12%
Mundo (resto)	7	1.643.000	9%
<b>Total</b>	<b>57</b>	<b>19.051.000</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración propia en base a COCHILCO (2017)

De manera lógica, China, quien es el primer importador de concentrados de cobre y fundidor en el mundo, a la fecha es también líder en la producción de cobre refinado, cuyos productos principales son los ánodos y cátodos. Según las proyecciones en la materia, la configuración descrita anteriormente se debiera mantener en el futuro (Lagos et al., 2021).

### 3.1.1.2 Aspectos económicos del negocio de la fundición

Además, en cuanto a aspectos económicos del negocio de la venta y compra de concentrados de cobre, es importante destacar que existen penalidades asociadas a las impurezas de elementos que contienen los concentrados<sup>36</sup>, que deben pagar los vendedores de concentrados. Dichas penalidades son establecidas por los países importadores de concentrados, y su valor depende de la concentración de impurezas que presenten estos productos<sup>37</sup>. Ello significa que un concentrado vendido por una compañía minera a una fundición con concentraciones de elementos que aplican para penalidades implica que la mina pague una penalidad por tonelada (Lagos et al., 2021), lo que finalmente corresponde a un precio menor de venta a lo que habría sido con niveles inferiores de impurezas. Así, se habla de concentrados “limpios” cuando las impurezas contenidas en el concentrado se sitúan por debajo de los umbrales de penalidades impuestos por los países importadores (e.g. China, Japón), y de concentrados “complejos” en la situación contraria.

A la fecha, se estima que alrededor de 30% de los concentrados de cobre producidos a nivel mundial contienen más del 0,1% de As, un valor cercano a los umbrales máximos fijados por China y Japón más allá de lo cual el concentrado pasa a ser “complejo”. La literatura indica que estos concentrados provienen en proporción significativa de minas chilenas y peruanas cuyas rocas contienen cantidades de As significativas (Lagos et al., 2021).

Las penalidades son un factor económico importante de tener en cuenta por parte del fundidor para quien la presencia de impurezas implica a la vez costos mayores de fundición y ganancias cuando se recuperan dichos elementos como el As<sup>38</sup> (ver detalles en Sección 3.1.1.3). A modo de ejemplo, según estimaciones de Larouche (2001), el orden de magnitud de los ingresos por multas puede alcanzar entre 5 y 10 millones de USD para una fundición personalizada de tamaño mediano con una capacidad moderada para tratar las impurezas. Los ingresos pueden ser mayores para las fundiciones especializadas en el tratamiento de elementos de este tipo. Sin embargo, los costos relacionados con el desarrollo y operación de técnicas de remoción y control dedicadas deben restarse de estos ingresos adicionales (Larouche, 2001).

A continuación, se describen aspectos normativos respecto a límites de impurezas de As en concentrados de cobre, que son vigentes en China y Japón, países que ocupan el primer y segundo lugar en materia de importaciones de concentrados de cobre a nivel mundial.

---

<sup>36</sup> Los componentes siguientes son impurezas que se suelen encontrar en los concentrados de cobre, y que son usualmente reconocidas como tal: As, Sb, Zn, Pb, Hg, Bi, Cl, F. Estos son directamente asociados a la composición de la roca de la cual proviene el mineral de cobre extraído.

<sup>37</sup> Cabe destacar que estas penalizaciones no son fijas, sino que cambian con el tiempo a partir de la curva de oferta y demanda del mercado y el desarrollo de la tecnología (Larouche, 2001).

<sup>38</sup> Ciertas fundiciones son especializadas en la recuperación del As de concentrados de cobre que luego de ser refinado se vende como aditivo en la industria metalúrgica o como insumo en otros rubros (USGS, 2021b).

En el caso de China, desde el año 2006, el gobierno chino ha impuesto límites máximos para impurezas como el As y otras sustancias contenidas en los concentrados de cobre importados. En caso de no cumplimiento de estos límites legales, hay penalidades que se aplican posteriormente a la inspección de la mercancía realizada por los Servicios de Inspección y Cuarentena chinos<sup>39</sup> (ASQIQ, 2006). El umbral correspondiente fijado es igual a 0,5% de As en peso. Adicionalmente, desde el año 2017, las autoridades chinas están considerando la posibilidad ser más exigentes, fijando dicho valor en 0,4% para el As. En esta perspectiva, en 2019, el Gobierno chino inició un proceso de consultación oficial sobre una propuesta de estándares más estrictos en la materia, instancia en la que se convocó al gremio de las 10 fundiciones de cobre más grandes del país (Fastmarkets, 2019). La primera reacción de esta coalición fue un fuerte rechazo asociado a que la producción de concentrado “complejo” está al aumento en el mundo, por el agotamiento de los recursos con menos impurezas en los yacimientos en operación. A la fecha, las autoridades chinas no han comunicado ninguna actualización regulatoria en la materia, pero sí la voluntad de aumentar las exigencias sigue en plan. Lo anterior ha implicado una mayor presión sobre las fundiciones chinas y se ha visto repercutido sobre los proveedores de concentrado de cobre internacionales como los de Chile que buscan soluciones para anticipar posibles nuevos requerimientos.

En el caso de Japón, al igual que en China, existen requisitos de pureza para los concentrados de cobre que entran a fundición, y penalidades si el As está presente en el concentrado de cobre en concentraciones que exceden los límites estipulados. Las penalidades impuestas por las fundiciones de cobre japonesas están definidas por una estructura general de cobro (Larouche, 2001) y, por debajo de una cierta concentración, no hay cargo por el elemento de impureza. Este valor de umbral se denomina "máximo sin cargo" (NCM), arriba del cual se aplica un cargo incremental por concentraciones de elementos impuros superiores al NCM (Lane, Cook, Grano, & Ehrig, 2016). Ciertas fundiciones pueden rechazar directamente el concentrado de cobre si la concentración de un elemento de impureza excede un cierto valor. En el país, las penalidades por arsénico comienzan en concentraciones superiores al 0,2% en peso, y por cada 0,1% de impureza adicional, se genera un cobro adicional de 2,5 USD por tonelada de concentrado de cobre (Lane et al., 2016).

Adicionalmente, al igual que en el caso de las impurezas, la recuperación de subproductos u otros componentes generados durante el proceso de fundición son relevantes para el negocio de la fundición de cobre. Lo anterior se explica porque cuando compran el concentrado de cobre a las minas, las fundiciones pagan por el contenido de subproductos como Au, Ag, Pt, Pd (entre otros) que estos tienen. Por lo anterior, las fundiciones pueden ganar ingresos extra si es que logran recuperar en las etapas de limpieza más que lo pagado, o elementos que se pueden valorizar pero que no se pagan.

---

<sup>39</sup> Si bien en la página oficial de los Servicios de Inspección y Cuarentena de China (ASQIQ, por sus siglas en inglés) se indica que la norma del año 2006 en la materia expiró, la información revisada sobre China indica que, a la fecha, son estos estándares los que se aplican en la práctica.

Asimismo, el ácido sulfúrico, producido a partir de la captura del SO<sub>2</sub> emitido durante dicho proceso, es uno de los componentes más comúnmente recuperados en las fundiciones. En efecto, a la fecha, la mayoría de las instalaciones en operación poseen una planta de ácido sulfúrico. Según fuentes expertas, la venta de ácido sulfúrico es un ingreso muy importante usualmente para las fundiciones, ya que el precio del ácido sulfúrico excede el costo de producirlo, el que es, de todas formas, ineludible, debido a las normas ambientales (Lagos et al., 2021). No obstante, se conoce que en algunos casos como en China, el mercado interno no es capaz de absorber la producción de ácido sulfúrico local. Lo anterior ha implicado que este se exporte a precios muy bajos, cercanos al costo de transporte, y en el caso de Chile, ha favorecido las importaciones de ácido desde dicho país.

### 3.1.1.3 Comparación de parámetros de operación de las fundiciones de cobre

Preliminarmente a la descripción de las tecnologías utilizadas en el proceso de fundición, se presenta una comparación de parámetros de rendimiento para las fundiciones en su conjunto, para las instalaciones chinas, japonesas, alemanas y chilenas (Tabla 3-3), con datos del año 2015. Esta permite apreciar que las fundiciones de Chile obtienen resultados de rendimiento que son más bajos que los demás países para casi la totalidad de los parámetros observados, y costos unitarios que son más altos. Así, en 2015, Chile tenía una capacidad de fusión menor en promedio que el resto de estos países y de una amplitud variable, con una tasa de recuperación de cobre menor al resto de los países presentados, y costos unitarios significativamente más elevados (entre 1,2 y 3,1 veces más elevados que en los demás países). Según las fuentes expertas en la materia (MCH, 2019) y el estado actual de las fundiciones en Chile, en estos tres últimos aspectos, estas conclusiones valen aún en 2021; sin embargo se observan algunas modificaciones en otros de los parámetros presentados en la Tabla 3-3, estos se describen a continuación.

En cuanto a aspectos ambientales, los datos del año 2015 de las fundiciones chilenas muestran que en estas no se recupera energía ni otros metales que los que se funden, y que la tasa de captura de azufre es menor que las de fundiciones chinas, japonesas y alemanas (Fundación Chile, 2015). En esta materia, en el contexto de los avances mundiales sobre la limitación del cambio climático y protección del medio ambiente, empresas de la minería chilena han realizado esfuerzos más sostenidos desde el año 2015 para limitar el impacto ambiental negativo de sus actividades (Valdés, 2021). Los compromisos tomados están en línea con las propuestas de medidas para el sector de la minería en el Anteproyecto Minería 2050 de la Política Nacional Minera (Ministerio de Minería, 2021).

Así, en ciertas fundiciones chilenas hay dispositivos que permiten recuperar calor y/o energía, como la Fundición Chagres que posee una caldera recuperadora de calor para el secado del concentrado de cobre, dispositivo que beneficia de costos competitivos ya que no usa combustible. Además, la Fundición Altonorte cuenta con una secadora Kumera que tiene la capacidad de recuperar el calor de las calderas. Por otro lado, la Fundición Chuquicamata de CODELCO también cuenta con un sistema de recuperación de calor presente en su horno *flash* (información obtenida de entrevistas realizadas en el marco de este proyecto, 2021). Asimismo,

si bien en varias fundiciones aún no se realiza recuperación energética, desde hace varios años hay nuevas tecnologías en uso que permiten un ahorro de energía en comparación con otras tecnologías más antiguas que eran menos eficientes en este aspecto; es el caso de las tecnologías *flash* (US Department of Energy, 2013), que están en uso en dos fundiciones chilenas.

También, datos de 2020 de captura y fijación de azufre de las fundiciones chilenas (ver Tabla 5-8) indican que en general los niveles son superiores a lo estimado en 2015. El valor promedio en las fundiciones Chuquicamata, Altonorte, Potrerillos, Chagres y Caletones es de 97,7%, mientras que la captura y fijación de azufre en Ventanas es de alrededor de un 95%. Si bien el nivel en Hernán Videla Lira es alrededor de un 96%, se debe tener en cuenta que este es un valor referencial debido a que no fue estimado con la última metodología de balances de masa aprobada.

Asimismo, en cuanto a la recuperación de otros metales además del cobre, en la Fundición Ventanas, propiedad de CODELCO, se recupera oro y plata contenidos en el barro anódico, residuo de la formación de cátodos vía refinación electrolítica. En la Fundición Ventanas se realiza el secado de dicho barro, luego de que este se envía a una planta de terceros para ser procesado (información entregada por CODELCO durante la entrevista realizada en el marco de este estudio, 2021).

**Tabla 3-3 Comparación de parámetros de rendimiento de fundiciones de cobre de Chile, China, Japón y Alemania con datos de 2015 [unidad indicada]**

Parámetro	Unidad	Fundiciones chinas	Fundiciones japonesas	Fundiciones alemanas	Fundiciones chilenas (*)
Capacidad de fusión	KTS/año	1.000 – 1.500	1.200	1.200	320 – 1.000
Captura de azufre	%	98	99	98,5	95
Costos unitarios	cUS\$/kg	29	40	42	49 - 88
Recuperación de cobre	%	98 – 98,5	98 – 99,5	98	95 – 97,3
Recuperación de energía	Sí/No	Sí	Sí	Sí	No
Recuperación de otros metales	Sí/No	Sí	Sí	Sí	No

Nota: (\*) Tal como mencionado anteriormente, se estima que la tasa de fijación de azufre ha mejorado en fundiciones chilenas desde el año 2015, esta se estima superior a 95% en 5 de las 7 fundiciones chilenas, con un promedio cercano a 97% (2020). También, se está recuperando calor que permite realizar recuperación energética en al menos 3 fundiciones chilenas (2021), así como metales preciosos (oro y plata) en al menos una fundición del país (2021).

Fuente: Elaboración por Corporación Alta Ley y Fundación Chile (2015) a partir de datos de ENAMI (2015)

Adicionalmente, por una parte, es importante recalcar que las impurezas contenidas en los concentrados de cobre son relevantes para las fundiciones de cobre en términos económicos (Sección 3.1.1.2), y pueden hacer variar su rendimiento, dependiendo de las tecnologías de limpieza y refinación de las cuales estas disponen. Asimismo, lo que pagan las fundiciones a las minas por la presencia de subproductos (Au, Ag, Pt, Pd, entre otros) en los concentrados que compran, es también relevante para su rendimiento, ya que estas ganan ingresos extra si logran recuperar en las etapas de limpieza más que lo pagado. Lo anterior dependerá de las tecnologías de las cuales disponen para recuperar estos tipos de elementos, así como los que no se pagan como el molibdeno (Lagos et al., 2021).

Por otra parte, de acuerdo con la literatura, un factor que influye sobre la eficiencia del proceso de fundición es el carácter integrado o independiente de las fundiciones, es decir si pertenecen a un esquema *mine to smelter* operado por la misma empresa y/o en el mismo sitio, o si funcionan como una entidad independiente de la mina. Una de las razones que explica aquella diferencia en la eficiencia tiene que ver con que las fundiciones independientes pueden operar con más flexibilidad, en particular elegir los concentrados de cobre que compran, a los precios que más les convenga. De acuerdo a COCHILCO (2017), la mayoría de las fundiciones de cobre integradas como las chilenas<sup>40</sup> son evaluadas como menos eficientes que las fundiciones que no son integradas (ver mayores detalles en Sección 3.2). De acuerdo con los catastros disponibles, se aprecia que actualmente en el mundo existe una mayoría de fundiciones no integradas (COCHILCO, 2017).

Asociado al rendimiento y la eficiencia de las fundiciones de cobre, hay otros parámetros de interés que son relevantes de mencionar al describir aspectos técnicos de su funcionamiento. Para efectos de este capítulo, y con el fin de seguir un orden lógico en las explicaciones entregadas, la información respecto de la vida útil y mantención de las fundiciones y sus equipos se presenta en la Sección 3.1.2.1 c), posteriormente a la presentación de los equipos y tecnologías existentes utilizados para la fundición de cobre.

### **3.1.2 Tecnologías pirometalúrgicas de producción de cobre: fusión, conversión, limpieza y refinación y descripción de aspectos técnicos**

En esta subsección, se describen las tecnologías pirometalúrgicas involucradas en la fundición del cobre, de las cuales depende en parte el rendimiento que se logra en cada fundición de cobre.

El proceso productivo de una fundición sigue el esquema de una transformación química en que el concentrado, que contiene Cu, Fe y S, reacciona con aire enriquecido con oxígeno a alta temperatura, para dar óxidos de Fe (escoria), SO<sub>2</sub> y cobre (Lagos et al., 2021). Las etapas en las que se desarrolla este proceso consisten en la preparación de los concentrados de cobre (secado, tostación), la fusión, conversión, limpieza de escorias, refinación y tratamiento de gases. A continuación, se describe de forma general cada una de estas etapas y las tecnologías asociadas a ellas, así como los parámetros específicos de los equipos y tecnologías utilizadas.

#### **3.1.2.1 Descripción de las tecnologías utilizadas en el proceso de fundición**

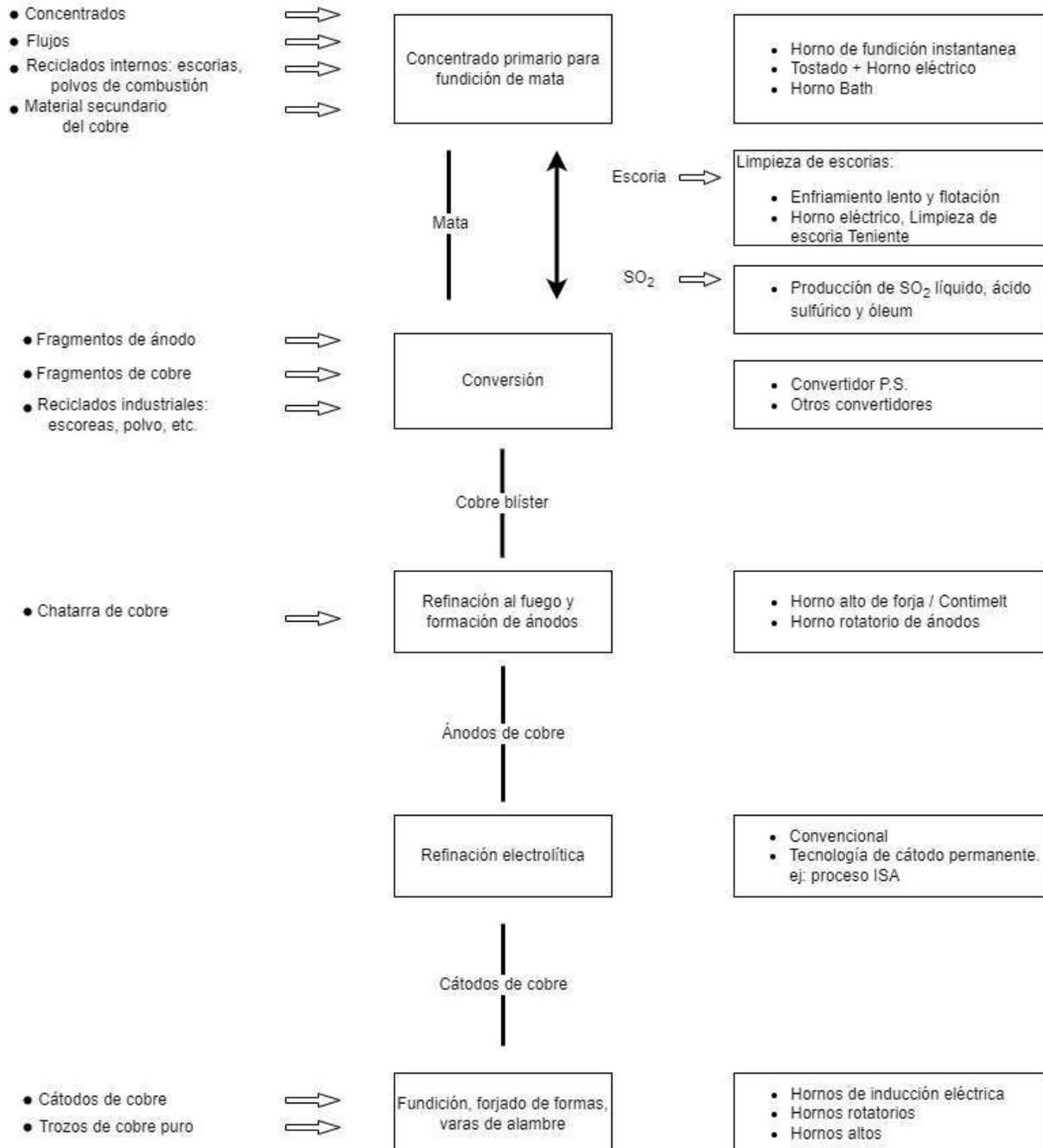
##### a) Descripción general de las etapas del proceso de fundición y tecnologías asociadas

A continuación, se presenta el diagrama de flujo simplificado de las etapas de fundición del cobre (Figura 3-6), además de una descripción de los procesos desarrollados en fundiciones de cobre

---

<sup>40</sup> En Chile, hay solo dos fundiciones independientes, que son Hernán Videla Lira (HVL) de ENAMI, y Altonorte, que pertenece a Glencore.

(Tabla 3-4) y durante la preparación de los concentrados. Luego, se proporciona una descripción de las tecnologías pirometalúrgicas de producción de cobre en uso en el mundo, por proceso (Tabla 3-6, Tabla 3-7, Tabla 3-8, Tabla 3-9 y Tabla 3-10).



**Figura 3-6 Diagrama de flujo simplificado de las etapas de fundición del cobre**

Fuente: Elaboración propia a partir de (JRC, 2017)

A continuación, se proporciona la descripción de los principales procesos del diagrama anterior y de etapas previas a la fundición *sensu stricto*, a saber, el secado y tostación, que se consideraron en el marco del análisis de las tecnologías pirometalúrgicas (Tabla 3-4). Estas dos etapas se realizan en instalaciones que corresponden a las denominadas “otras fuentes emisoras de arsénico” a las cuales se hace referencia en este estudio en complemento de las fundiciones *sensu stricto*. Cabe destacar que la tostación no es una etapa que siempre se realiza durante la preparación de los concentrados de cobre; actualmente está siendo utilizada principalmente al usar reactores de lecho fluidizado. Para efectos del análisis presentado a continuación, en el resto de esta sección, se utilizará el término fundición en sentido amplio, incluyendo la etapa de preparación de concentrados realizada en secadores y plantas de tostación que pueden funcionar como entidades separadas de la fundición en sí. Cabe destacar que la etapa de limpieza de escorias (4) y de tratamiento de gases (6) consisten en la depuración de residuos (sólidos, efluentes y emisiones) provenientes de diversas partes de la cadena de procesamiento del cobre. Lo anterior permite la recuperación de las escorias, del ácido sulfúrico, y de subproductos u otros productos menores de la minería del cobre. Además de las razones ambientales asociadas a estos procesos de limpieza, estas etapas son relevantes para las fundiciones en términos económicos, porque estas pueden aumentar sus ganancias si logran recuperar más elementos valiosos y/o valorizables, además del cobre (ver detalles en Sección 3.1.1.2).

**Tabla 3-4 Descripción de los principales procesos desarrollados en las fundiciones de cobre**

Proceso	Descripción del proceso	Productos y residuos
<b>Preparación de concentrados (1)</b>	Secado: Deshumidificación del concentrado procedente de la etapa de concentración, permitiendo alcanzar niveles de humedad parcial o total.	Producto(s): Concentrado de cobre seco  Residuos: Gases, polvo de tostación (en general recuperados) y vahos limpios
	Tostación: Calentamiento del concentrado hasta una temperatura y condiciones tales que, sin producir la fusión de los constituyentes, provoca una transformación química de los componentes en línea con los tratamientos posteriores. La tostación oxidante se utiliza para remover el S y As ligados a los minerales sulfurados y reemplazarlos total o parcialmente por oxígeno, lo que conlleva la emisión de SO <sub>2</sub> y As, el que es abatido y estabilizado. Se habla de tostación parcial cuando se realiza una oxidación parcial de los sulfuros de concentrados y eliminación parcial de S contenido en estos.	Producto(s): Calcina  Residuos: Gases (SO <sub>2</sub> ), polvo de tostación con As (en general recuperados) y vahos limpios
<b>Fusión (2)</b>	Concentración a alta temperatura (1.150°C a 1.250 °C) de los concentrados para producir dos fases líquidas separables gracias a la inmiscibilidad lograda en el proceso, compuestas por una fase rica en Cu (mata) y una fase rica en FeO <sub>x</sub> (escoria).	Producto: Alternativamente denominado Mata, Eje o Metal Blanco (MB) de cobre  Residuos: Escorias de fusión y gases

<b>Conversión (3)</b>	<b>Conversión discontinua:</b> Transformación de la mata en cobre blíster para eliminar Fe, S y las otras impurezas.  Se realiza en distintas cargas, es decir por lote ( <i>batch</i> ). Depende de condiciones locales, tipo de horno, calidad del cobre blíster y especificación del producto.	Producto: Blíster, cobre metálico líquido no refinado con una pureza de 96-98%  Residuos: Escorias de conversión y gases
	<b>Conversión continua:</b> Transformación de la mata en cobre blíster para eliminar Fe, S y las otras impurezas.  Ingreso constante de mata de cobre y un sangrado continuo del cobre blíster. Depende de condiciones locales, tipo de horno, calidad del cobre blíster y especificación del producto.	Producto: Blíster, cobre metálico líquido no refinado con una pureza de 96-98%  Residuos: Escorias de conversión y gases
<b>Limpieza de escorias (4)</b>	Limpieza de impurezas que se realiza en varias etapas del proceso de fundición, a saber, en la fusión de los concentrados, en la conversión y en la refinación.	Producto: Metal blanco Residuos: Descarte de escorias y gases (incluyen As)
<b>Refinación (5)</b>	Formación de los ánodos mediante refinación en hornos de ánodos y moldeo	Producto: Ánodo de cobre Residuos: Escorias y gases
	Formación de cátodos mediante refinación electrolítica	Producto: Cátodo de cobre Residuos: <ul style="list-style-type: none"> <li>Barro anódico (impurezas de Au, Pd, Pt, Se, Te que precipitan al fondo de la celda)</li> <li>Descarte de electrolito: Otras impurezas del ánodo (As, Bi, Co, Fe, S, Ni, Sb)</li> </ul>
<b>Tratamiento de gases (6)</b>	Planta de Limpieza de Gases	Producto: Gases depurados Residuos: Efluentes y gases no limpios (incluyen As)
	Planta de ácido sulfúrico: Canaliza el flujo de SO <sub>2</sub> de la etapa de fusión y conversión, manteniendo una operación estable que facilita tener una máxima captura del SO <sub>2</sub> producido.	Producto: Ácido sulfúrico Residuos: Efluentes y gases (incluyen As)

Fuente: Elaboración propia en base a (Agencia de Sostenibilidad Energética, 2015; COCHILCO, 2021; JRC, 2017; Lagos et al., 2021)

Para cada una de las etapas de la fundición descritas anteriormente, existen distintas tecnologías, que pueden variar según el país donde se opera, la compañía, el tipo de roca y la propia configuración del sitio de la fundición. Además, con los avances tecnológicos y nuevos desarrollos en general realizados por las mismas compañías, se observan tendencias y preferencias por ciertos equipos, así como recambios de tecnologías en fundiciones existentes después de largos

periodos de uso. Así, a lo largo de la historia de la fundición, se ha observado una gran evolución tecnológica tanto en los equipos utilizados como en las asociaciones de tecnologías que se suelen hacer en la fundición (e.g. asociación de un horno en particular con un convertidor en particular).

A grandes rasgos, la literatura indica que, en fundiciones existentes, las tecnologías en uso son comúnmente los hornos *bath* y *flash*, y el Convertidor Peirce-Smith (CPS). Además, Lagos et al. (2021) indican que se observa una marcada retirada del mercado de reactores de fusión en baño (*bath*) como el Convertidor Teniente (CT), y en menor medida del reactor Noranda porque sus capacidades de captura de SO<sub>2</sub> y eficiencias de recuperación de energía son inferiores a las de los hornos *flash*. También, según COCHILCO (2017), en nuevas fundiciones, la tecnología AUSmelt/ISASMELT y las tecnologías *Bottom Blowing Reactors* o *Furnaces* (BBR o BBF) recientemente desarrolladas en China estarían sobrepasando la tradicional tecnología *flash* (ver detalles adicionales en la Figura 3-7).

b) Descripción detallada de las tecnologías en uso en el mundo por etapa de fundición

En esta subsección, para cada etapa del proceso de fundición descritas anteriormente (1 a 6), se proporciona una descripción detallada de las tecnologías en uso en el mundo.

En la Tabla 3-5, se proporciona la descripción de las tecnologías en uso en el mundo para la etapa de preparación de los concentrados de cobre (1). Se detallan tres tipos de secadores y en materia de tostación, se detalla el caso del Tostador de DMH. Esta innovación tecnológica desarrollada por CODELCO es destacable porque permite tratar minerales de cobre que tienen un alto contenido de As; se obtienen resultados muy satisfactorios en cuanto al nivel de pureza que se logra en los concentrados de cobre tostados (sus contenidos de As son inferiores a 0,3% en promedio) (Lagos et al., 2021). Además, cabe señalar que en la última década llegaron al mercado nuevos tipos de reactores que no requieren la etapa de secado; es por ejemplo el caso de los hornos ISASMELT que pueden aceptar concentrados con humedades mayores a 2%, y los reactores de fusión en baño *Top Submerged Lance* (TSL) y los reactores chinos BBR o BBF que usan concentrados directamente desde el filtro de la planta concentradora, con una humedad de alrededor de 8% (2021) (estos se detallan posteriormente en la Tabla 3-6 y la Tabla 3-7).

**Tabla 3-5 Descripción de los procesos y tecnologías en uso en el mundo para la etapa de preparación de los concentrados de cobre**

Proceso	Tecnología(s) existentes	Descripción del proceso y tecnología(s)	% obtenido
<b>Secado</b>	Secador giratorio de calor directo	Transferencia de calor principalmente por convección. Permite un secado rápido, pero requiere espacio y mayores requerimientos de mantención que otros tipos de secadores.	0,2% de humedad (porcentaje variable de un secador al otro)
	Secador giratorio de calor indirecto	Transferencia de calor principalmente por conducción, donde el material entra en contacto solo con la superficie caliente del cilindro que es calentada externamente con gases de combustión o vapor. Posee un costo de operación y mantención menor al utilizar vapor y en especial con recuperación de calor de los hornos de fundición.	0,2% de humedad (porcentaje variable de un secador al otro)
	Secador de dispersión (Lecho fluidizado)	Partículas están expuestas a un flujo de aire de secado continuo de entrada y de salida. Permite lograr un secado uniforme y temperatura homogénea del producto. Considera un consumo de combustible menor que el secador de calor directo, generalmente petróleo.	0,2% de humedad (porcentaje variable de un secador al otro)
<b>Tostación</b>	Planta de tostación de Ministro Hales	Tostación parcial mediante el control del acceso de aire para oxidar sólo una parte del sulfuro de hierro. Este tostador permite disminuir significativamente la concentración de As en las calcinas.	Calcina (concentrado de cobre tostado) con contenidos de As inferiores a 0,3% en promedio, y S en torno a 20%.

Fuente: Elaboración propia en base a (Agencia de Sostenibilidad Energética, 2015; Lagos et al., 2021)

A continuación, se proporciona las principales tecnologías en uso en las fundiciones operando en el mundo, para la etapa de fusión de los concentrados de cobre (2) (Tabla 3-6) y para la conversión (3) (Tabla 3-7). Si bien estas etapas corresponden a distintos tipos de equipos, en la literatura se suelen describir juntas porque funcionan en asociación durante el proceso de fundición.

Los hornos de fusión Outokumpu desarrollados en Finlandia y los hornos INCO canadienses fueron los primeros desarrollos de tecnologías alternativas a los hornos de reverbero y hornos eléctricos, los que usaban energía de combustibles fósiles y energía eléctrica. Dichos hornos de fusión, denominados “hornos *flash*”, logran la oxidación del concentrado en un quemador equivalente a un quemador de carbón, y canalizan la totalidad del SO<sub>2</sub> generado con objeto de neutralizar el azufre, eliminando por completo las emisiones de SO<sub>2</sub> al ambiente (Lagos et al., 2021). La tecnología *flash* se consolidó al mismo tiempo que la tecnología de plantas de oxígeno se hizo más abordable, lo que permitió aumentar la eficiencia energética de la oxidación, con el enriquecimiento con oxígeno del aire de proceso.

Simultáneamente a lo anterior surgieron también otras tecnologías que han demostrado su eficacia y ahora son ampliamente utilizadas, como el Convertidor Teniente (Chile, CODELCO) y el Reactor Noranda (Canadá, Noranda, hoy Glencore), íconos de los denominados hornos de “fusión en baño” o *bath* (Lagos et al., 2021). De acuerdo a fuentes expertas (Lagos et al., 2021), estos equipos están entre los primeros que se consolidaron para modernizar las fundiciones como alternativa a los hornos *flash*, con costos de inversión y operación menores.

Posteriormente a ellos, en la última década llegaron al mercado tecnológico hornos que no requieren el secado de concentrados, lo que permite disminuir los costos de fundición; estos son por ejemplo los reactores de fusión *Top Submerged Lance* (TSL) y los reactores chinos de soplado por el fondo BBR/BBF, ambos clasificados como reactores de fusión en baño. Los TSL dieron lugar al desarrollo de los reactores AUSmelt e ISASmelt que son iguales y respectivamente comercializados por Outotec y Glencore Technologies (Lagos et al., 2021). A su vez, los BBR/BBF se introdujeron en el año 2015, estos son similares al Reactor Noranda y CT salvo que la inyección del gas enriquecido se realiza a una velocidad muy superior a esos reactores, lo que se asocia a mejoras en el proceso (Lagos et al., 2021).

**Tabla 3-6 Descripción de las tecnologías en uso en el mundo para la etapa de fusión de los concentrados de cobre**

Proceso	Tecnología(s) existentes	Descripción del proceso y tecnología(s)	% de cobre obtenido
<b>Fusión <i>flash</i></b>	Horno <i>flash</i> Outotec (ex – Outokumpu) o INCO	<p>Combustión de las partículas de concentrado en suspensión en altas torres de reacción, por sobre la zona de baño.</p> <p>Luego, las partículas que reaccionaron caen en una cámara de sedimentación donde tiene lugar la separación de la mata y la escoria. A veces se usa combustible adicional en el sedimentador para mantener la temperatura.</p> <p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Los procesos Outotec y ciclónico utilizan enriquecimiento de oxígeno y el proceso INCO utiliza oxígeno puro.</li> <li>• El horno <i>flash</i> también se utiliza para producir cobre blíster directamente en el caso de concentrados con bajo contenido de Fe/escoria, como en el caso australiano (Olympic Dam) y polaco (Glogow II).</li> </ul>	<p>Metal Blanco: 45%-75%</p> <p>Escoria: 1%-3%, Salvo en el caso australiano (Olympic Dam) y polaco (Glogow II) donde el porcentaje de Cu de la escoria es de 12% a 25%.</p>
<b>Fusión <i>bath</i></b>	Horno reverbero, de eje/alto, eléctrico, Ausmelt/ISASMELT, Mitsubishi, Convertidor Noranda, Convertidor El Teniente (CT), Baiyin y Vanyukov	<p>Aprovechamiento de la energía producto de las reacciones de oxidación y fundición que ocurren en un baño fundido dentro del reactor, con la separación de la escoria y la mata y el sangrado de diversas formas.</p> <p>Algunos hornos pueden funcionar sin el pre-secado del concentrado, pero la presencia de vapor de agua sobrecalentado aumenta el volumen de gas y disminuye la eficiencia energética del proceso.</p> <p>Generalmente funciona con un horno de retención o un decantador por separado.</p>	<p>Metal Blanco: 45%-75%, alrededor de 70% en el caso del CT.</p> <p>Escoria: 1%-3%</p>

Proceso	Tecnología(s) existentes	Descripción del proceso y tecnología(s)	% de cobre obtenido
		<p><u>Características de distintos tipos de hornos de fusión <i>bath</i>:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El horno reverbero no utiliza el contenido energético de S y Fe en el concentrado, sino que se basa en el uso de combustibles fósiles para fundir los concentrados a través de los gases de combustión calientes que barren el hogar. El contenido de SO<sub>2</sub> de los gases de escape es normalmente muy bajo, por lo que no pueden tratarse en una planta de ácido. No se utiliza en países de la UE.</li> <li>• Se desconoce tasa de producción superior del horno Ausmelt/ISASMELT.</li> <li>• Hasta ahora en el caso del horno Mitsubishi se alcanzaron niveles de producción superiores a 200.000 t/año, en esquemas de fundición continua.</li> <li>• Convertidor Noranda/Teniente (CT): En el CT el horno bascular está equipado con toberas que inyectan aire enriquecido en oxígeno (36-40%) y toberas que inyectan el concentrado con aire dentro del baño de mata. El CT es extensamente utilizado en las fundiciones chilenas, Zambia, Cananea en México, y Tailandia. En comparación con el reactor Noranda, el CT tiene los orificios de sangrado de mata y escoria en lados opuestos, lo que genera un movimiento en contra corriente de mata y escoria en el horno. Existen reactores que son una combinación del convertidor Noranda y CT, como el de la fundición Altonorte en Chile.</li> <li>• Sobre la tecnología Baiyin no se dispone de un análisis definitivo, se estiman tasas de producción de hasta 75.000 t/año de Cu.</li> <li>• Existen 6 hornos industriales con tecnología Vanyukov en Rusia y Kazajstán.</li> </ul>	
<b>Fusión <i>shaft</i></b>	Horno <i>shaft</i>	<p>Cilindro vertical con revestimiento refractario en el que se mantiene un lecho fijo (o columna descendente) de sólidos, y a través del cual se fuerza una corriente ascendente de gas caliente.</p> <p>Se utiliza específicamente para concentrados de bajo grado con un bajo contenido de azufre y un alto contenido de carbono.</p> <p>A diferencia de otros hornos, el horno <i>shaft</i> debe combinarse con procesos que puedan recuperar la energía y el contenido de azufre de los gases.</p>	<p>Metal Blanco: 45%-75%</p> <p>Escoria: 1%-3%</p>
<b>Fusión Mixta</b>	Hornos <i>flash</i> y <i>bath</i>	Combinación de distintos tipos de tecnología de hornos de fusión, principalmente hornos de fusión en <i>flash</i> y baño.	<p>Metal Blanco: 45%-75%</p> <p>Escoria: 1%-3%</p>
<b>Fusión de concentrados complejos</b>	Hornos <i>Bottom blowing furnaces</i> (BBF)	<p>Nueva tecnología de soplado por el fondo, desarrollada en China por la fundición Jinfeng e introducida en 2015. Son de gran similitud al reactor Noranda y CT, salvo que la inyección del gas enriquecido se realiza a una velocidad muy superior a estos, lo que determina mejoras en el proceso. También existe hornos <i>side blown furnaces</i> (SBF).</p> <p>Funcionan de manera integrada con los convertidores <i>Bottom blowing reactors</i> (BBR) (ver Tabla 3-7)</p>	<p>Metal Blanco: 45%-75%</p> <p>Escoria: 1%-3%</p>

Fuente: Elaboración propia en base a (COCHILCO, 2021; JRC, 2017; Lagos et al., 2021; Universidad de Chile, 2010)

A continuación, se proporciona una descripción de las tecnologías en uso en el mundo para la etapa de conversión del metal blanco (MB) (Tabla 3-7), durante la cual se produce el cobre blíster y escoria que se sangran para su posterior procesamiento. Existen dos procesos de conversión de mata, que son la conversión discontinua con tecnologías que funcionan por lote (*batch*), la cual es la más común, y la conversión continua en la que el proceso de conversión de cobre nunca para y funciona con un flujo constante en la situación ideal. El típico proceso discontinuo tiene carguío, soplado, escoriado y evacuación de cobre blíster; en este todos los periodos son fuentes de emisiones fugitivas.

En las fundiciones de cobre, a nivel mundial, el convertidor Peirce-Smith (CPS) es uno de los más usados en las fundiciones existentes. La ventaja de este convertidor es su simplicidad, la posibilidad de fundir escoria, *scrap* de cobre y toda clase de materiales reciclados (Universidad de Chile, 2010). En cuanto a la conversión continua, la literatura indica que la configuración doble “*flash*” es la óptima para nuevas fundiciones, pero la inversión resulta ser más cara que otras alternativas de conversión.

**Tabla 3-7 Descripción de las tecnologías en uso en el mundo para la etapa de conversión de los concentrados de cobre**

Tipo de conversión	Tecnología	Descripción de la tecnología	% de cobre obtenido
Conversión discontinua (*)	Convertidor Peirce-Smith (CPS)	Basado en la rotación del horno y una boca central que permite descargar la escoria y el cobre blíster producido.	Blíster: 99,0% en promedio  Escoria: 8%-12%
	Convertidores Hoboken	Convertidor tipo sifón que es una variación del CPS. La succión de gas hace mínimas las emisiones fugitivas de gases a través de la boca, durante el carguío, escoriado y evacuación del cobre blíster. El convertidor está equipado con un sistema de enfriamiento de gas por convección, lo que permite mantener un alto contenido de SO <sub>2</sub> . No obstante, se ve limitado en su capacidad de incorporar carga fría.	Blíster: 98,5%
	Hornos AUSmelt/ISASMELT utilizados para la conversión	Conversión por lotes de mate en cobre blíster. La remoción de impurezas es levemente menos efectiva que en los CPS.	Blíster: 96%
Conversión continua	Horno Mitsubishi (fusión y conversión integradas)	Emplea un reactor de fusión con lanzas de soplado e inyección de concentrado que operan sobre el baño. Este reactor alimenta gravitacionalmente y en forma ininterrumpida un reactor decantador donde se separa la escoria y la fase rica en cobre, la que sigue fluyendo en forma continua hasta el convertidor.  Flujo continuo de SO <sub>2</sub> que es canalizado hacia la planta de ácido sulfúrico.	Blíster: 96% Cu en escoria: 14% - 16%

Tipo de conversión	Tecnología	Descripción de la tecnología	% de cobre obtenido
	“Doble flash”, Kennecott-Outotec flash	La mata se granula primero en agua, se tritura y se seca. Luego, el material se mezcla con agentes de escoria y se alimenta al quemador de concentrado de un horno <i>flash</i> específico usando una atmósfera rica en oxígeno; la conversión tiene lugar en las partículas transportadas por el aire. Se produce una alta y constante concentración de SO <sub>2</sub> que se recupera. La remoción de impurezas lograda es menos efectiva para matas de alta ley.	Blíster: 96% Cu en escoria: 14% - 20%
	Hornos de lecho empacado	Oxidación de la mata de cobre con un flujo de aire o aire enriquecido con O <sub>2</sub> en contracorriente. El carácter vertical del reactor permite aumentar la superficie de contacto entre el material y el flujo de aire, lo que permite lograr una mayor capacidad de tratamiento en un menor espacio.  Tecnología desarrollada por la Universidad de Chile y la fundición HLV de ENAMI en la última década.	Blíster: 96%
	Reactores <i>Bottom blowing reactors</i> (BBR)	Tecnologías de baño mediante soplado inferior, lo que permite una optimización del proceso y la minimización de algunos aspectos negativos (ej. ruido). Existe también el soplado superior ( <i>top-blowing</i> ) y lateral ( <i>side-blowing</i> ) diferente por la posición del ingreso de aire.  Funcionan de manera integrada con los Hornos <i>Bottom blowing furnaces</i> (BBF) (ver Tabla 3-6)	Blíster: 96%

Nota: (\*) La conversión discontinua implica que se debe esperar el término del procesamiento de una carga de mata de cobre para seguir con la otra.

Fuente: Elaboración propia en base a (COCHILCO, 2021; CODELCO, 2019; Díaz Marinovic, 2012; JRC, 2017; Universidad de Chile, 2010)

Respecto a la limpieza de escorias, esta se puede realizar a través de distintas alternativas, destacando la vía metalúrgica (chancado, molienda y flotación de escorias) y pirometalúrgica mediante hornos de reducción (COCHILCO, 2015). A continuación, se describen las principales tecnologías de limpieza de escorias<sup>41</sup> utilizadas para separar el cobre contenido en las escorias que se forman a lo largo del proceso de fundición (Tabla 3-8).

<sup>41</sup> Las escorias son producidas varias etapas del proceso de fundición en el que son sangradas, mediante canaletas selladas hacia instalaciones de limpieza de escorias. Según la etapa y la tecnología utilizada, el porcentaje de Cu que estas contienen puede variar (a título de ejemplo, la escoria sangrada de un CPS puede contener niveles de Cu equivalentes a 8% y 12%, los cuales se consideran como altos). Las escorias con contenidos de cobre mayor al 1% no

Para la recuperación de cobre mediante la vía pirometalúrgica, las dos alternativas comúnmente utilizadas son el Horno Eléctrico (HE) y el Horno de Limpieza de Escorias (HLE)<sup>42</sup>. En términos generales, la recuperación de cobre en la limpieza de escorias se logra mediante la reducción de la magnetita, la cual permite disminuir la viscosidad de la escoria facilitando la sedimentación de cobre contenido en ésta que se encuentra como mata y como cobre metálico, depositándose en la parte inferior del horno para luego ser retirado y recirculado a los convertidores (Universidad de Chile, 2010). Consiguiente a esa etapa, se obtienen dos fases que son el metal blanco y la escoria descartable. Adicionalmente, cabe resaltar que, después de la fusión, en algunos casos se realiza una etapa de granallado que consiste en la granulación del material fundido con el fin de eliminar el material de sobretamaño. Lo anterior se hace por gravedad y mediante escurrimiento de agua. De este proceso, se genera la escoria granulada con un alto contenido de Cu que permite su reprocesamiento como carga fría al horno de fundición (CODELCO, 2019).

---

pueden ser tratadas como escorias de descarte y deben ser sometidas a procesos de limpieza para la recuperación del metal aun con beneficio económico (Universidad de Chile, 2010).

<sup>42</sup> Para efectos de este capítulo, estos equipos se describen aquí por separado, sin embargo, en la práctica, se suele referir alternativamente a los HE, o a los HLE, o a ambos a la vez, mediante la abreviatura “HLE/HE”. Dicha abreviatura es la que se ocupa a continuación en este informe.

**Tabla 3-8 Tecnologías de limpieza de escorias**

Tecnología	Descripción de la tecnología	% de cobre obtenido
<b>Horno eléctrico (HE)</b>	<p>Reducción de la magnetita y óxido de cobre mediante el uso de carbón coque y bajo la acción de los electrodos sumergidos. Para mantener una atmósfera reductora, se mantiene una capa de carbón coque sobre la superficie del baño de escoria, y a consecuencia de las reacciones de este proceso, se forma CO, CO<sub>2</sub> y otras sustancias volátiles como SO<sub>2</sub>, H y metales gaseosos.</p> <p>Los gases generados se conducen a precipitadores electrostáticos donde son depurados.</p>	<p>Cu en metal blanco HE: 71%</p> <p>Cu en escoria descartable: 0,80%</p>
<b>Horno Eléctrico de Limpieza de Escoria (HLE)</b>	<p>También denominado Horno Teniente de limpieza de escorias, su acción consiste en reducir la magnetita que se encuentra en el baño de escoria. Para ello, se inyecta por medio de las toberas una mezcla de combustible y aire, en una proporción reductora. Cuando se usa petróleo en la reducción, las reacciones del proceso producen hollín y humos negros, ya que el craqueo del petróleo en su paso por las toberas y el baño genera carbón que no reacciona.</p> <p>El HLE posee dos toberas ubicadas en el manto del horno y tiene una boca que es por donde se carga y descarga la escoria. Los gases generados se conducen a chimeneas simples de evacuación de gases.</p>	<p>Cu en metal blanco HLE: 70%</p> <p>Cu en escoria descartable: 0,70%</p>
<b>Proceso metalúrgico</b>	<p>La mayoría de las fundiciones están optando por reemplazar los HE/HLE a este proceso, ya que genera menores emisiones de As y S y tiene una mayor recuperación metalúrgica. Sin embargo, es utilizado solo cuando hay suficiente espacio disponible y los relaves pueden ser correctamente tratados y dispuestos.</p> <p>Incluye sistemas para el enfriamiento lento de escorias, prechancado, chancado, molienda, flotación y secado del concentrado de escoria para el retorno al proceso de fusión.</p> <p>Se estima una captura y abatimiento de As entre 4 y 5% del total ingresado a la fundición y abatimiento de S de 0,8%. La mejora en la recuperación del cobre es entre 1,5 y 1,8%.</p>	<p>Recuperación de un 93% de Cu en el caso de Altonorte</p>

Fuente: Elaboración propia en base a (COCHILCO, 2021; CODELCO, 2019; JRC, 2017; Universidad de Chile, 2010; COCHILCO, 2015)

A continuación, se describen las tecnologías de refinación del cobre blíster producido en la etapa de conversión descrita anteriormente (Tabla 3-9), el que se refina en horno de ánodos. Hay dos tipos de hornos anódicos, el denominado horno bascular (Maertz) y el horno reverbero, ambos funcionando por lote. El horno de reverbero es usado en un pequeño número de fundiciones, principalmente en fundiciones que procesan cobre blíster sólido o restos de ánodos, mientras que los hornos basculares dominan como reactor de refinación en la mayoría de las fundiciones (Universidad de Chile, 2010). Adicionalmente, cabe destacar que no existe refinación a fuego continuo en el mundo hasta ahora, pero sí existe un proyecto piloto desarrollado por la Universidad de Chile y ENAMI en la fundición HVL (2010). En la tabla siguiente, se detallan a

grandes rasgos los procesos desarrollados en hornos anódicos, seguidos por el moldeo de los ánodos y la refinación electrolítica.

**Tabla 3-9 Tecnologías de refinación**

Tecnología	Descripción de la tecnología	% de cobre obtenido
<b>Hornos anódicos</b>	<p>Limpieza de las impurezas del cobre blíster (Au, Ag, As, Sb, Bi y Fe) en los hornos anódicos mediante refinación cíclica. Cada horno opera de forma secuencial en base a las etapas siguientes: llenado, oxidación, escoriado, reducción y vaciado.</p> <p>Dos tipos de hornos: horno bascular (Maertz) y horno reverbero</p> <p>Se aplican varios reductores: petróleo pesado, petróleo Diésel, gas reformado, propano, amoníaco y el viejo y clásico apaleo con árboles húmedos o secos.</p>	Cobre anódico: 99,6% de pureza.
<b>Rueda de moldeo</b>	Solidificación del ánodo fundido por contacto con el aire ambiente en planchas de cobre (ánodos). Opera en base a energía eléctrica.	Ánodos: 99,6% a 99,7% de pureza.
<b>Refinación electrolítica</b>	<p>Los ánodos provenientes de la fundición se colocan en una celda electrolítica que contiene un cátodo de dimensiones levemente superior a la del ánodo. Al aplicar una diferencia de potencial o voltaje de unos 0,3V entre el ánodo y el cátodo, se genera una corriente eléctrica que es proporcional a la deposición de cobre en el cátodo y que causa la disolución electroquímica del cobre en el ánodo.</p> <p>El proceso para producir un cátodo de 50 a 80 kg dura entre 6 y 12 días, al cabo de la cual este es extraído con una grúa y llevado a una instalación en donde el cobre depositado es separado mecánicamente del acero inoxidable de la placa madre.</p>	<p>Cobre de grado A, de alta pureza con impurezas de 25 ppm de O (0,0025%) y menos de 65 ppm (0,0065%) de otras impurezas.</p> <p>Cobre de grados de pureza superior al grado A: Libre de O y con impurezas menores a 5 ppm (0,0005%).</p>

Fuente: Elaboración propia en base a (Lagos et al., 2021)

Por último, se describen las tecnologías de tratamiento de gases primarios utilizadas a lo largo del proceso de fundición (Tabla 3-10). La principal medida de control ambiental, con la que todas las fundiciones cuentan, es la limpieza y tratamiento de gases primarios, de alta concentración en SO<sub>2</sub> realizada en Planta de limpieza de gases (PLG). En esta se realiza primero la fijación de MP y volátiles en polvos (cámaras y precipitadores electrostáticos), luego la fijación de As en una planta de lavado, neutralización y disposición de efluentes. Posteriormente se realiza la fijación del SO<sub>2</sub> como ácido sulfúrico de calidad comercial en plantas de ácido sulfúrico.

La captura de los gases primarios tratados en PLG consiste en enfriarlos, preparándolos para la precipitación electrostática de los polvos de fundición, en un reactor que transforma el calor en vapor y recupera el calor. Una fracción del polvo precipita (aproximadamente el 70% del total) al enfriar el gas de proceso. Después, los gases de fundición pasan por precipitadores electrostáticos los que remueven más del 99% de los polvos. Los polvos de fundición contienen cobre e impurezas, y pueden ser recirculados a la fundición o bien tratados mediante métodos hidrometalúrgicos (Lagos et al., 2021).

En las plantas de ácido, el dióxido de sulfuro se convierte a trióxido de sulfuro. Los gases con baja concentración de  $\text{SO}_2$  son más costosos de procesar que los gases con altas concentraciones porque implican el uso de tecnologías adicionales (e.g. tratamiento de gases de cola mediante lavado). Esta problemática se observa en los casos en que se usan CPS, convertidores que solo permiten obtener blíster con una baja concentración de  $\text{SO}_2$ , sin embargo existen tecnologías más modernas, con fusión y conversión integradas, que han superado este problema (Lagos et al., 2021). En cuanto a los gases generados en los procesos de refinación y de limpieza de escorias, estos no presentan concentraciones suficientes de  $\text{SO}_2$  para ser procesados en plantas de ácido, sin ser sometidos previamente a un proceso de concentración del  $\text{SO}_2$ . De acuerdo a un estudio realizado por la Universidad de Chile (2010), no habrían aplicaciones de este tipo a nivel industrial en las fundiciones de cobre.

Por último, en ocasiones también se utilizan las plantas de tratamiento de gases de cola (PTGC), las que se añaden a continuación de las plantas de ácido sulfúrico para aumentar aún más el porcentaje de captura del  $\text{SO}_2$ . A esta planta ingresa el gas con el  $\text{SO}_2$  remanente luego de pasar por la planta de ácido, y mediante lavado con agua fría (por ejemplo, agua de mar o peróxido de hidrógeno), se absorbe el  $\text{SO}_2$  y se forma ácido sulfúrico.

**Tabla 3-10 Tecnologías de tratamiento de gases primarios**

Tecnología	Descripción de la tecnología	% de pureza obtenido en los productos
<b>Planta de Limpieza de Gases (PLG)</b>	<p>Acondicionamiento de los gases metalúrgicos primarios en la fusión para su utilización como insumo en la producción de ácido sulfúrico.</p> <p>Los gases llegan a la PLG mediante una torre refrigerada antes de pasar a una caldera donde se enfrían hasta 350DC (proceso a través del cual se puede recuperar calor), y de pasar por precipitadores electrostáticos que terminan su depuración.</p>	-
<b>Planta de ácido sulfúrico</b>	<p>Posteriormente a la preparación de los gases mediante un proceso de limpieza húmeda de los gases, los gases pasan consecutivamente por la torre de secado, la planta de contacto, y la torre de absorción. La planta de contacto es el módulo principal de la planta de ácido, donde el SO<sub>2</sub> se convierte a trióxido en presencia de un catalizador (pentóxido de vanadio) (*).</p> <p>Se utilizan principalmente plantas de ácido sulfúrico de doble contacto, o doble absorción.</p> <p>Existen también plantas de simple contacto con tasas de recuperación inferiores, y procesos de contacto húmedo (<i>Wet Contact Process</i>, WCP).</p> <p>(*) En el caso de la Fundición Altonorte chilena, se utiliza un catalizador que contiene cesio.</p>	<p>Doble contacto: Recuperación hasta 99,7% de SO<sub>2</sub>.</p> <p>Simple contacto: Máximo 98%</p> <p>Nota: Existe tecnología para recuperación hasta 99,9%.</p>
<b>Planta de tratamiento de gases de cola (PTGC)</b>	<p>El SO<sub>2</sub> remanente en el gas luego de pasar por la planta de ácido sulfúrico (gases de cola), pasa por esta planta en donde el SO<sub>2</sub> es absorbido en agua fría (por ejemplo, agua de mar o peróxido de hidrógeno) seguido de extracción al vacío y recuperación de ácido sulfúrico, el cual puede ser aprovechado en otros procesos.</p>	Aumento de la captura de SO <sub>2</sub> entre 0,4 y 0,6%

Fuente: Elaboración propia en base a (COCHILCO, 2021; CODELCO, 2019; COPRIM, 2012; JRC, 2017; Lagos et al., 2021; Universidad de Chile, 2010)

Cabe señalar que además de las tecnologías presentadas anteriormente, se utilizan dispositivos específicos de abatimiento y tratamiento de gases secundarios principalmente destinados a limitar las emisiones fugitivas de aquellas tecnologías (e.g. campanas secundarias, filtros de mangas, etc.). Estos se presentan a continuación en el caso de Estados Unidos, además de ser parte de la sección detallada sobre los equipos de abatimiento (ver Sección 4.3).

La Tabla 3-11 muestra una síntesis del estudio "*Technology Review for the Primary Copper Smelting Source Category*" (US-EPA & Laney, 2021), en el cual se analiza las instalaciones de Kennecott, Asarco y Freeport de Estados Unidos. Se muestran las medidas existentes con las que cuenta cada etapa de las instalaciones y medidas de abatimiento para cumplir con un objetivo en particular, como reducir emisiones de SO<sub>2</sub> o de MP.

**Tabla 3-11 Medidas de abatimiento de instalaciones en Estados Unidos**

Fundición	Etapas	Equipo	Medida existente	Medida de abatimiento	Objetivos
Asarco	Convertidores	CPS (batch)	-	Sistema de gases primario, campanas secundarias, convertidores más grandes, campanas primarias. planta de ácidos (en vez de la cámara de filtros previa). sistema de colector de gases terciarios de convertidor, mejoras en la inyección (secundario y una nueva cámara de gases); para reducir 90% de SO <sub>2</sub>	Reduce SO <sub>2</sub>
Freeport	Convertidores	Hoboken (batch)	Convertidor retractable de "cubrebocas" (excepto durante operaciones de carga y extracción). Tubos de escape de gases combinados con los gases del horno de fundición y luego planta de ácidos	Captura de emisiones fugitivas, scrubber	Reduce SO <sub>2</sub>
Asarco	Plantas de limpieza de escoria	Enfriamiento y reciclado de escoria	-	-	-
Kennecott	Plantas de limpieza de escoria	Granuladores	Scrubber que funciona en 3 etapas, sistema de gases secundarios	-	-
Freeport	Plantas de limpieza de escoria	Horno eléctrico	Enfriador con rociador de agua y planta de ácidos	-	-
Kennecott	Hornos anódicos	2 a gas natural con quemadores de oxígeno	Torre de enfriamiento, inyección de limos, cámara de gases, 2 scrubbers para escape de gases de horno anódico. Enfriamiento y cámara de filtros para gases de escape del horno, luego chimenea central	-	-
Asarco	Hornos anódicos	3 hornos	Filtro de mangas	-	-

Fundición	Etapas	Equipo	Medida existente	Medida de abatimiento	Objetivos
<b>Freeport</b>	Hornos anódicos	2 Peirce-Smith	Filtro de mangas, enfriador con rociador de agua y planta de ácidos	Scrubber (luego a la planta de ácidos)	-
<b>Kennecott</b>	Emisiones fugitivas de polvo	-	-	Plan de control (puede incluir rociador de agua, reposeras de polvo químico, colar material por debajo del nivel del suelo, pantallas contra el viento cerca de la fuente)	-
<b>Asarco</b>	Emisiones fugitivas de polvo	-	-	Plan de control (puede incluir rociador de agua, reposeras de polvo químico, colar material por debajo del nivel del suelo, pantallas contra el viento cerca de la fuente)	-
<b>Freeport</b>	Emisiones fugitivas de polvo	-	-	Plan de control (puede incluir rociador de agua, reposeras de polvo químico, colar material por debajo del nivel del suelo, pantallas contra el viento cerca de la fuente)	-
<b>Kennecott</b>	Sistema de gases secundarios	Filtro de mangas y scrubber de base de sodio	-	-	-
<b>Asarco</b>	Sistema de gases secundarios	Filtro de mangas	-	-	-
<b>Freeport</b>	Sistema de gases secundarios	Sistema de ventilación de humos con scrubber químico, precipitador electroestático húmedo	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

## c) Parámetros específicos de los equipos y tecnologías utilizados en las fundiciones de cobre

Además del rendimiento descrito en la Sección 3.1.1.3, existen otros parámetros de importancia para la eficiencia lograda por las fundiciones de cobre e instalaciones asociadas, como la vida útil y los aspectos relativos a la mantención de los equipos y tecnologías utilizados en estas. Cabe resaltar que las fundiciones de cobre e instalaciones asociadas existentes en el mundo están en operación desde la primera mitad del siglo XX para las más antiguas, o posteriormente, por lo que en estas se ha ido cambiando equipos por obsolescencia, de acuerdo con la aparición de innovaciones tecnológicas más eficientes que equipos previamente utilizados. En la literatura no se encontraron estimaciones de la vida útil de los sitios de fundición en su conjunto, sin embargo, sí hay valores específicos a ciertos equipos utilizados en estas. La vida útil de un equipo depende de la tecnología utilizada; por ejemplo, en materia de hornos de fusión y lanzas de oxígeno, la literatura indica que los reactores chinos de soplado, en particular de soplado por el fondo, tienen mayor vida útil que otros tipos de hornos como el CT (Vallejos & Olivares, 2017). También, la vida útil de un equipo depende de condiciones externas como el cumplimiento de las exigencias de mantención realizadas mediante ciclos en todas las fundiciones. A continuación, se lista el tiempo de uso recomendado hasta el recambio de algunos equipos utilizados en fundiciones de cobre, valores que son asimilables a la vida útil de dichos equipos (Tabla 3-12); la información encontrada está solo disponible para equipos cuyo objetivo es la captura de azufre o el control de emisiones de chimeneas de fundiciones. Si bien los valores presentados son propios a fundiciones de cobre chilenas, estos son aplicables en el caso de cualquier fundición de cobre.

**Tabla 3-12 Tiempos de uso asimilables la vida útil de equipos utilizados en fundiciones de cobre**

Objetivo del Equipo	Tiempo de uso recomendado	Equipo	
Captura de azufre	15 años	Campanas Primarias CPS	
		Captación y tratamiento gases fugitivos de sangrías de CT y HLE/HE	
	20 años	18 años	Plantas de ácido doble absorción
		Adición de carga fría por Campana CPS	
		Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CPS	
		Captura y Tratamiento Gases Sangrías FSF	
40 años	Nueva Planta de ácido doble absorción con torre desmercurizadora		
Control de emisiones en chimeneas	18 años	Plantas de ácido simple contacto	
		Limpieza y Tratamiento gases metalúrgicos HLE/HE	
	20 años	Eliminación humos negros y opacímetro HA	
		Infraestructura monitoreo control	
		Tratamiento Gases de Cola PAS	

Fuente: Elaboración propia en base a (COPRIM, 2012)

En cuanto a los ciclos de mantención que se realizan en las fundiciones de cobre, se habla de mantenciones largas y cortas, donde en el caso de las mantenciones cortas se hacen ajustes y limpieza de toberas mientras que en las mantenciones más largas generalmente hay recambio de revestimientos y ajustes mayores. Estas se presentan en la Tabla 3-13 en el caso de la fundición de Altonorte, Chile.

**Tabla 3-13 Ejemplos de mantenciones cortas y largas realizadas en la fundición Altonorte, Chile**

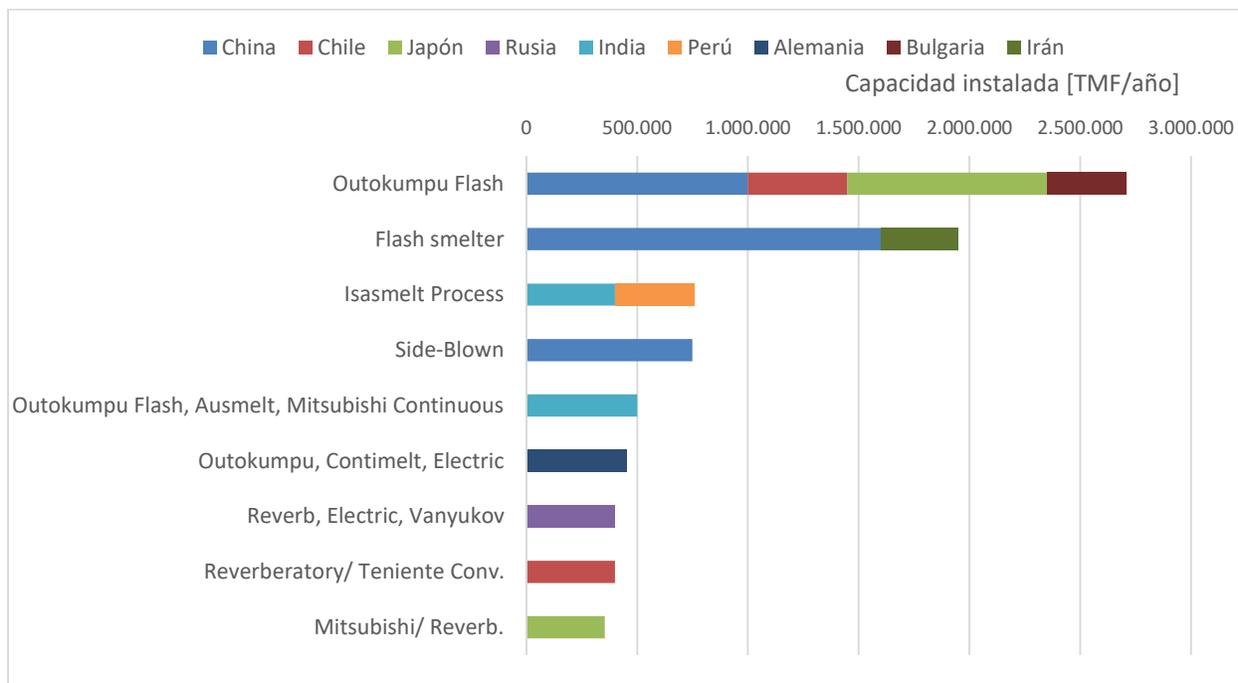
Tipo de mantención	Lugar	Motivo mantención	Frecuencia
Mantención corta	Fundición	Mantenimiento Línea Toberas RX	6 semanas
	PLE	Cambio Tromel	4 semanas
Mantención larga	Fundición	Cambio Revestimiento Refractorio Reactor	24 meses
	PLE	Cambio Corazas Molino SAG	3 meses
	PTP	Cambio Revestimientos TK	12 meses

Siglas utilizadas: Planta Tratamiento Escoria (PLE), Planta Tratamiento Polvo (PTP)

Fuente: Elaboración propia en base a entrevista realizada a la fundición Altonorte

### 3.1.2.2 Distribución de las tecnologías y capacidades asociadas para la fundición de cobre en el mundo

A continuación, se presenta la distribución de tecnologías o asociaciones de tecnologías utilizadas en el top 20 de las fundiciones de cobre primarias existentes a nivel mundial (Figura 3-7), y el detalle asociado en la Tabla 3-14. Se puede observar que actualmente, en ese top 20, la tecnología asociada a la mayor capacidad es *Outokumpu Flash* con 2,71 millones de toneladas métricas anuales, seguida por *Flash smelter* con 1,95 millones de toneladas métricas anuales. En ambos casos, los operadores/dueños que operan/poseen la mayor capacidad son de China, con 37% en fundiciones con tecnología *Outokumpu Flash* y 82% en fundiciones con tecnología *Flash smelter*. En el caso de Chile, en las dos fundiciones que aparecen en este top 20, en el caso de Chuquicamata se utiliza la tecnología *Outokumpu Flash* (correspondiente al 17% de la capacidad existente en el top 20 de las fundiciones a nivel mundial), mientras que en El Teniente (Caletones) se usa una combinación de tecnologías que son *Reverberatory/ Convertidor Teniente*. Cabe señalar que, de acuerdo con esta clasificación por capacidad de las fundiciones a nivel mundial, las demás fundiciones chilenas no entran en el top 20 mundial, por lo tanto, sus equipos no están representados en las siguientes figura y tabla.



**Figura 3-7 Capacidad de procesos/tecnologías del top 20 de las fundiciones de cobre primarias existentes a nivel mundial [TMF/año]**

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a The World Copper Factbook (International Copper Study Group, 2021)

**Tabla 3-14 Capacidad de procesos/tecnologías del top 20 de las fundiciones de cobre existentes a nivel mundial, por país**

País	Proceso	Operador/Dueño	Nombre de la fundición	Capacidad [TMF/año]
China	Outokumpu Flash	Jiangxi Copper Corp.	Guixi (smelter)	600.000
		Yanggu Xiangguang Copper Co	Xiangguang copper (smelter)	400.000
	Flash smelter	Chinalco	Chinalco Southeast Copper smelter)	400.000
		Jinchuan Non-Ferrous Metal Co.	Jinchuan (Fangchenggang smelter)	450.000
		Tongling Nonferrous Metals Corp. (57.4%), Sumitomo 35%), Pingguo Aluminium Co.	Jinlong (Tongdu)	350.000
		Tongling Non-Ferrous Metals Group	Jinguan (smelter)	400.000
	Side-Blown	Chifeng Jinfeng (Yunnan Copper 45%, Taisheng 45%, Jinfeng Copper 10%)	Chifeng	400.000
		Jiangxi Copper Corp. (Zhejiang Jiangtong Fuye Heding Copper Co., Ltd.)	Heding Copper	350.000
<b>Subtotal, China</b>				<b>3.350.000</b>

País	Proceso	Operador/Dueño	Nombre de la fundición	Capacidad [TMF/año]
Chile	Outokumpu Flash (*)	Codelco	Chuquicamata (smelter)	450.000
	Reverberatory/ Teniente Conv.	Codelco	El Teniente (Caletones)	400.000
<b>Subtotal, Chile</b>				<b>850.000</b>
Japón	Outokumpu Flash	JX Nippon Mining & Metals Co., Ltd.	Saganoseki/ Ooita (smelter)	450.000
		Sumitomo Metal Mining Co. Ltd.	Besshi/ Ehime (Toyo)	450.000
	Mitsubishi/ Reverb.	Mitsubishi Materials Corp. (55.714%), Dowa Metals & Mining Co. Ltd. (31.621%), Furukawa Metals & Resources Co. Ltd. (12.665%)	Onahama/ Fukushima	354.000
<b>Subtotal, Japón</b>				<b>1.254.000</b>
Rusia	Reverb, Electric, Vanyukov	Norilsk Nickel	Norilsk (Nikelevy, Medny)	400.000
India	Isasmelt Process	Vedanta	Sterlite Smelter (Tuticorin)	400.000
	Outokumpu Flash, Ausmelt, Mitsubishi Continuous	Birla Group (Hidalco)	Birla Copper (Dahej)	500.000
<b>Subtotal, India</b>				<b>900.000</b>
Perú	Isasmelt Process	Southern Copper Corp (Grupo Mexico 88.9%, international investment community 11.1%)	Ilo Smelter	360.000
Alemania	Outokumpu, Contimelt, Electric	Aurubis	Hamburg	450.000
Bulgaria	Outokumpu Flash	Aurubis (99.77%)	Pirdop (smelter)	360.000
Irán	Flash smelter	National Iranian Copper Industry Co.	Sarchesmeh Copper Complex smelter)	350.000
<b>Total, Capacidad Países</b>				<b>8.274.000</b>

(\*) Desde el año 2019, la fundición de Chuquicamata de CODELCO funciona solo con la tecnología *Outokumpu Flash* mientras que antes tenía *Outokumpu Flash* y un Convertidor Teniente.

Fuente: Elaboración propia a partir de The World Copper Factbook (International Copper Study Group, 2021)

### 3.1.3 Identificación de contaminantes emitidos

Los principales contaminantes emitidos por una fundición corresponden al SO<sub>2</sub>, polvo y partículas con contenido de metales tóxicos, por ejemplo, As<sup>43</sup>, así como otros elementos trazas (e.g. Hg).

<sup>43</sup> Existen otros contaminantes no emitidos al aire sino contenidos en los efluentes o los residuos sólidos, como las escorias, generados a lo largo de la cadena de producción. Estos están fuera del alcance del análisis proporcionado en esta sección.

Los contaminantes son emitidos en la forma de sólidos (hollín, humos negros), gases (SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, entre otros), y vapores o sólidos re-sublimados. El hollín corresponde a MP que pueden contener trazas de metales contenidos en los concentrados tales como As, Pb, Cd, Hg, Cr, Cu y Ni.

Tal como se presentó anteriormente (Sección 3.1.2.1), parte de los contaminantes de los gases emitidos (y los contenidos en los demás residuos) pueden ser tratados y en ciertos casos valorizados, mientras que hay una determinada fracción que no es recuperable. Por lo anterior, es de suma importancia recalcar en qué etapa(s) se generan los contaminantes emitidos durante el proceso de fundición, y tener identificado cuál es su origen.

A continuación, se presentan los contaminantes emitidos por etapa, origen y punto de descarga específico de los equipos tecnológicos utilizados en las fundiciones de cobre (Tabla 3-15). Uno de los principales contaminantes emitidos son el SO<sub>2</sub> contenido en gases primarios emitidos durante la fundición; este se captura y recupera en la planta de ácido sulfúrico. Además, se emite hollín en todas las etapas del proceso de fundición salvo en la etapa de secado de los concentrados, este se constituye de As y otros elementos menores. (ver Tabla 3-10).

**Tabla 3-15 Contaminantes emitidos al aire por fundiciones, por etapa y según equipo**

Etapa	Punto de descarga del contaminante	Origen del contaminante	Contaminante	Detalles del origen del contaminante
Preparación de concentrados (1)	Secador de concentrados	Proceso	SO <sub>2</sub>	Emisiones mediante chimenea(s)
			Hollín (MP con trazas de metales contenidos en los concentrados tales como Pb, Cd, Hg, Cr, Cu y Ni)	Emisiones de chimenea(s) de vahos/gases con vapor de agua desprendidos del concentrado y polvo arrastrado.
	Planta de tostación	Proceso	SO <sub>2</sub>	Emisiones mediante chimenea(s)
			Hollín (MP con trazas de metales contenidos en los concentrados tales como Pb, Cd, Hg, Cr, Cu y Ni)	Emisiones mediante chimenea(s)
			As	Emisiones mediante chimenea(s)
		Hornos y/o convertidores	Proceso	SO <sub>2</sub>

Etapa	Punto de descarga del contaminante	Origen del contaminante	Contaminante	Detalles del origen del contaminante
<b>Fusión (2) - Conversión (3)</b>			Hollín (MP con trazas de metales contenidos en los concentrados tales como Pb, Cd, Hg, Cr, Cu y Ni)	Producto de la reacción química del proceso.
				Partículas secundarias o mixtas productos de la condensación de los compuestos volátiles, incluyen As, Zn, Bi y otros metales volátiles (su contenido de Cu y Fe es bajo).
				Arrastre de partículas de concentrado que no reaccionaron (partículas primarias). Particularmente en hornos <i>flash</i> .
			As	Volatilización de As emitido en gases y polvos en emisiones fugitivas (mayor fuente de emisión de As en fundiciones que tratan los gases metalúrgicos en planta de ácido). Volatilización de As emitido en gases y polvos por chimeneas
<b>Limpieza de Escorias (4)</b>	Horno eléctrico	Combustible	SO <sub>2</sub>	Carbón coque
			CO, CO <sub>2</sub>	Carbón coque
			As	Carbón coque
	Procesos de limpieza de escorias	Proceso	SO <sub>2</sub>	Producto de la reacción química del proceso, SO <sub>2</sub> en bajas concentraciones.
Horno de limpieza de escorias	Combustible	Humos negros	Petróleo (craqueo)	
		Hollín (MP con trazas de metales contenidos en los concentrados tales como Pb, Cd, Hg, Cr, Cu y Ni)	Petróleo (craqueo)	
<b>Refinación (5)</b>	Hornos de refinación (e.g. hornos de tipo basculantes)	Combustible	Humos negros	Gas natural o licuado de petróleo
				Petróleo (craqueo) Nota: Se utiliza petróleo Diésel bajo en azufre o kerosene para evitar una posible contaminación con azufre durante la reducción.
			Hollín (MP con As, y posibles trazas de otros elementos menores)	Gas natural o licuado de petróleo Petróleo (craqueo) Nota: Se utiliza petróleo Diésel bajo en azufre o kerosene para evitar una posible contaminación con azufre durante la reducción.
		Proceso	SO <sub>2</sub>	Producto de la reacción química del proceso, SO <sub>2</sub> en bajas concentraciones. Emisiones de chimeneas de los hornos de refinación.

Etapa	Punto de descarga del contaminante	Origen del contaminante	Contaminante	Detalles del origen del contaminante
<b>Limpieza de Gases (6)</b>	Planta de ácido sulfúrico	Proceso	Hollín (MP con As, y posibles trazas de otros elementos menores)	Emitido en cantidades menores desde la planta de ácido sulfúrico.
			SO <sub>2</sub>	Emisiones por chimenea de los gases captados (no alcanzan a ser tratados).
			SO <sub>3</sub>	Emitido en gases de la producción de ácido sulfúrico (planta de doble absorción tienen mayor remoción del SO <sub>3</sub> ).
<b>Proceso completo de fundición</b>	Puntos de descarga de fugitivos	Proceso	Hollín (MP con As, y posibles trazas de otros elementos menores)	Emisiones fugitivas o emisiones secundarias de equipos de abatimiento del proceso de fundición, y en todos los puntos de descarga de material y en el transporte de productos fundidos.
			SO <sub>2</sub>	Emisiones fugitivas o emisiones secundarias de equipos de abatimiento del proceso de fundición, especialmente de reactores <i>batch</i> (e.g. CPS), y en menor medida en todos los puntos de descarga de material y en el transporte de productos fundidos.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Lagos et al., 2021; Universidad de Chile, 2010; US-EPA, 1995)

Además, en la Tabla 3-16 se presentan los contaminantes identificados anteriormente según el efecto en la salud que provocan en caso de exposición, así como los niveles de exposición recomendados asociados que establecen las fuentes expertas en materia de calidad del aire y protección de la salud de las personas.

Se observa que los efectos más severos se obtienen en el caso de la exposición al As en el aire, contaminante para el cual se recomienda la exposición cero de las personas. Además, se puede apreciar que los niveles más bajos recomendados de exposición son para Pb, cuyos impactos a la salud son severos en el caso de las personas vulnerables como los niños, así como en el caso de altas concentraciones y de exposición crónica. Además, en el caso del hollín/MP con eventuales trazas de metales pesados de fuentes emisoras al aire, se observa que afectan la salud de las personas en el caso de una exposición prolongada y/o crónica. En el caso del SO<sub>2</sub>, si bien los impactos a la salud pueden variar según el tipo de exposición a la cual hacen frente las personas, incluso en el caso de una exposición a muy corto plazo, puede causar daños significativos.

**Tabla 3-16 Niveles de exposición a contaminantes emitidos al aire por fundiciones recomendados y efectos a la salud**

Contaminantes	Tipo de exposición	Efecto en la salud	Nivel de exposición máximo recomendado		
			Anual [µg/m <sup>3</sup> ]	Diario [µg/m <sup>3</sup> ]	Otro intervalo [Unidad indicada]
Hollín/MP con eventuales trazas de metales pesados	Exposición prolongada y/o repetida	<p>Efectos en el sistema respiratorio, en diversidad de enfermedades, dependiendo de la edad, género, inmunidad, entre otros</p> <p>Nota: Para los elementos trazas contenidos en los concentrados de cobre tales (Pb, Cd, Hg, Cr, Cu, Ni, y As) para los cuales no se presentan valores de exposición máximos en esta tabla, referirse a la Tabla 6-18 Contaminantes y sus efectos sobre la salud.</p>	MP2,5: 5 MP10: 15  Fuente: (WHO, 2021)	MP2,5: 15 MP10: 45  Fuente: (WHO, 2021)	n/a
Pb	Exposición de público vulnerable, e.g. Niños	Posibles daños severos en sistema nervioso central y la función renal.	0,5  Fuente: WHO para Europa (2000b)	n/a	n/a
	Exposición en altas concentraciones	Concentración de Pb en la sangre >15 µ/dL puede causar problemas con fertilidad, sistema cardiovascular, desordenes nerviosos, disminución de la función de los riñones, entre otros, en adultos.	0,5  Fuente: WHO para Europa (2000b)	n/a	n/a
	Exposición crónica	Efectos en la presión sanguínea, sistema inmunológico, e interferencia con el metabolismo de la vitamina D.	0,5  Fuente: WHO para Europa (2000b)	n/a	n/a
As	Altos niveles de concentración	Efectos agudos como irritación severa de mucosa nasal, laringe, y bronquios provocando secuelas, e.g. perturbaciones al sistema nervioso periférico, y efectos reversibles en sistema hematopoyético.	Exposición no recomendada por el WHO para Europa (2000b).  Los daños que conlleva la exposición de todo tipo afectan la esperanza de vida de las personas.		

Contaminantes	Tipo de exposición	Efecto en la salud	Nivel de exposición máximo recomendado		
			Anual [µg/m <sup>3</sup> ]	Diario [µg/m <sup>3</sup> ]	Otro intervalo [Unidad indicada]
	Exposición crónica	Puede afectar al ADN e inhibir el proceso de reparación del ADN. Cáncer y lesiones pre cancerígenas se han asociado al arsénico. Esto incluye aumento en la mortalidad por cáncer pulmonar y cáncer de piel.			
SO <sub>2</sub> <sup>(1)</sup>	Exposición a muy corto plazo	Efectos neurológicos, cardiovasculares y otros efectos sistémicos. Puede crear problemas pulmonares crónicos. Contribuye a la lluvia ácida, la cual impacta la salud humana por su exposición dermal, ingesta, inhalación.	n/a	40 Fuente: (WHO, 2021)	500 µg/m <sup>3</sup> (Media en 10 minutos) (OMS 2005)
	Exposición a corto plazo	Puede afectar el sistema respiratorio.	n/a	40 Fuente: (WHO, 2021)	500 µg/m <sup>3</sup> (Media en 10 minutos) Fuente: (WHO, 2006)
	Exposición crónica	Síntomas de asma y respiratorios.	n/a	40 Fuente: (WHO, 2021)	500 µg/m <sup>3</sup> (Media en 10 minutos) Fuente: (WHO, 2006)
CO <sup>(2)</sup>	Exposición en concentraciones moderadas	En concentraciones moderadas, puede dar como resultado angina, visión deficiente y disminución de la función cerebral.	n/a	n/a	100 mg/m <sup>3</sup> (15 minutos)
	Exposición prolongada/ en altas concentraciones	Efectos nocivos cardiovasculares y neuropsicológicos. Los efectos agudos se deben a la formación de carboxihemoglobina en la sangre, que inhibe la entrada de oxígeno. La exposición prolongada/ en altas concentraciones al CO puede ser fatal.			35 mg/m <sup>3</sup> (1 hora)
					10 mg/m <sup>3</sup> (8 horas) Fuente: WHO para Europa (2000b) ( <i>Indoor</i> )  Nota: Límite estimado a no sobrepasar en la sangre es igual a 2,5% de CO (según ecuación de Coburn-Forster-Kane).

Nota:

 (1) El estándar disponible encontrado se indica solo para SO<sub>2</sub>.

(2) El estándar disponible encontrado se indica solo para CO.

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.4 Asociaciones relevantes

Además, de acuerdo con el AP42 (US-EPA, 1995), hay asociaciones de tecnologías asociadas a distintos niveles de emisiones de partículas y SO<sub>2</sub> de tipo fugitivas<sup>44</sup>. En la Tabla 3-17, se presentan las emisiones asociadas a ejemplos de asociaciones. Se observa que, los equipos tecnológicos están asociados a distintos niveles de emisiones de partículas y SO<sub>2</sub>, por sus características intrínsecas y también según las asociaciones con otros equipos que estos requieren en la operación.

Por ejemplo, en las asociaciones presentadas en la Tabla 3-17, el tostador de solera múltiple genera más emisiones que los secadores, de manera notable en el caso de las partículas, y de manera muy significativa en el caso del SO<sub>2</sub>. Asimismo, en el caso del tipo de horno, se observa que, en las configuraciones listadas en la tabla, el horno de reverberación genera menos emisiones que el horno eléctrico, el cual está asociado a menos emisiones que el horno *flash*, de manera más importante para el SO<sub>2</sub> que para las partículas. Adicionalmente, se puede apreciar también que las emisiones de partículas de convertidores no varían según las tecnologías utilizadas en las asociaciones presentadas, mientras que en el caso de las emisiones de SO<sub>2</sub> sí pueden variar significativamente. Finalmente, se observa que, el horno *flash* se asocia a emisiones de partículas más altas que el resto de los otros hornos y a emisiones de SO<sub>2</sub> sustancialmente más altas que los demás hornos de las asociaciones presentadas (dicha asociación es además la única que considera el uso adicional de un horno de limpieza en esta comparación).

**Tabla 3-17 Asociaciones de procesos/tecnologías y emisiones asociadas**

[kg<sub>contaminante</sub>/Mg<sub>concentrado procesado por la fundición</sub>]

Equipos en configuración	Partículas				SO <sub>2</sub>			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
Horno de reverberación (2) seguido de convertidor (3)	-	25	18	-		160	370	-
Tostador de solera múltiple (1) seguido de horno de reverberación (2) y convertidor (3)	22	25	18	-	140	90	300	-
Tostador de lecho fluido (1) seguido de horno de reverberación (2) y convertidor (3)	s/d	25	18	-	180	90	270	-
Secador de concentrado (1) seguido de horno eléctrico (2) y convertidor (3)	5	50	18	-	0,5	120	410	-
Tostador de lecho fluido (1) seguido de horno eléctrico (2) y convertidor (3)	s/d	50	18	-	180	45	300	-
Secador de concentrado (1) seguido de horno <i>flash</i> (2), horno de limpieza (3) y convertidor (4)	5	70	s/d	s/d	0,5	410	0,5	120

<sup>44</sup> Varias etapas que se desarrollan en el sitio de la fundición son una fuente potencial de emisiones fugitivas (US-EPA, 1995), por ejemplo, en el caso del convertidor, a pesar de que la boca del convertidor está cubierta por una campana primaria para capturar los gases de escape, puede haber emisiones fugitivas en el espacio entre los dos equipos, así como durante el cargamento y vertido del material.

Equipos en configuración	Partículas				SO <sub>2</sub>			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
Secador de concentrado (1) seguido de reactores Noranda (2) y convertidor (4)	5	s/d	s/d	-	0,5	s/d	s/d	-

s/d: Sin datos

Fuente: Elaboración propia a partir del AP42 (US-EPA, 1995)

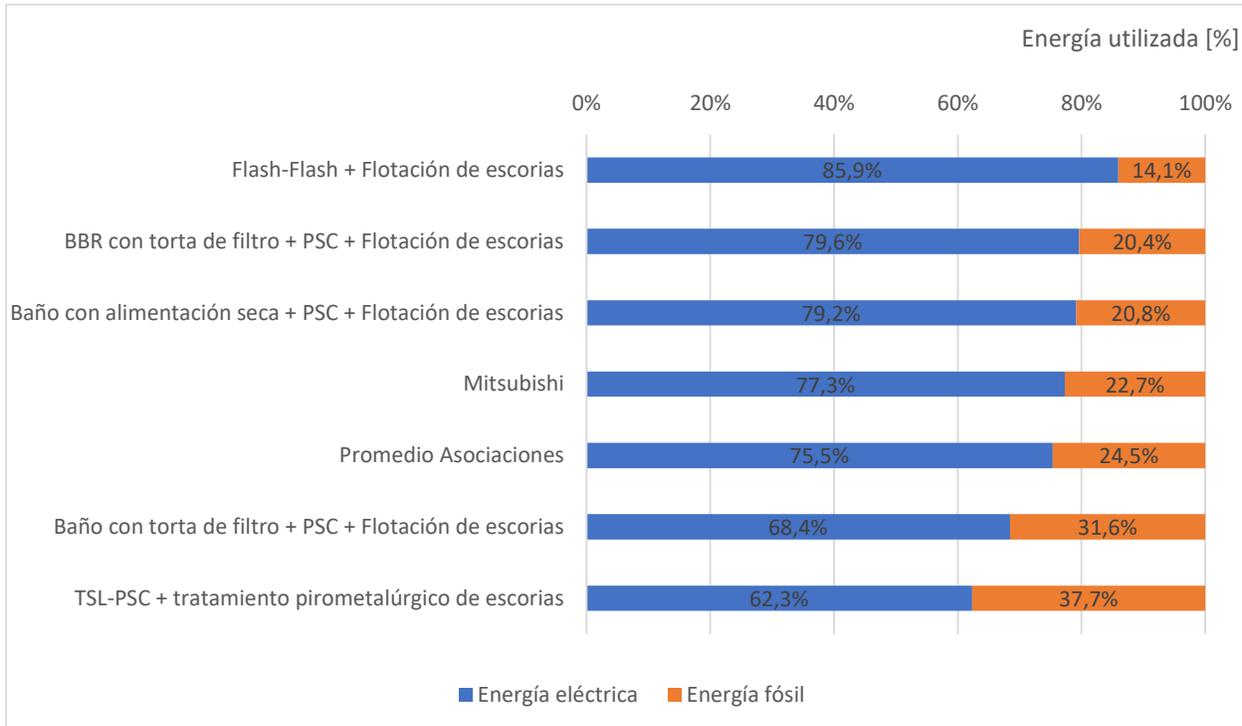
Además, se observan distintos consumos de electricidad y combustibles fósiles, o requerimientos energéticos, según las tecnologías y asociaciones de tecnologías utilizadas para la fundición de cobre. En la Tabla 3-18 se proporciona una comparación de los insumos energéticos requeridos para el funcionamiento de asociaciones comunes de tecnologías, donde la tecnología más reciente de todas es el reactor BBR desarrollado en China. Se puede observar que la asociación tecnológica con un mayor consumo energético total es el proceso de “Baño con torta de filtro + PSC + Flotación de escorias” mientras que el proceso “doble *flash*” con posterior flotación de escorias es la que se asocia al menor consumo energético total, y este es considerablemente menor al promedio de todas las asociaciones en estudio (es equivalente a alrededor de 92% del requerimiento de energía promedio de las asociaciones estudiadas).

**Tabla 3-18 Requerimientos de energía eléctrica y combustibles fósiles para asociaciones de tecnologías de la fundición de cobre**

Asociación de tecnologías	Energía requerida [MJ/ ton ánodo]			Energía eléctrica [%]	Energía fósil [%]
	Eléctrica	Fósil	Total		
Baño con torta de filtro + PSC + Flotación de escorias	8.946	4.127	13.073	68,4%	31,6%
Baño con alimentación seca + PSC + Flotación de escorias	10.088	2.657	12.745	79,2%	20,8%
Promedio Asociaciones	8.829	2.891	11.720	75,5%	24,5%
BBR con torta de filtro + PSC + Flotación de escorias	9.263	2.370	11.633	79,6%	20,4%
TSL-PSC + tratamiento pirometalúrgico de escorias	6.903	4.175	11.078	62,3%	37,7%
Mitsubishi	8.508	2.498	11.006	77,3%	22,7%
Flash-Flash + Flotación de escorias	9.266	1.518	10.784	85,9%	14,1%

Fuente: Elaboración propia a partir de (Coursol, Mackey, Kapusta, & Valencia, 2015; Lagos et al., 2021)

Adicionalmente, se presenta la distribución porcentual de los requerimientos de energía eléctrica y fósil de las asociaciones descritas anteriormente (Figura 3-8). Se puede apreciar que la asociación de tecnologías con mayor consumo de combustibles fósiles corresponde al sistema TSL-PSC junto con un tratamiento pirometalúrgico de escorias, mientras que el sistema doble *flash* junto con la flotación de escorias es el que se asocia al consumo de combustibles fósiles más bajo, mismo proceso que también tiene el menor requerimiento energético total de todas estas asociaciones.



**Figura 3-8 Distribución de los requerimientos en energía eléctrica y combustibles fósiles para asociaciones de tecnologías de la fundición de cobre**

Fuente: Elaboración propia a partir de (Coursol et al., 2015; Lagos et al., 2021)

Asimismo, se observan diferencias en el uso de combustibles de las tecnologías y asociaciones de tecnologías, debido a las características de funcionamiento de cada una de estas tecnologías. Los combustibles son utilizados mayormente en las operaciones de secado, para iniciar la operación y de ser necesario para mantener el equilibrio térmico en los hornos de fusión y conversión, ya que las reacciones en dichos hornos liberan calor, y como agentes reductores en los hornos de refinación (Lagos et al., 2021). En materia de tecnologías utilizadas en las asociaciones de equipos de fundiciones de cobre, se destacan los procesos autógenos tales como el Convertidor Teniente, Reactor Noranda, Horno Flash, y el CPS que no utilizan combustión para su operación, a diferencia de, por ejemplo, los hornos de reverbero. Si bien las tecnologías autógenas requieren el uso de combustibles al inicio<sup>45</sup>, dado que no lo requieren durante su operación, estas tienen menos emisiones asociadas a la combustión de combustibles que los hornos de reverbero (US-EPA, 1995). Sin embargo, dichos procesos autógenos sí tienen emisiones asociadas al procesamiento de la materia prima, por ejemplo, producen altas emisiones de SO<sub>2</sub> como producto de la oxidación del azufre contenido en los concentrados de cobre. Por lo anterior, estos requieren mantenciones regularmente para destapar las toberas por donde se inyecta el oxígeno,

<sup>45</sup> Esto es especialmente relevante en el caso de los CPS que deben mantenerse caliente entre sus procesos de soplado.

razón por lo cual las fundiciones suelen tener múltiples convertidores, CPS, por ejemplo, operando alternadamente.

Además, según COCHILCO (2017), la tecnología de fusión de baño es la preferida en la actualidad para nuevas fundiciones de cobre, con principalmente los hornos AUSmelt/ISASMELT y reactores chinos, porque esas tecnologías permiten una optimización de la fundición mediante un aumento de la velocidad de procesamiento del material. Además, según el *Joint Research Center* (JRC) de la UE (JRC, 2017), la asociación de una fundición *flash* Outotec y de un CPS permite lograr una tasa de fusión muy alta en la misma unidad, y dependiendo del diseño del horno y del tipo de concentrados de cobre procesado, es posible lograr 400.000 toneladas por año de cobre blíster. Si bien dicha configuración permite lograr altos rendimientos en la producción de cobre, otras fuentes indican que los CPS debido a que generan SO<sub>2</sub> de baja concentración, están asociados a mayores costos de limpieza de gases que otros equipos. Existen tecnologías más modernas con la integración de la fusión y conversión que no conllevan este tipo de problema.

Sin embargo, otras fuentes indican que, si bien la configuración doble “*flash*” es considerada como óptima en términos de rendimiento de cobre fundido, la inversión asociada resulta ser más cara que otras opciones. Lo anterior se explica porque existen alternativas de configuraciones tradicionales de tipo *Flash* y CPS o reactor de fusión en baño y CPS que logran altos estándares de captura, por sobre 99% (e.g. Aurubis Hamburgo, y la mayoría de las fundiciones japonesas). Según Lagos et al. (2021), esto demuestra que, si bien el tipo de tecnología es de alta importancia para la optimización del rendimiento de la fundición, la gestión operacional es también de suma importancia, especialmente en el manejo de las emisiones y efluentes. Por lo anterior, según los autores, no se puede plantear a priori que una configuración u otra permita maximizar la captura de SO<sub>2</sub>.

## 3.2 Mercado nacional

### 3.2.1 Identificación y caracterización de las fundiciones de cobre y fuentes emisoras existentes: tecnologías y procesos

La fundición de concentrados de cobre tiene como objetivo lograr una mayor concentración de cobre, a través de procesos que conllevan transformaciones químicas de los minerales sulfurados de cobre, hasta obtener ánodos de cobre de alta pureza. Las fundiciones son instalaciones complejas en la medida que su operación depende de características del concentrado, la tecnología disponible, las exigencias regulatorias, entre otras.

En esta sección, se identifica el origen de los concentrados de cobre, y se detalla la tecnología y equipos utilizados en las fundiciones nacionales, para cada etapa del proceso de fundición de cobre. Previamente a dicha descripción, en la Tabla 3-19 se presenta una compilación de las principales tecnologías y equipos, y sus marcas y/o modelos según etapa. Se observa que todas las fundiciones de cobre cuentan con equipos para todas las etapas, con distintas configuraciones.

**Tabla 3-19 Tecnología y equipos utilizados en fundiciones nacionales**

Fundición	Chuquicamata	Altonorte	Potrerrillos	Hernán Videla Lira	Ventanas	Chagres	Caletones
Sigla Fundición	DCH	ALN	POT	HVL	DVE	CHG	CAL
<b>Preparación de concentrados (Secado)</b>	1 Secador a vapor de tambor rotatorio Kumera	1 Secador a vapor Kumera	1 Planta de Secado Flusólido (PSFLUO) METSO MINERALS	1 Horno Secado de concentrado Fuller	1 Secador rotatorio Fuller	1 Secador Kumera	PSFLUO con 3 Hornos secadores de lecho fluidizado Metso
<b>Fusión</b>	1 Horno Flash (HF) Outokumpu	1 Reactor Noranda	1 Convertidor Teniente	1 Convertidor Teniente	1 Convertidor Teniente	1 HFOutotec	2 Reactores de fusión Teniente
<b>Conversión</b>	4 CPS	4 CPS	3 CPS	2 CPS	3 CPS	4 CPS	4 CPS
<b>Limpieza de escorias</b>	1 Planta Concentradora de Escoria (Flotación)	1 Planta Limpieza de Escorias (Flotación) Outotec	1 Planta de Flotación de Escorias Outotec	1 Horno Eléctrico Limpieza de Escorias DEMAG	1 Horno Eléctrico de Limpieza de Escoria	2 Hornos Limpieza de Escorias, Basculantes	1 Planta Limpieza de Escorias CT (Flotación) Outotec
<b>Refinación</b>	6 Hornos de Refino Basculantes 2 Hornos Fusión Scrap Basculante 3 ruedas de moldeo, Outotec (Twin)	3 Hornos de Refino Basculantes 2 Ruedas de Moldeo Outokumpu	2 Hornos de Refino CMS Chile S.A. 2 Ruedas de Moldeo DEMAG	1 Horno de Refino a fuego Wartsila 1 Rueda Moldeo Outokumpu	1 Horno de Retención, fabricación nacional 1 Horno Basculante Humboldt 2 Hornos de Refino Maerz 2 Ruedas de Moldeo Walker	2 Hornos de Refino Basculantes 1 Rueda de Moldeo Wenmec	4 Hornos de Refino Basculantes 1 Rueda de Moldeo Outokumpu 2 Ruedas de Moldeo Twin Outotec

Fundición	Chuquicamata	Altonorte	Potrerrillos	Hernán Videla Lira	Ventanas	Chagres	Caletones
Sigla Fundición	DCH	ALN	POT	HVL	DVE	CHG	CAL
<b>Tratamiento de gases</b>	2 Plantas de Ácido Sulfúrico MECS Dupont, SNC-L  1 Planta ATP SNC-L  3 Plantas de oxígeno, de marcas Kobe, Air Liquide, BOC  1 Sistema de Tratamiento de gases específico al secador, HF y HR, SNC Lavalin	2 Plantas de Ácido Lurgi/Outokumpu  1 Planta Tratamiento de Polvos (PTP)	1 Planta de Ácido de Contacto Doble Outotec	1 Planta de Ácido Lurgi  1 Planta de Ácido Monsanto  1 Planta de Tratamiento Gases de Cola (PTGC) MECS	1 Planta de Ácido Hugo Petersen  1 Planta oxígeno Air Liquide	1 Planta de Tratamiento Gases HLE GEA  1 Planta de Tratamiento de HR GEA  1 Planta de Ácido Lurgi/Monsanto	1 Planta Limpieza de Gases Mitsubishi  1 Planta Limpieza de Gases Kvaerner  2 Plantas Reducción de Emisiones CPPE  2 Planta Reducción Humos Hornos anódicos Dustex
<b>Fundición</b>	Chuquicamata	Altonorte	Potrerrillos	Hernán Videla Lira	Ventanas	Chagres	Caletones
<b>Sigla Fundición</b>	DCH	ALN	POT	HVL	DVE	CHG	CAL
<b>Preparación de concentrados (Secado)</b>	1 Secador a vapor de tambor rotatorio Kumera	1 Secador a vapor Kumera	1 Planta de Secado Fluosólido (PSFLUO) METSO MINERALS	1 Horno Secado de concentrado Fuller	1 Secador rotatorio Fuller	1 Secador Kumera	PSFLUO con 3 Hornos secadores de lecho fluidizado Metso
<b>Fusión</b>	1 Horno Flash (HF) Outokumpo	1 Reactor Noranda	1 Convertidor Teniente	1 Convertidor Teniente	1 Convertidor Teniente	1 HFOutotec	2 Reactores de fusión Teniente
<b>Conversión</b>	4 CPS	4 CPS	3 CPS	2 CPS	3 CPS	4 CPS	4 CPS

Fundición	Chuquicamata	Altonorte	Potrerosillos	Hernán Videla Lira	Ventanas	Chagres	Caletones
Sigla Fundición	DCH	ALN	POT	HVL	DVE	CHG	CAL
<b>Limpieza de escorias</b>	1 Planta Concentradora de Escoria (Flotación)	1 Planta Limpieza de Escorias (Flotación) Outotec	1 Planta de Flotación de Escorias Outotec	1 Horno Eléctrico Limpieza de Escorias DEMAG	1 Horno Eléctrico de Limpieza de Escoria	2 Hornos Limpieza de Escorias, Basculantes	1 Planta Limpieza de Escorias CT (Flotación) Outotec
<b>Refinación</b>	6 Hornos de Refino Basculantes 2 Hornos Fusión Scrap Basculante 3 ruedas de moldeo, Outotec (Twin)	3 Hornos de Refino Basculantes 2 Ruedas de Moldeo Outokumpu	2 Hornos de Refino CMS Chile S.A. 2 Ruedas de Moldeo DEMAG	1 Horno de Refino a fuego Wartsila 1 Rueda Moldeo Outokumpu	1 Horno de Retención, fabricación nacional 1 Horno Basculante Humboldt 2 Hornos de Refino Maerz 2 Ruedas de Moldeo Walker	2 Hornos de Refino Basculantes 1 Rueda de Moldeo Wenmec	4 Hornos de Refino Basculantes 1 Rueda de Moldeo Outokumpu 2 Ruedas de Moldeo Twin Outotec

Fundición	Chuquicamata	Altonorte	Potrerillos	Hernán Videla Lira	Ventanas	Chagres	Caletones
Sigla Fundición	DCH	ALN	POT	HVL	DVE	CHG	CAL
<b>Tratamiento de gases</b>	2 Plantas de Ácido Sulfúrico MECS Dupont, SNC-L  1 Planta ATP SNC-L  3 Plantas de oxígeno, de marcas Kobe, Air Liquide, BOC  1 Sistema de Tratamiento de gases específico al secador, HF y HR, SNC Lavalin	2 Plantas de Ácido Lurgi/Outokumpu  1 Planta Tratamiento de Polvos (PTP)	1 Planta de Ácido de Contacto Doble Outotec	1 Planta de Ácido Lurgi  1 Planta de Ácido Monsanto  1 Planta de Tratamiento Gases de Cola (PTGC) MECS	1 Planta de Ácido Hugo Petersen  1 Planta oxígeno Air Liquide	1 Planta de Tratamiento Gases HLE GEA  1 Planta de Tratamiento de HR GEA  1 Planta de Ácido Lurgi/Monsanto	1 Planta Limpieza de Gases Mitsubishi  1 Planta Limpieza de Gases Kvaerner  2 Plantas Reducción de Emisiones CPPE  2 Planta Reducción Humos Hornos anódicos Dustex

Fuente: Elaboración propia en base a información reportada por titulares en el marco del D.S. 28/2013 del MMA

### 3.2.1.1 Descripción de contenido de concentrados en Chile

En este apartado, se describe la composición de los concentrados de cobre que alimentan las fundiciones de cobre en el territorio nacional. Tal como se mencionó en la sección anterior, su composición varía dependiendo del lugar de extracción de la roca, y de fundición y/o refinación, etapas que en varios casos están integradas. El concentrado de cobre es un producto intermedio en la industria del metal y es el material inicial en el proceso de fundición.

La Tabla 3-20 presenta el origen de los concentrados de cobre que alimentan las distintas fundiciones del país, así como la planta de tostación de DMH. Esta planta prepara el concentrado de cobre que una vez transformado en calcina es enviado a dos fundiciones de CODELCO (Chuquicamata y Potrerillos). Cabe señalar que estas no se procesarán más en Potrerillos porque se determinó que dicha operación no es económicamente sustentable.

**Tabla 3-20 Orígenes de los concentrados de cobre por fundición**

Origen del concentrado	DMH	DCH	ALN	POT	HVL	VEN	CHG	CAL
Concentrado propio	Propio	Propio	-	Propio Salvador	-	-	Propio Angloamerican	Propio Teniente
	DCH	DMH		DCH				
		Radomir o Tomic		Calcinas DMH (*)				
Concentrado de terceros	-	-	CODELCO	Punta Cu	PyM Mineras	Ánodos CHG	Atacama Kozan	-
			Collahuasi	Candelaria	CODELCO		Matta	
			Cerro Corona	Trafigura			El Soldado	
			Casapalca	Caserones		Ánodos CAL	Teniente	
			Mantos Blancos	Sierra Gorda				

(\*) Se espera que a futuro no se sigan procesando calcinas en la fundición de Potrerillos.

Fuente: Elaboración propia basado en reportes técnicos y reuniones de antecedentes

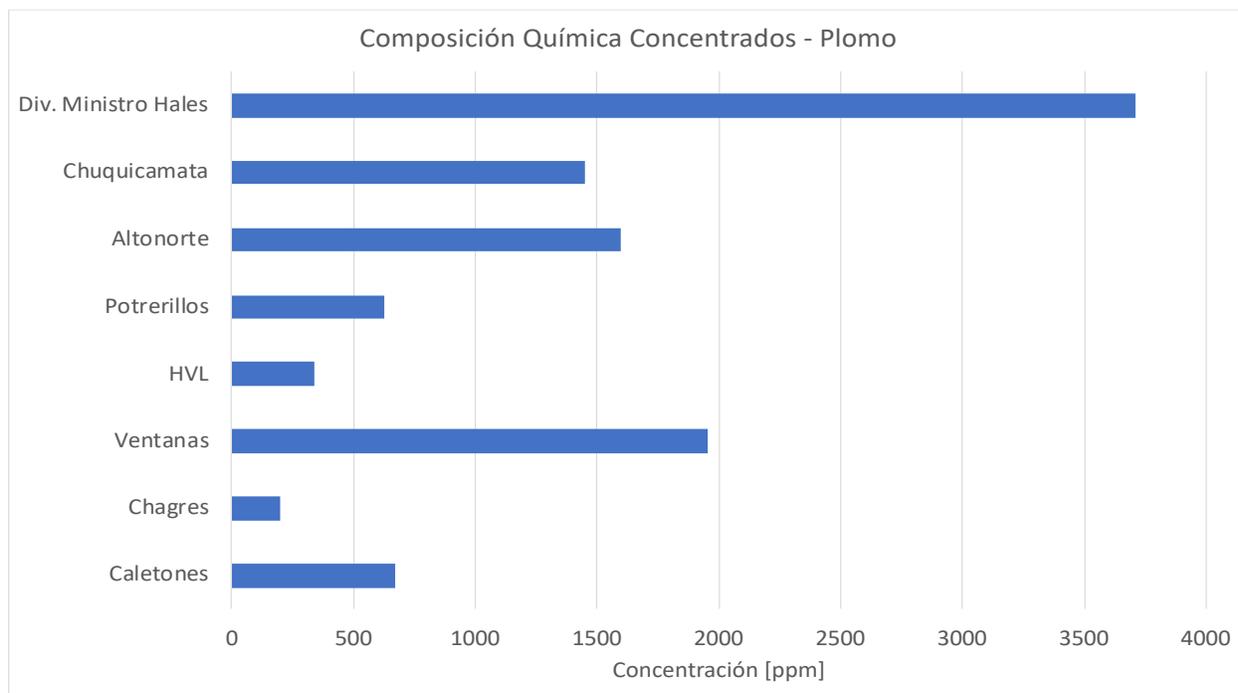
Luego, en la Tabla 3-21 se presenta la composición química promedio de los concentrados de cobre en plomo, cadmio, mercurio, y níquel, para cada una de las fundiciones nacionales, además de la planta de tostación de la División Ministro Hales.

**Tabla 3-21 Composición química promedio de los concentrados de cobre [ppm], año 2020**

Elemento	DMH	DCH	ALN	POT	HVL	VEN	CHG	CAL
<b>Pb</b>	3.711	1.447	1.599	623	337	1.954	197	669
<b>Cd</b>	293	98	40	203	25	22	18	12
<b>Hg</b>	5	3	2	5	14	91	4	3
<b>Ni</b>	48	26	14	210	154	222	49	42

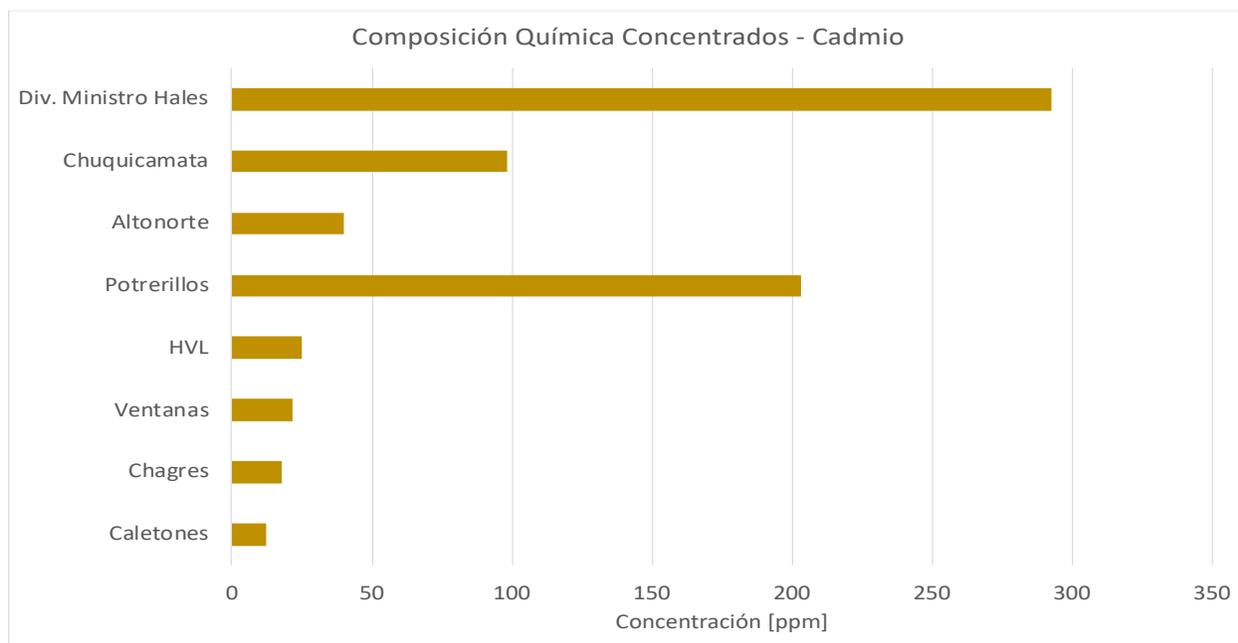
Fuente: Elaboración propia en base a reportes técnicos del año 2020

Adicionalmente, en las figuras siguientes (Figura 3-9, Figura 3-12, Figura 3-11 y Figura 3-10), se comparan los niveles de cada uno de los elementos químicos presentados anteriormente, contenidos en los concentrados de cobre que alimentan las fundiciones, además de la División Ministro Hales. Los valores provienen de los reportes técnicos en el marco del artículo 16 letra h) del D.S. 28/2013 del MMA. La División Ministro Hales es la que presenta el mayor valor en ppm para los elementos plomo y cadmio. En el mismo sentido, es destacable que la fundición de Chuquicamata recibe la calcina con niveles de plomo y cadmio considerablemente más bajos que en la planta tostadora. Adicionalmente, en el caso de las fundiciones solas, se destaca que Potrerillos funde concentrados con el mayor nivel de cadmio. A su vez, la fundición Caletones presenta un valor bajo para el cadmio en comparación a otras fundiciones, además de estar bajo la mediana en el resto de los elementos. La fundición HVL también funde concentrados con bajos niveles de plomo y cadmio relativamente bajos, mientras que posee un nivel de níquel por sobre la media. Adicionalmente, la fundición Ventanas cuenta con valores de concentración de mercurio en sus concentrados que son bastante superiores a los de las otras fuentes, así como también presenta el mayor nivel de níquel. Por su parte, la fundición Altonorte trata los concentrados con menor contenido de mercurio y de níquel en el territorio nacional.



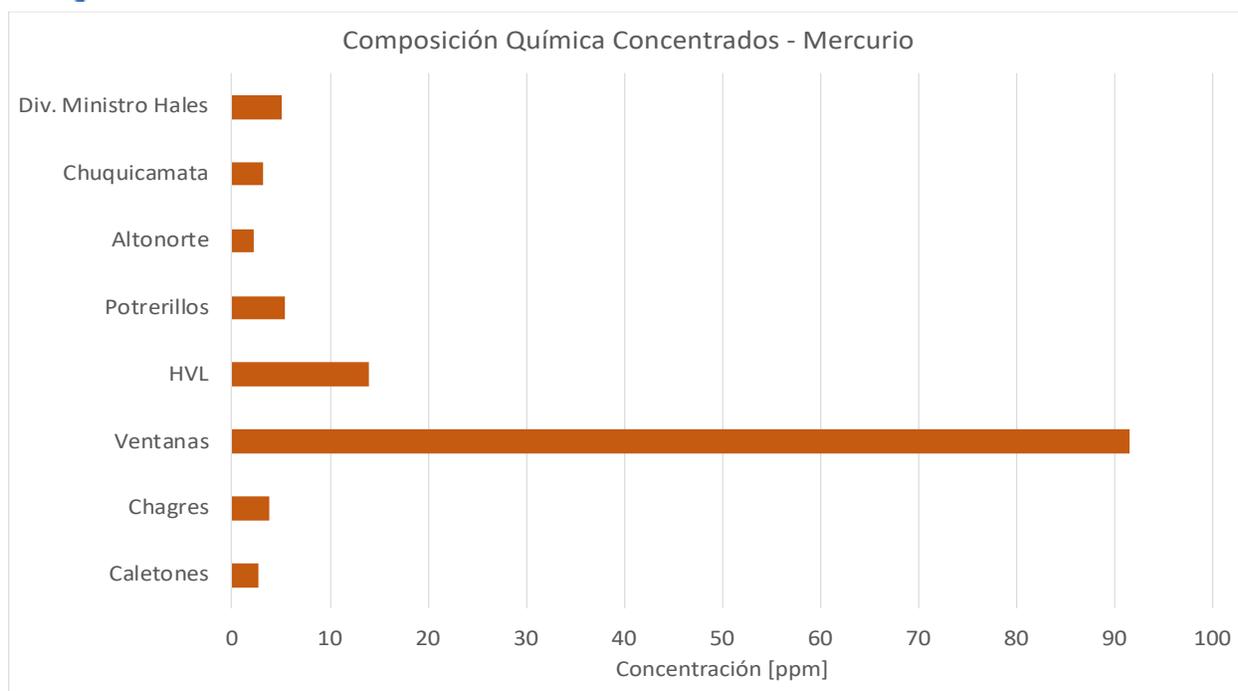
**Figura 3-9 Contenido de plomo en concentrados [ppm], año 2020**

Fuente: Elaboración propia en base a datos de los reportes técnicos en el marco del D.S. 28/2013 del MMA



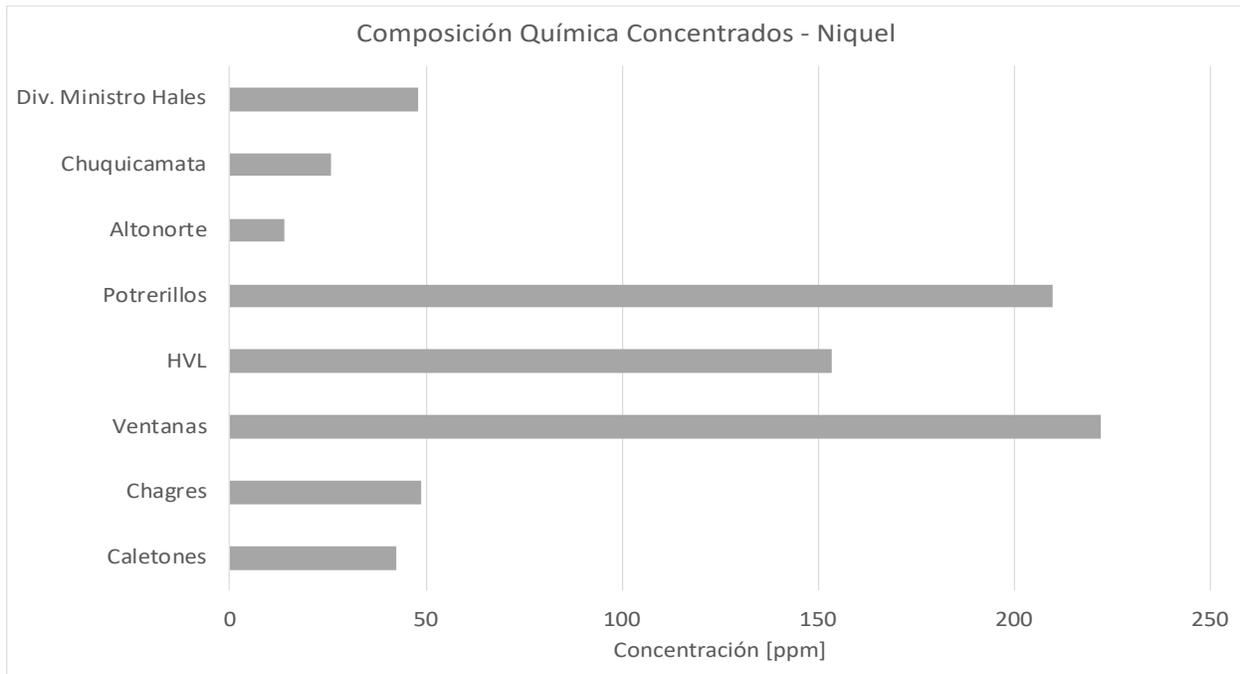
**Figura 3-10 Contenido de cadmio en concentrados [ppm], año 2020**

Fuente: Elaboración propia en base a datos de los reportes técnicos en el marco del D.S. 28/2013 del MMA



**Figura 3-11 Contenido de mercurio en concentrados [ppm], año 2020**

Fuente: Elaboración propia en base a datos de los reportes técnicos en el marco del D.S. 28/2013 del MMA



**Figura 3-12 Contenido de níquel en concentrados [ppm], año 2020**

Fuente: Elaboración propia en base a datos de los reportes técnicos en el marco del D.S. 28/2013 del MMA

En particular, la fundición Chagres reporta el detalle mensual de la composición de los concentrados que recibe. Los valores presentados en la Tabla 3-22 corresponden al promedio ponderado de los valores reportados mensualmente en el marco del D.S. 28/2013 del MMA. De acuerdo a las cifras del año 2020 presentadas en esta tabla, se observa que el mayor contribuyente de material que alimenta la fundición Chagres es Los Bronces, seguido por El Soldado, y que en significativamente menor medida se funde cobre de El Teniente y Atacama Kozan. En cuanto a la composición química de los concentrados utilizados en esta fundición, en el caso del cadmio, los valores están por debajo el límite de detección en las cuatro fuentes presentadas, excepto para nueve meses en el caso del concentrado de Atacama Kozan. Además, se observa que el concentrado de la División El Teniente cuenta con una mayor composición de plomo, en comparación al resto. Por su parte, del material proveniente de Atacama Kozan cuenta con las mayores concentraciones en mercurio, cadmio y níquel, aunque es importante destacar que este concentrado es el que la fundición recibe en menor cantidad.

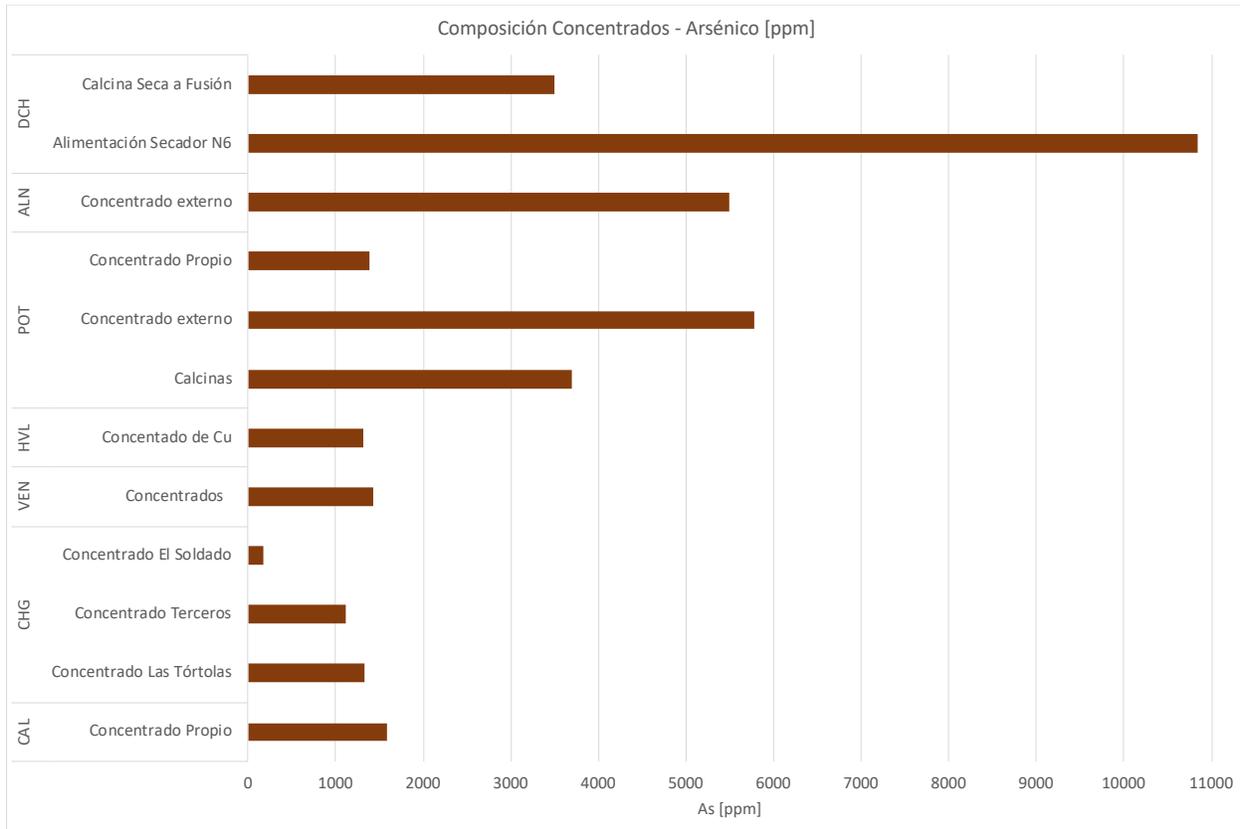
**Tabla 3-22 Composición química promedia anual de los concentrados manejados en Chagres, año 2020**

Origen del concentrado	Pb [ppm]	Cd [ppm]	Hg [ppm]	Ni [ppm]	Recepción Anual [TMS]
Los Bronces	122	<10	5	41	276.280
El Soldado	184	<10	2	25	189.047
El Teniente	377	<10	3	62	31.764
Atacama Kozan	125	19	6	69	9.962

Fuente: Elaboración propia en base a datos de los reportes técnicos en el marco del D.S. 28/2013 del MMA

Luego, es importante analizar el contenido de los concentrados en los elementos regulados por la actual norma de emisión, tal como son el azufre y el arsénico. A partir de los balances de masa elaborados en base a las planillas de los reportes técnicos sometidos en el marco del D.S. 28/2013 del MMA, se estimaron los valores de peso de la base, además de la composición en partes por millón y porcentaje de aquellos elementos. La Figura 3-13 presenta la composición de arsénico contenido en los concentrados que ingresaron a las fundiciones en el año 2020. Los valores son presentados respetando el nombre del flujo que se reporta en los balances de masa y diferenciando según el estado del concentrado indicado. En esta figura se puede identificar que hay una gran variación entre fundiciones, así se nota que la mayor composición de arsénico se encuentra en la corriente de alimentación al secador de la fundición Chuquicamata, la cual contiene 1,08% del elemento. Luego, la fundición Potrerillos trabaja con calcinas, concentrados propios y externos, estos últimos contienen arsénico en mayor medida (más de 5.500 ppm). Respecto a la fundición Altonorte, se puede notar que se tratan únicamente concentrados externos, los cuales alcanzan 5.487 ppm de arsénico. Por su parte, las fundiciones Ventanas y Caletones, manejan concentrados con 0,14% y 0,16% de arsénico, respectivamente. Particularmente, Chagres reporta concentrados provenientes de El Soldado, los cuales presentan el menor contenido de arsénico a nivel nacional para el periodo estudiado; por su parte, el concentrado de Las Tórtolas y de terceros contienen 0,13% y 0,11%, respectivamente.

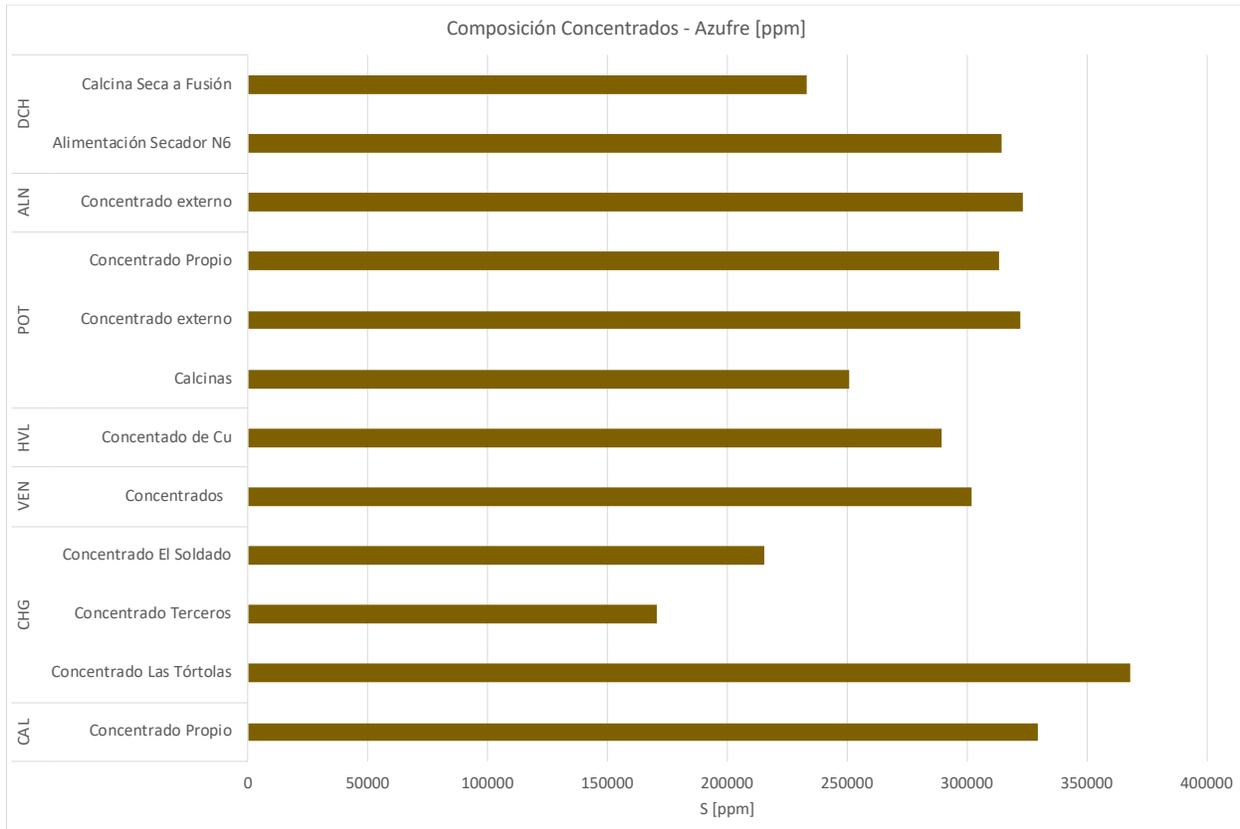
En particular, las fundiciones de Chuquicamata y Potrerillos reciben concentrados que han pasado por una etapa de tostación, que corresponden a cantidades importantes de calcina (126.422 TMS y 16.451 TMS, respectivamente). Cabe señalar que la calcina que forma parte del proceso de Chuquicamata presenta un nivel de contenido de arsénico considerablemente menor que el material que alimenta el secador.



**Figura 3-13 Contenido de arsénico en concentrados de cobre [ppm], año 2020**

Fuente: Elaboración propia en base a datos de los reportes técnicos en el marco del D.S. 28/2013 del MMA

En la Figura 3-14, se presenta el contenido de azufre en los concentrados de cobre que ingresaron a las fundiciones del país en 2020. Los valores son presentados con las denominaciones reportadas en los balances de masa y diferenciando según el estado del concentrado. En esta figura, se puede identificar que hay una menor variación de composiciones de los concentrados de una fundición a la otra, que en el caso del contenido de arsénico presentado anteriormente. Se puede identificar que la mayor composición de azufre se encuentra en la corriente del concentrado Las Tórtolas, el cual contiene un 37% del elemento y es trabajado por la fundición Chagres. En adición a esta última fundición, el resto de los concentrados presentan el menor nivel de contenido de azufre a nivel nacional. Respecto a las fundiciones Altonorte y Potrerillos, se puede notar que los concentrados externos alcanzan un 32% de contenido de azufre. Además de los flujos de la fundición Potrerillos, las calcinas son las que presentan un menor nivel de azufre (estos tienen un contenido de S inferior a 22% en ambos casos). Luego, el concentrado de cobre recibido por la fundición de ENAMI cuenta con un 29% de azufre, mientras que Ventanas y Caletones superan ambas los 30% de azufre (301.829 ppm y 329.525 ppm, respectivamente).



**Figura 3-14 Contenido de azufre en concentrados [ppm], año 2020**

Fuente: Elaboración propia en base a datos de los reportes técnicos en el marco del D.S. 28/2013 del MMA

A continuación, la Tabla 3-23 presenta un resumen de los pesos bases y contenido de arsénico y azufre en concentrados de cobre obtenidos para el año 2020. Cabe destacar que la fundición Hernán Videla Lira reportó valores para los balances de masa en dos ocasiones. En particular, se presentaron valores corregidos que cuentan con flujos de Carga Nueva Útil (CNU) al Convertidor Teniente y a los CPS. Estos flujos contienen sub-flujos, los cuales agrupan otras fases de cobre, tal como blíster o scrap. Dado esto, se presentan únicamente las mediciones realizadas en el balance que reporta el flujo de entrada como CNU.

**Tabla 3-23 Pesos bases y contenido de arsénico y azufre en concentrados de cobre, año 2020**

Fundición	Flujo	Peso Seco Ajustado [TMS]	As [TMF]	Contenido de As [ppm]	S [TMF]	Contenido de S [ppm]
DCH	<b>Total 2020</b>	<b>661.423</b>	<b>6.244</b>	<b>9.440</b>	<b>197.557</b>	<b>298.686</b>
	Alimentación Secador N6	535.001	5.802	10.845	168.094	314.193
	Calcina seca a fusión	126.422	441	3.490	29.464	233.060
ALN	<b>Total 2020</b>	<b>1.050.188</b>	<b>5.763</b>	<b>5.487</b>	<b>339.562</b>	<b>323.334</b>
	Concentrado externo	1.050.188	5.763	5.487	339.562	323.334
POT	<b>Total 2020</b>	<b>505.624</b>	<b>2.219</b>	<b>4.388</b>	<b>160.461</b>	<b>317.352</b>
	Calcinas	16.451	61	3.697	4.123	250.600

Fundición	Flujo	Peso Seco Ajustado [TMS]	As [TMF]	Contenido de As [ppm]	S [TMF]	Contenido de S [ppm]
	Concentrado externo	336.214	1.945	5.785	108.383	322.362
	Concentrado propio	152.959	213	1.391	47.955	313.518
	<b>Total 2020</b>	<b>313.142</b>	<b>443</b>	<b>1.414</b>	<b>94.667</b>	<b>302.312</b>
HVL (*)	CNU CPS	493	0	31	2	3.351
	CNU CT	312.649	443	1.417	94.665	302.784
VEN	<b>Total 2020</b>	<b>360.664</b>	<b>514</b>	<b>1.426</b>	<b>108.859</b>	<b>301.830</b>
	Concentrados	360.664	514	1.426	108.859	301.830
CHG	<b>Total 2020</b>	<b>512.673</b>	<b>449</b>	<b>877</b>	<b>151.080</b>	<b>294.691</b>
	Concentrado Las Tórtolas	278.494	369	1.324	102.491	368.017
	Concentrado de terceros	41.939	47	1.111	7.156	170.641
	Concentrado El Soldado	192.241	34	178	41.433	215.528
CAL	<b>Total 2020</b>	<b>1.258.914</b>	<b>1.997</b>	<b>1.586</b>	<b>414.844</b>	<b>329.526</b>
	Concentrado propio	1.258.914	1.997	1.586	414.844	329.526

(\*) Valores de Carga Nueva Útil (CNU) al Convertidor Teniente y a los CPS.

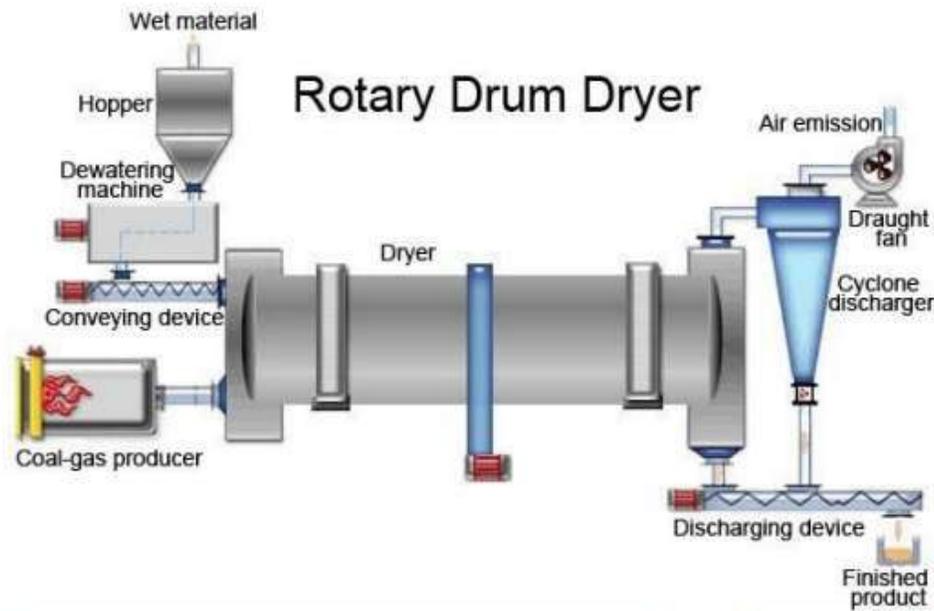
Fuente: Elaboración propia en base a datos de los reportes técnicos en el marco del D.S. 28/2013 del MMA

### 3.2.1.2 Preparación de concentrados

En materia de preparación de los concentrados de cobre, etapa previa al proceso de fundición mismo, la vía la más comúnmente utilizada es el secado. El objetivo de dicho proceso es retirar la humedad contenida en el concentrado, la cual varía entre un 6-8% debido a que, entre otras razones, el concentrado proviene de distintas fuentes de abastecimiento cuyas condiciones de extracción y refinado suelen variar. Esta etapa comienza con el transporte del material mediante correas hacia el secador, las cuales lo mezclan homogéneamente. Al final de este proceso, la humedad del producto se ve reducida a niveles que se encuentran en torno a 0,2%, para procesarse eficientemente.

En Chile, las fundiciones de Chuquicamata, Altonorte y Chagres tienen a su disposición un secador a vapor rotatorio Kumera, el cual, mediante alimentación neumática, se caracteriza por transportar el concentrado dentro de un tambor metálico. Por su parte, las fundiciones Hernán Videla Lira y Ventanas tienen un sistema equivalente, con un secador a vapor rotatorio Fuller. En el diagrama de la Figura 3-15, se presenta este equipamiento donde se puede observar que el concentrado húmedo es trasladado a una unidad previa de remoción de humedad y luego al secador mismo. En dicho dispositivo, el vapor suministrado a una presión de 20 Bar<sup>46</sup> y temperatura de 180°C, circula por un serpentín que permite la transferencia de calor por radiación y convección, lo que permite que se seque el concentrado. Los vahos producidos en esta etapa son distribuidos a filtros de manga, mientras que los gases limpios son descargados a la atmósfera, y los productos son recuperados en un dispositivo específico de descarga.

<sup>46</sup> Muestreo Oficial Isocinético Mediante Método CH-5, Laboratorio CESMEC S.A, Chagres. (CH-5) SEA-17912 y SEA-17913.pdfm



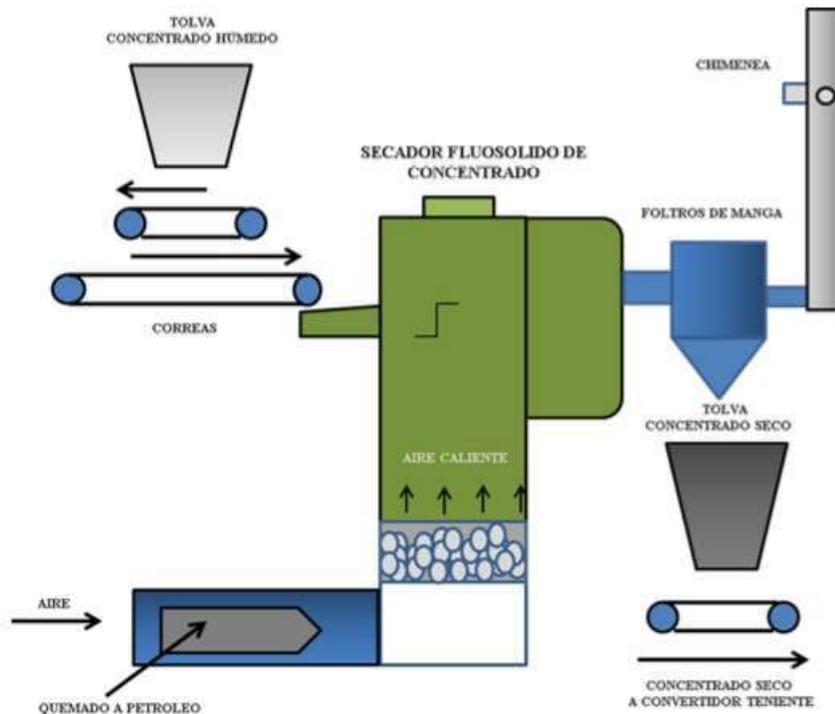
**Figura 3-15 Diagrama del secador rotatorio a vapor**

Fuente: (Shandong Tianli Energy Co., n.d.)

Adicionalmente, existen otras tecnologías que también realizan el proceso de secado mediante un flujo caliente como la Planta de Secado Fluosólido (PSFLUO) que existe en las fundiciones Potrerillos y Caletones (Figura 3-16). Se destaca la División Caletones que cuenta con tres hornos secadores, con dos en funcionamiento y un tercero utilizado en caso de mantenencias, cada uno con distintas dimensiones y capacidades. En la Figura 3-17 se presenta el diagrama del horno secador de lecho fluidizado de concentrado que opera en las PSFLUO de estas fundiciones. En este, se puede apreciar el ingreso del concentrado húmedo a través de tolvas por correas, y a su vez, el ingreso de aire soplado por el inferior de la planta. El proceso de secado ocurre mediante aire que pasa por un quemador a petróleo donde toma una temperatura de unos 137°C, para ser contactado en el horno secador con el concentrado y disminuir la humedad a 0,2%<sup>47</sup>. El material grueso precipita y es enviado a los silos de almacenamiento. Además, luego del proceso del paso por el secador, el material fino es dirigido a filtros de manga, para guiar el producto seco a tolvas destinadas a la etapa de fusión en el CT. Por su parte, el material gaseoso es evacuado por una chimenea<sup>48</sup>.

<sup>47</sup> Muestreo Oficial Isocinético Mediante Método CH-5, Potrerillos, 2020.

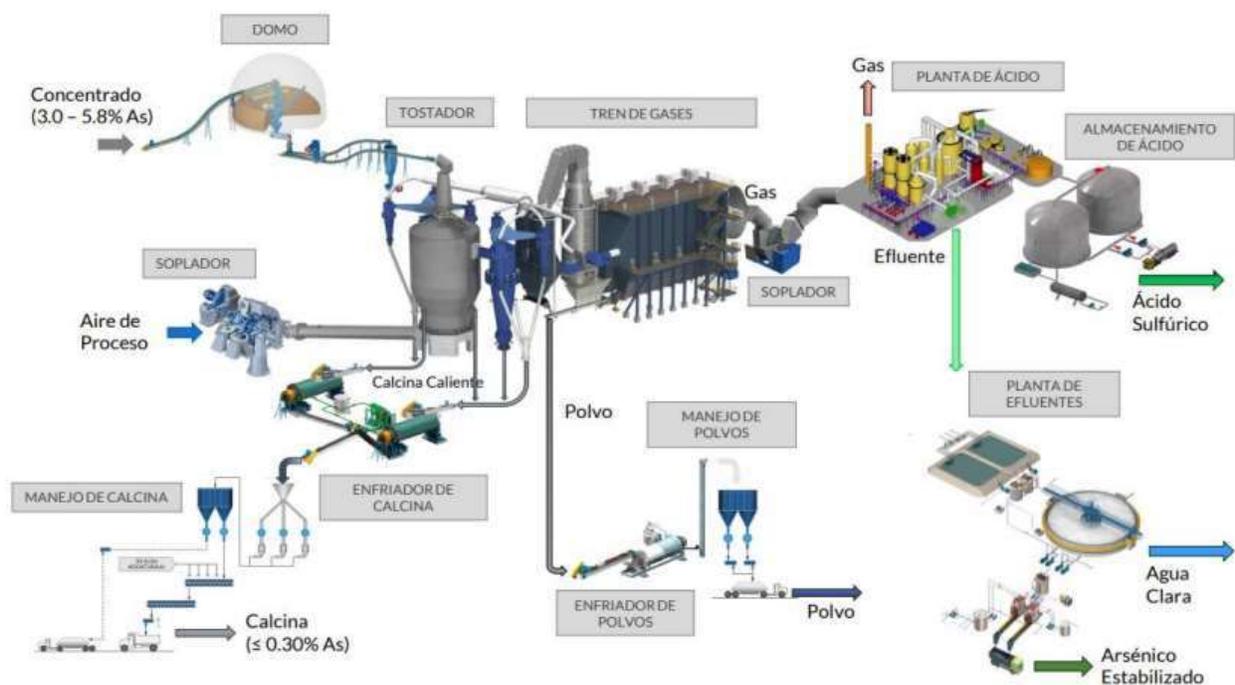
<sup>48</sup> Lugar donde se realiza la medición de material particulado.



**Figura 3-16 Diagrama del secador de lecho fluidizado de concentrado**

Fuente: (CODELCO, 2020a)

Además, existe una segunda vía para la preparación de concentrados, que consiste en la tostación de dichos concentrados. La planta de la división División Ministro Hales (DMH), realiza el proceso de tostación previamente al secado del concentrado de cobre (Figura 3-17) produciendo calcinas, las cuales son mayoritariamente utilizadas por fundiciones locales, entre las que destaca Chuquicamata. Dicho proceso consiste en la oxidación parcial de los sulfuros del concentrado y en la eliminación parcial del azufre de éste como  $\text{SO}_2$ . Dentro de las características operacionales, dependiendo de las reacciones y productos deseados, en esta planta, se trabaja en temperaturas en el rango de 500-800°C. Tras un proceso de control de temperatura y soplado de gases, los ciclones de la planta recuperan polvos arrastrados y son oxidados, para ser dirigidos a precipitadores electrostáticos de tratado de polvos finos, para seguir a las plantas de ácido de doble contacto. Además, durante este proceso, el arsénico es volatilizado como trisulfuro y es captado en las plantas de tratamiento de efluentes de las plantas de ácido. En estas, el arsénico se trata con cal, generando arsenito de calcio, el cual es finalmente confinado en depósitos de seguridad. Cabe destacar que la capacidad de la planta de tostación suele definirse en base a la capacidad de extracción de arsénico de la cual se espera disponer. Al final del proceso, se genera un producto, la calcina, que se retira por la parte media alta del equipo, y se enfría para ser enviada a un proceso de mezclado y luego a la etapa de fusión flash. Gracias a la realización de esta etapa de tostación, se obtiene un producto con un grado mayor de pureza, reflejado en que este contiene niveles de arsénico que son más bajos que el concentrado de cobre inicial. En este caso, en Chile, el horno y la mayoría del equipamiento de la planta de tostación que realiza este proceso son modelos de Outotec.



**Figura 3-17 Esquema operacional de la División Ministro Hales**

Fuente: Entrevista con CODELCO<sup>49</sup>

Adicionalmente, en la Tabla 3-24 se pueden apreciar las principales características de los equipos utilizados en la etapa de preparación de concentrados. En esta, en materia de secado, se puede identificar que los secadores rotatorios son los más utilizados, donde Chuquicamata cuenta con la mayor capacidad de secado entre estos, además de ser los equipos instalados más recientemente. Por su parte, la fundición Caletones cuenta con una configuración más compleja, donde las tres Plantas de Secado Fluosólido (PSFLUO) tienen en total una capacidad de 305 toneladas por hora, necesaria para cumplir con la capacidad y continuidad de los siguientes procesos de la fundición misma. Luego, se puede apreciar que ENAMI y la división Ventanas tienen equipos equivalentes, de las mismas dimensiones e instalados con un año de diferencia. Por su parte, la División Ministro Hales tiene una capacidad de 69,4 toneladas por hora.

<sup>49</sup> Ver minuta "Fundiciones CODELCO" en el Anexo E – Minutas de los anexos digitales

**Tabla 3-24 Características de los procesos de secado y tostación**

Sitio	DCH	DMH	POT	ALN	HVL	VEN	CHG	CAL
<b>Tipo</b>	Rotatorio	Tostador	PSLF	Rotatorio	Rotatorio	Rotatorio	Rotatorio	PSFLUO
<b>Capacidad nominal [t/h]</b>	207	69,4	83,3	180	60	60	137,5	N1: 65 N2: 90 N3: 150
<b>Dimensiones</b>	15,5 [m] Largo 4,4 [m] Diámetro	S/I	Cámara distribuidora: 4,74 $\phi$ x 3,13 L [m]  Fluoplaca de marco circular: 0,74 [m] Altura  Cámara de expansión: 6,6 [m] Altura	14,0 [m] Largo 5,3 [m] Diámetro	24,4 [m] Largo 2,7 [m] Diámetro	24,4 [m] Largo 2,7 [m] Diámetro	15,5 [m] Largo 4,4 [m] Diámetro	N1: 7,8 L x 3,2 D [m] N2: 8,8 L x 3,7 D [m] N3: 8,75 L x 3,9 D [m]
<b>Año de Instalación</b>	2019	S/I	2002	2014	1998	1997	2016	N1: 1987 N2: 1993 N3: 2003

S/I: Sin información

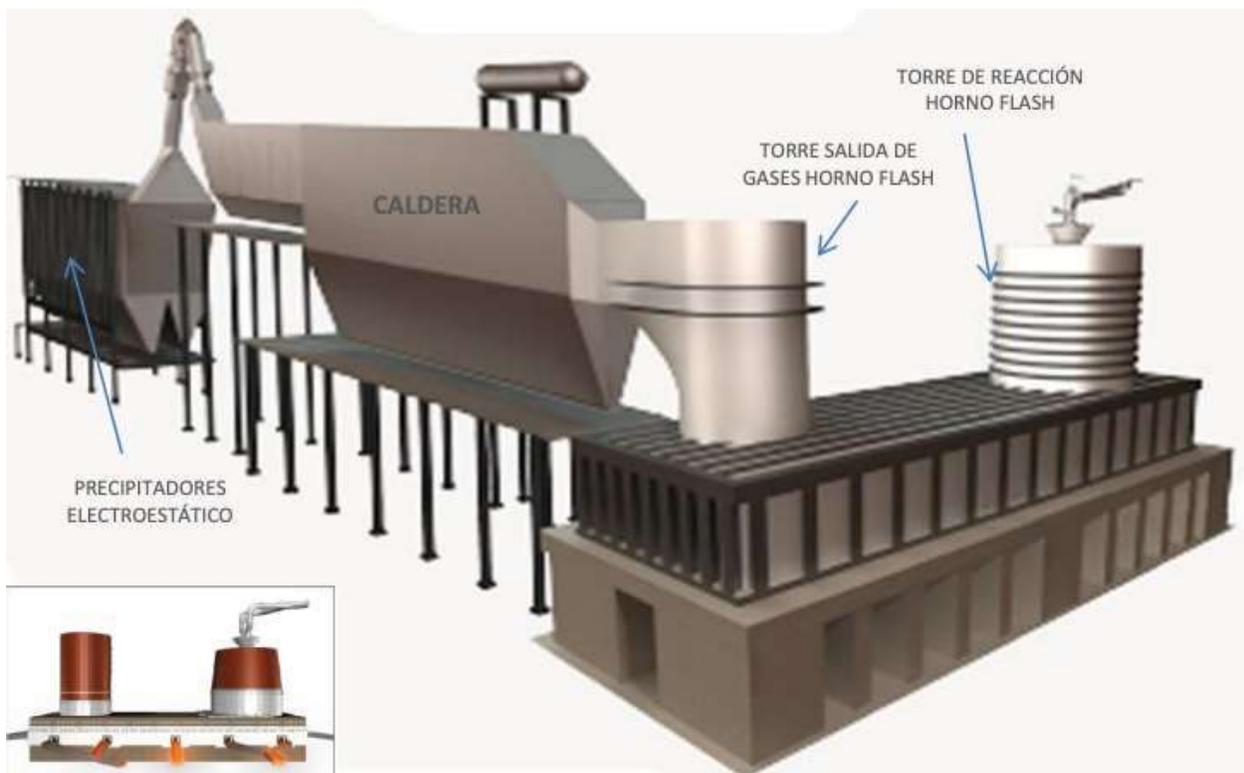
Fuente: Elaboración propia en base a metodologías aprobadas y antecedentes de fundiciones

### 3.2.1.3 Fusión

La fusión es la primera etapa que involucra una concentración en el contenido de cobre de los productos. El proceso consiste en dirigir el concentrado a los hornos de fusión/conversión, lo que permite la descomposición inicial de los gases, escoria de óxidos y metal blanco (MB). Respecto a los equipos que utilizan las fundiciones chilenas en la fusión, se encuentran los Convertidores Teniente, Hornos Flash y Reactor Noranda.

En particular, la fundición Chuquicamata y Chagres cuentan respectivamente con equipos Outokumpu y Outotec, los que corresponden a Hornos Flash (HF). Esta tecnología aprovecha el calor generado en las reacciones del oxígeno presente en el aire del proceso, donde, dependiendo de las características del concentrado y los flujos de enriquecimiento, se generarán altas cantidades de energía. Además, se funden materiales fríos de recirculación de cobre o carga fría para regular la temperatura, además de un proceso de chaqueteo y absorción mediante agua, la cual es enfriada posteriormente. El equipo de la fundición de Chuquicamata cuenta con una capacidad de 3.600 toneladas por día, mientras que la fundición Chagres tiene un Horno Flash (HF) con 1.790 toneladas métricas secas por día de capacidad de diseño para fundir. En la Figura

3-18, se proporciona un esquema del Horno Flash de Chuquicamata, y en la Figura 3-19 se muestra el proceso interno que se realiza en este tipo de horno. Este equipo recibe el concentrado seco y se le aplica aire y oxígeno, además de pasar por un proceso de quemado para generar la reacción. Por su parte, el horno de marca Outotec es alimentado en concentrado a través de una torre de reacción, donde ocurre un cambio de fase de sólido a líquido en forma violenta. Estos equipos tienen como producto el eje y la escoria, los cuales son evacuados mediante sangrías hacia plantas concentradoras de escoria. Además, el líquido extraído es enviado a los CPS.

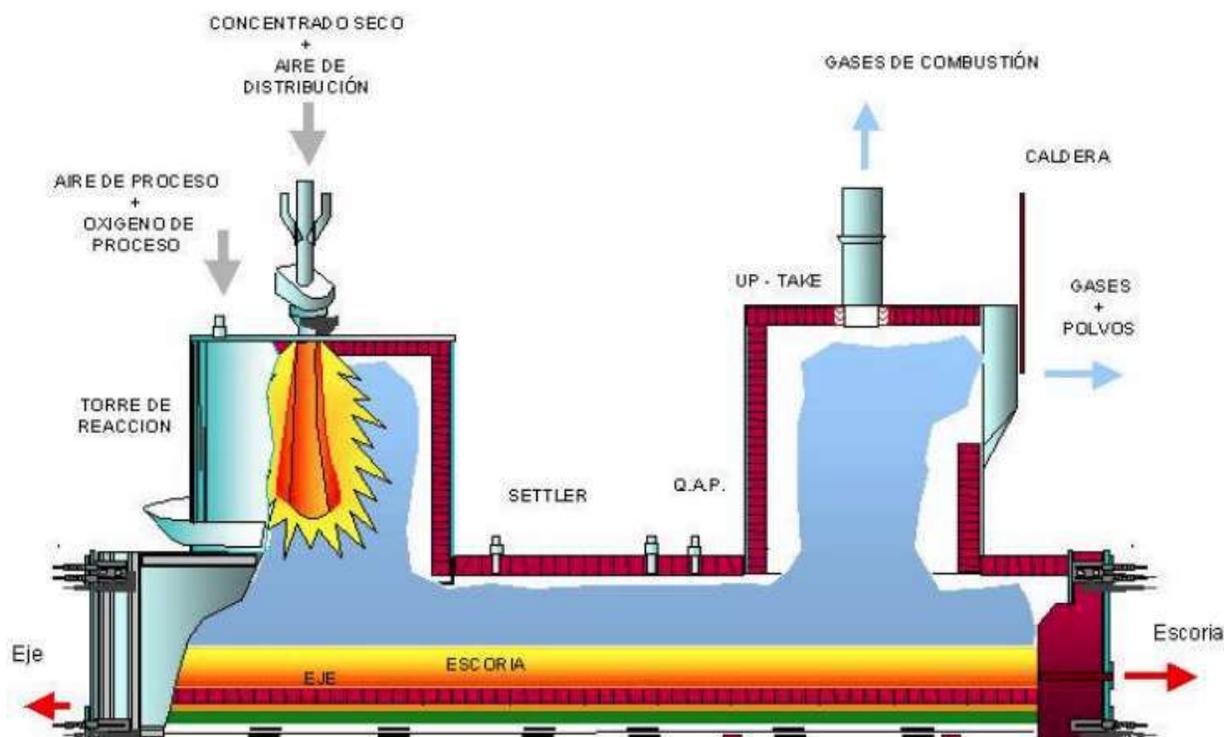


**Figura 3-18 Horno Flash de Chuquicamata**

Fuente: Entrevista con CODELCO<sup>50</sup>

---

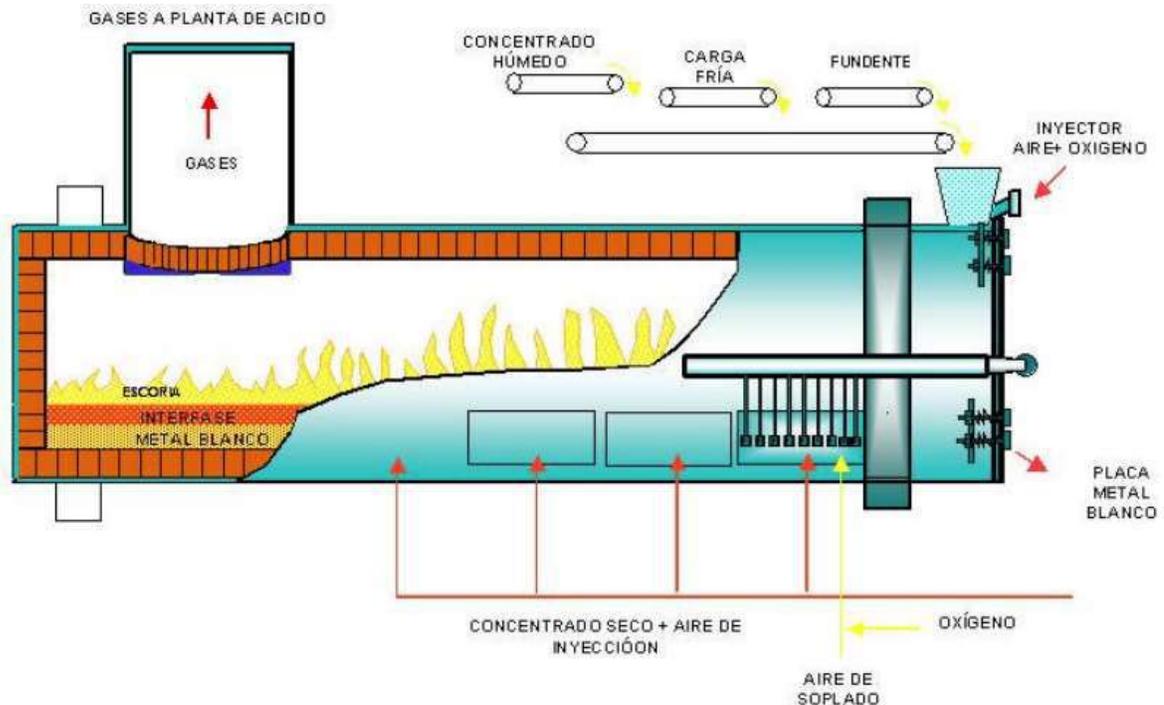
<sup>50</sup> Ver minuta "Fundiciones CODELCO" en el Anexo E – Minutas de los anexos digitales



**Figura 3-19 Esquema descriptivo del Horno Flash Outokumpu**

Fuente: (Arancibia Cruz, Aros Meneses, & Olgúin Contreras, 2008)

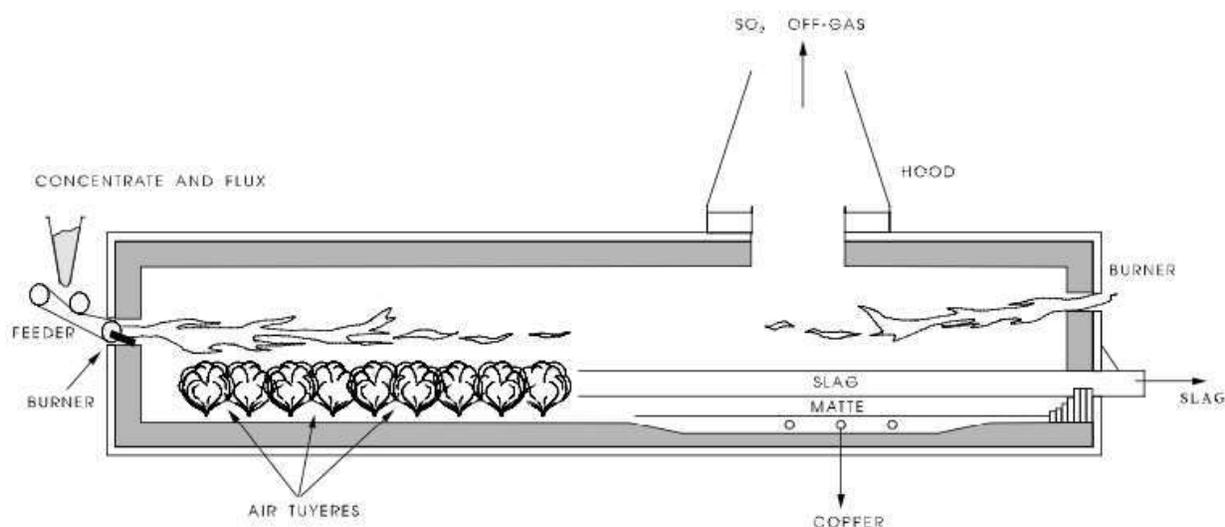
Por otro lado, los equipos Convertidores tipo Teniente (CT) son utilizados en las fundiciones de Potrerillos, HVL, Ventanas y Caletones. Estos son reactores con forma de cilindro, dispuestos en posición horizontal. La operación se basa en el principio denominado como fusión en baño, que utilizan la energía producida por las reacciones de oxidación en el reactor, donde la velocidad de generación depende del flujo de oxidación y la ley del metal blanco. La producción del metal blanco es el objetivo de este procedimiento, y dentro de sus características operacionales se puede señalar que la temperatura de fusión-conversión es a 1.240°C, aproximadamente. Es importante recalcar que este proceso requiere que el material de entrada posea un porcentaje de humedad inferior a 0,2%, por lo que se requiere realizar un secado previo (CODELCO, 2019). Cabe notar que solo la fundición de Caletones posee dos unidades en paralelo de las mismas características geométricas posicionadas en el mismo espacio de los flujos de procesos, mientras que el resto de las fundiciones sólo cuenta con un solo equipo. Se puede apreciar en la Figura 3-20 el esquema del CT, donde dentro del reactor se forman fases de metal líquido, escoria y metal blanco, además de una interfase. En la fundición se logra la separación del metal retirando la capa de sólidos en suspensión en la fase líquida, correspondiente a la escoria, evacuada por sangrado a la etapa de limpieza.



**Figura 3-20 Esquema descriptivo del Convertidor Teniente**

Fuente: (Arancibia Cruz et al., 2008)

Por su parte, Altonorte cuenta con un reactor tipo Noranda, el cual recibe en el lecho fundido el concentrado seco mediante un sistema de impulsión neumática en fase densa. Luego, este es extraído a través de placas de sangría, para ser destinado a la conversión. Cabe destacar que este reactor es el más grande del mundo en su tipo, con una capacidad de 1.160.000 toneladas anuales. En la Figura 3-21 se puede apreciar el proceso del reactor Noranda, donde el concentrado de cobre se ve expuesto a un proceso de quemado y puesto en contacto mediante un ingreso de aire por toberas. La escoria queda en flotación y es evacuada por separado al producto, el cual sale por la parte inferior del reactor.



**Figura 3-21 Esquema descriptivo del reactor Noranda**

Fuente: (US-EPA, 1995)

En la Tabla 3-25 se pueden observar las características de distintos equipos utilizados en esta etapa de fusión, los que fueron descritos anteriormente. En particular, se observa que los Hornos Flash, dadas sus características geométricas, tienen dimensiones para el Settler, la Torre de Reacción y el Up-take. Comparando entre las fundiciones que utilizan esta tecnología, se puede apreciar que el equipo de Chuquicamata es de mayor tamaño que el de Chagres, en todas sus partes. Es importante destacar que el potenciamiento realizado para el año 2019 permite que la capacidad de Chuquicamata de fusión sea de 3.600 toneladas por día, duplicando la capacidad de la fundición de Anglo American.

Luego, las fundiciones que utilizan equipos con tecnología de fundición en baño, tienen dimensiones cilíndricas, donde se puede apreciar que el reactor Noranda de Altonorte es el de mayor longitud. También, se destaca que Caletones y Potrerillos tienen los CT de mayor tamaño en territorio nacional, donde la división El Teniente cuenta con la mayor capacidad de fusión, dado que cuenta con dos de estos equipos. Por otro lado, Hernán Videla Lira y Ventanas tienen dimensiones y capacidades similares, en torno a los 15 y 16 metros, y con capacidades en torno a 1.130-1.440 toneladas por día. Además, el equipo Teniente de la fundición Ventanas es el que tiene mayor antigüedad de instalación, mientras que la fundición ENAMI instaló el equipo el año 2009, siendo el de menor periodo de funcionamiento transcurrido a la fecha.

**Tabla 3-25 Equipos de fusión disponibles por fundición**

Fundición	Tecnología	Equipo	Capacidad [t/día]	Dimensiones	Año de Instalación
<b>Chuquicamata</b>	Flash/Llamas	Outokumpu	3.600	Settler: 21,0 x 7,6 x 2,0 [m]  Torre reacción: 6,0 [m] $\phi$ 7,0 [m] Altura cilíndrica  Up-take: 4,25 [m] $\phi$ 7,5 [m] Altura	1988
<b>Altonorte</b>	Baño	Noranda	3.178	26,4 [m] Largo 5,3 [m] Diámetro	2002
<b>Potrerillos</b>	Baño	CT	2.880	22,0 [m] Largo 5,0 [m] $\phi$	2002
<b>HVL</b>	Baño	CT	(1) 1.440	16 [m] Largo 3,9 [m] $\phi$	2009
<b>Ventanas</b>	Baño	CT	(2) 1.130	15 [m] Largo 4 [m] $\phi$	1984
<b>Chagres</b>	Flash/Llamas	Outotec	1.790	Settler: 19,0 x 5,0 x 1,9 [m]  Torre reacción: 4,2 [m] Diámetro superior 4,6 [m] Diámetro inferior 5,0 [m] Altura cilíndrica  Up-take: 4,25 [m] $\phi$ 7,5 [m] Altura	1995
<b>Caletones</b>	Baño	CT – 2 unidades	(3) 3.400	22,0 [m] Largo 5,0 [m] Diámetro	1987 1989

(1) Calculado a partir de capacidad horaria reportada durante reunión de antecedentes

(2) Calculado a partir de capacidad anual reportada durante reunión de antecedentes

(3) Capacidad total de ambos Convertidores Teniente

Fuente: Elaboración propia en base a metodologías aprobadas y antecedentes de fundiciones

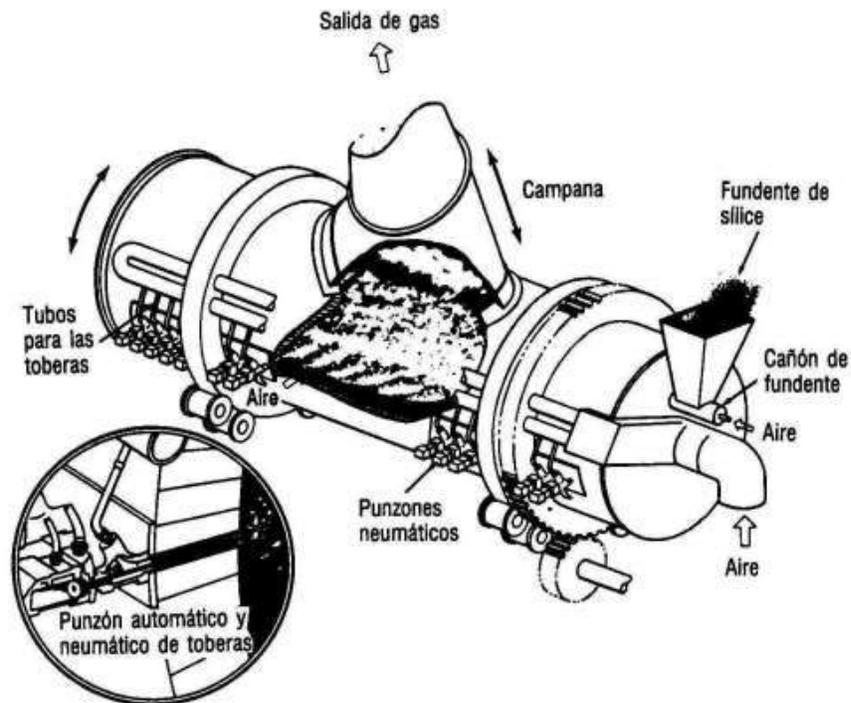
### 3.2.1.4 Conversión

Respecto a la etapa del proceso en el cual toma parte la conversión del eje y metal blanco para obtener como producto el blíster, se encuentran los convertidores. Actualmente, en todas las fundiciones nacionales, la tecnología utilizada para esta etapa corresponde a unidades de Convertidores Peirce-Smith (CPS). Es importante identificar que los productos que ingresan a las

unidades y son tratados en el proceso dependen de la etapa anterior, donde los Hornos Flash generan un material denominado eje, mientras que los Convertidores Teniente producen metal blanco. Para este último caso, se trata de una fase que contiene entre 70-75% de cobre, en forma de sulfuro de cobre<sup>51</sup>. Tras la conversión efectuada en los CPS, se obtiene un producto denominado blíster, el cual generalmente supera el 98% de pureza, gracias a que incluye la eliminación de óxidos de arsénico, azufre, antimonio, plomo y zinc, entre otros componentes. En el caso estos equipos, se debe denotar que la eliminación de impurezas se lleva a cabo en dos etapas que son el soplado de escoria y soplado de cobre. Ahora bien, cabe destacar que los CPS funcionan de manera discontinua, por lo que la conversión se realiza mediante distintas cargas. En el mismo sentido, cada fundición tiene distintos números de equipos, dependiendo de sus características funcionales, capacidad y especificación del producto deseado. De esta manera, la operación se planifica de modo tal que no todos los convertidores se estén usando al mismo tiempo, y que los que están en la línea de operación estén en diferentes etapas del ciclo de conversión. El ciclo finaliza luego del vaciado de escoria y cobre blíster, donde los gases de salida son capturados, y luego transferidos a otras plantas o unidades de tratamiento. En la Figura 3-22 se puede apreciar el diagrama descriptivo de un CPS, en este, se identifican las toberas por donde se inyecta el aire de soplado a través de un mecanismo de punzadoras. Además, se puede visualizar que el fundente de sílice ingresa por un extremo superior del convertidor.

---

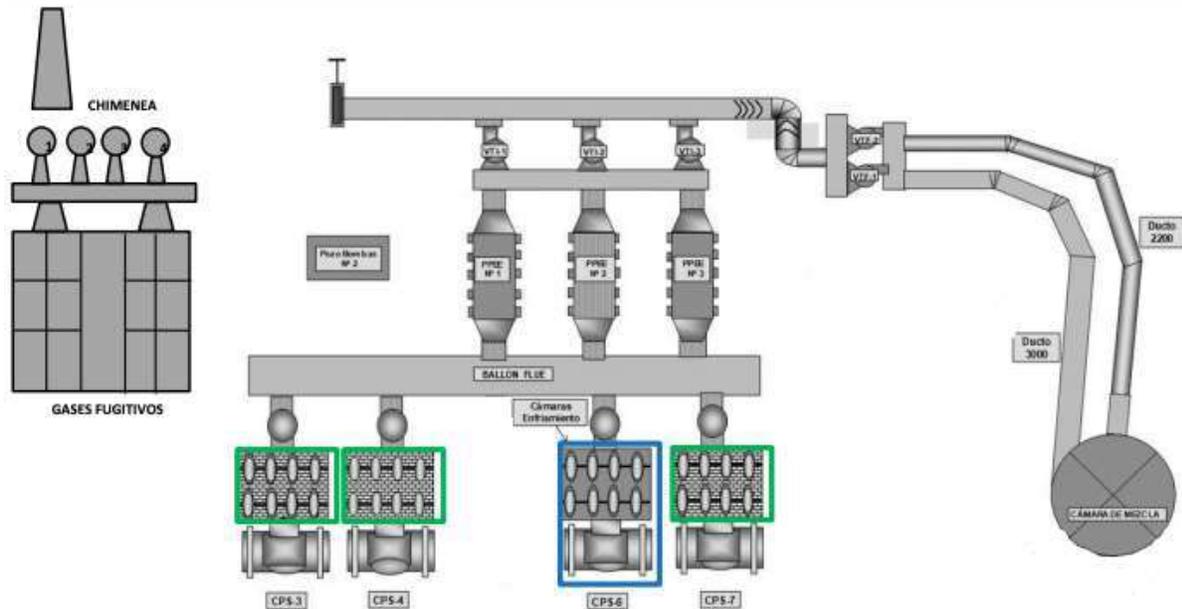
<sup>51</sup> Protocolo para la validación de metodologías de balance de azufre y arsénico en fuente emisoras de acuerdo al D.S. 28/2013 MMA, RE 694 SMA/2015.



**Figura 3-22 Esquema descriptivo del Convertidor Peirce-Smith**

Fuente: (Universidad de Chile, 2010)

En la Figura 3-23 se muestra el caso de la fundición de la división Chuquicamata en la que el líquido extraído desde el Horno Flash es enviado a los convertidores, donde la escoria es procesada y recirculada a los CPS (4) con una ley de cobre de 65% aproximadamente; este contenido es menor al del producto de un Convertidor Teniente del cual disponen la mayoría de las otras fundiciones. Dado esto, el proceso realizado en Chuquicamata debe contar con dos sopladors, el primero para el hierro, el cual se encuentra en niveles de 12%, y un segundo al cobre. Por otro lado, el metal blanco (sobre 72% de Cu) solo es expuesto a un soplado a cobre, donde se oxida el azufre, ya que el contenido de hierro es muy bajo (3-4%) y la formación de escoria es poca, ya que, en general, se encuentran óxidos de hierro. Luego, los gases con alto contenido de dióxido de azufre (20%) se envían a la planta de ácido, mientras que los que cuentan con niveles entre 7-8% se mezclan en una cámara. De esta manera, se balancea el contenido de los elementos a través del soplado de dos CPS en paralelo, uno en caliente y un cuarto en mantención. Finalmente, el blíster que se genera en este proceso se dirige a los hornos de refino.



**Figura 3-23 Diagrama descriptivo de Convertidor Pierce-Smith**

Fuente: Entrevista con CODELCO<sup>52</sup>

Además, en Altonorte, hay cuatro CPS, mientras que en Potrerillos hay tres CPS. Por su parte, la fundición HVL cuenta con dos CPS, los cuales son cargados mediante ollas de metal blanco, donde el proceso tiene una duración de 120 minutos aproximadamente. En Ventanas, se dispone de tres CPS. Adicionalmente, Chagres configura sus equipos con tres unidades en caliente (uno se mantiene en standby), dos soplando y uno en mantención, turnando los CPS para mantener los niveles de flujo y concentración apropiados para la planta de ácido. Además, la fundición Caletones cuenta con cuatro unidades de CPS, los cuales reciben el metal blanco producido en la etapa de fusión. La configuración adoptada cuenta con tres convertidores en caliente, uno soplando y uno en mantención.

En la Tabla 3-26, se observan las principales características de los equipos con que cuentan las fundiciones descritas anteriormente. Cabe señalar que varias configuraciones asociadas a la etapa de conversión estas están constituidas por CPS de distintas dimensiones, pero con una capacidad equivalente para mantener la continuidad operacional. Se puede destacar que las fundiciones de Chuquicamata, Altonorte, Chagres y Caletones cuentan con cuatro equipos, los cuales permiten separar el funcionamiento de aquellos entre modo de operación de soplado, caliente y mantención.

<sup>52</sup> Ver minuta "Fundiciones CODELCO" en el Anexo E – Minutas de los anexos digitales

**Tabla 3-26 Características de los CPS de las fundiciones nacionales**

Fundición	Cantidad de CPS	Denominación	Capacidad del Equipo	Dimensiones	Año de instalación
DCH	4	Nº3, 4 y 6	250 t/día c/u	4,5 [m]φ	1952
		Nº7		13,2 [m] Largo	2017
ALN	4	Nº1	2000t/día en conjunto	4,5 [m] Diámetro 14,0 [m] Largo	2003
		Nº2 y 3		4,5 [m] Diámetro 11,0 [m] Largo	
		Nº4		4,0 [m] Diámetro 10,0 [m] Largo	1998
POT	3	Nº1, 2 y 3	150 t/día c/u	4,0 [m]φ 9,1 [m] Largo	S/I
HVL	2	Nº2	9-12 ciclos/día	3,0 [m] Diámetro	1958
		Nº3		7,2 [m] Largo	1996
VEN	3	Nº1, 2 y 3	70t/carga c/u	3,0 [m]φ 9,4 [m] Largo	1964
CHG	4	Nº1, 2, 3 y 4	597 t/día en conjunto	3,1 [m]φ 7,3 [m] Largo	1971
CAL	4	Nº1	200 t/carga c/u	4,5 [m] Diámetro 10,0 [m] Largo	1970
		Nº2			1990
		Nº3			1997
		Nº4		3,9 [m] Diámetro 10,0 [m] Largo	1995

S/I: Sin información

Fuente: Elaboración propia en base a metodologías aprobadas y antecedentes de fundiciones

Por otro lado, se destaca que hay varios equipos con una antigüedad mayor a 50 años, lo que no es significativo en términos operacionales, ya que, cumpliendo con los planes de mantenimiento adecuados, estos ejecutan su función de manera correcta. Respecto a esto último, por ejemplo, ENAMI realiza mantenencias parciales aproximadamente de ocho días cada 180-200 ciclos, además de mantenencias generales cada dos mantenencias parciales, las que tienen una duración de 15 días<sup>53</sup>. Además, generalmente se ejecutan cambios de piezas de los equipos, tal como lo hace la fundición Chagres reemplazando los cascos cada 10 años<sup>54</sup>.

### 3.2.1.5 Limpieza de escorias

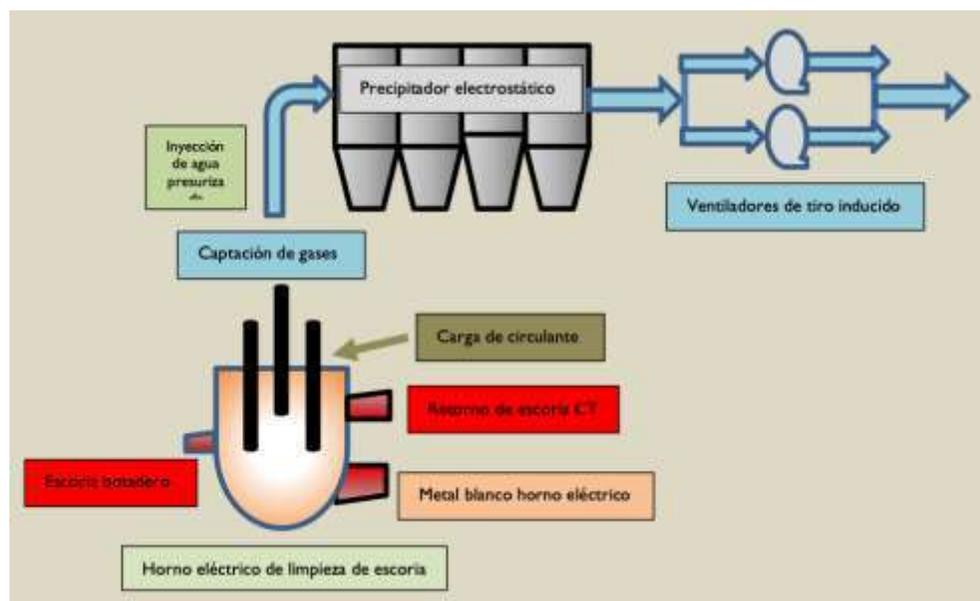
Tal como se aprecia en las etapas de fusión y conversión descritas anteriormente, estas generan distintos productos, y residuos como las escorias. Una vez generadas, dichas escorias son evacuadas y recirculadas a otras unidades de limpieza cuyo objetivo es recuperar el cobre que estas contienen (ver mayores detalles la Sección 3.1.2.1).

<sup>53</sup> Presentación Reunión Antecedentes con ENAMI.

<sup>54</sup> Metodología Balance de de Azufre y Arsénico, Anglo American Sur S.A, 2017.

A la fecha, la vía pirometalúrgica está en uso en 3 de las 7 fundiciones operando en Chile, que son Hernán Videla Lira (HVL), Ventanas y Chagres. Esta vía se caracteriza por el uso de Hornos de Limpieza de Escorias (abreviados HLE/HE en este informe). En estos, generalmente se utiliza carbón que al reaccionar con el oxígeno de la escoria permite la reducción de la proporción de magnetita ( $F_3O_4$ ) y la liberación de cobre oxidado, y la separación del cobre contenido por las diferencias de densidad. Adicionalmente, en el resto de las fundiciones del país (4 de las 7 fundiciones nacionales), se realiza limpieza de escorias mediante la vía hidrometalúrgica con el uso de celdas de flotación.

Por su parte, la fundición HVL recupera el cobre contenido en la escoria líquida a través de la unidad de horno eléctrico de limpieza de escorias de marca DEMAG. Dicha escoria se produce en las fases de fusión y de conversión, y corresponde a lo generado en el Convertidor Teniente y a la carga fría como circulante. Este utiliza como combustible carbón y produce un metal blanco con un contenido entre 72-75% de cobre, además de escoria con contenido bajo el 1% de cobre. En la Figura 3-24 se puede apreciar la configuración del equipo y sus interacciones. En esta unidad, la limpieza de escorias recupera el cobre contenido en la escoria líquida del CT y el cobre contenido en el flujo circulante de carga fría, para tener como producto el metal blanco, además de escoria a botadero y gases de proceso que pasan por un precipitador electrostático de cuatro campos, donde se captura el material particulado.

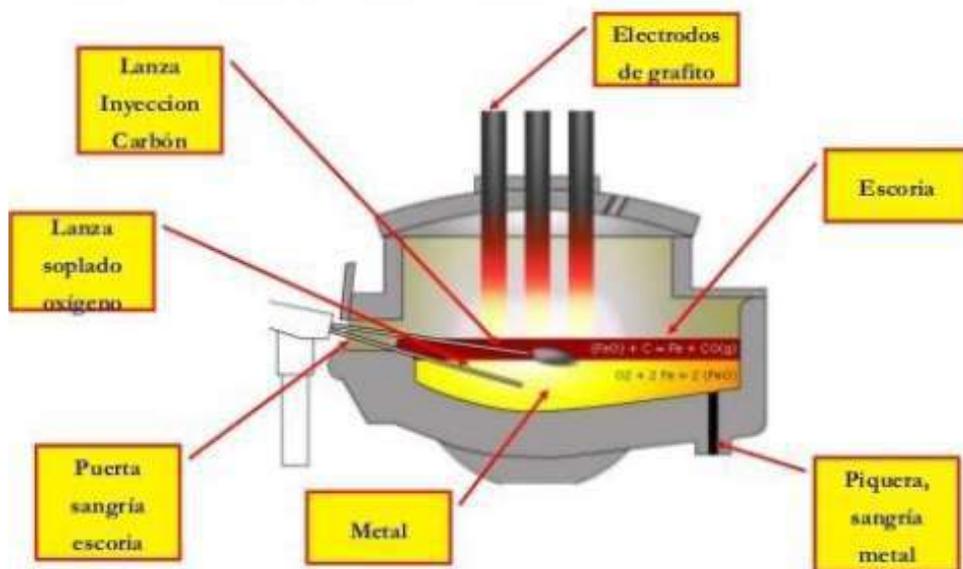


**Figura 3-24 Esquema de Horno Eléctrico de Limpieza de Escorias, ENAMI**

Fuente: Mediciones isocinéticas ch 5, Fundición HVL, año 2020

A continuación, en la Figura 3-26, se proporciona un esquema de una unidad de horno de limpieza de escorias en uso en la fundición Ventanas, donde llega la escoria desde el Convertidor Teniente (CT). En este caso, dicha escoria, de contenido entre 10-12% de cobre, es sometida a un

proceso de aplicación de calor, y se produce una sedimentación entre el contenido de escoria y contenido metálico, donde este último es dirigido a los convertidores, mientras que el restante (0,8% de Cu) es posicionado en botaderos. En el esquema siguiente se pueden observar los puntos de inyección de carbón y soplado de oxígeno, además de la ubicación de la puerta de sangría de escoria y la salida de la sangría metal. Se señala que dentro de los factores que influyen la efectividad de la unidad está el grado de contacto entre las fases y la agitación que determina la velocidad la reacción. En el mismo sentido, la fundición Ventanas utiliza precipitadores electrostáticos, con aplicación de voltajes para transformación con relativamente gran intensidad y además cuenta con sistemas de golpeo automáticos<sup>55</sup>.



**Figura 3-25 Esquema de Horno Eléctrico de Limpieza de Escorias la Fundición Ventanas**

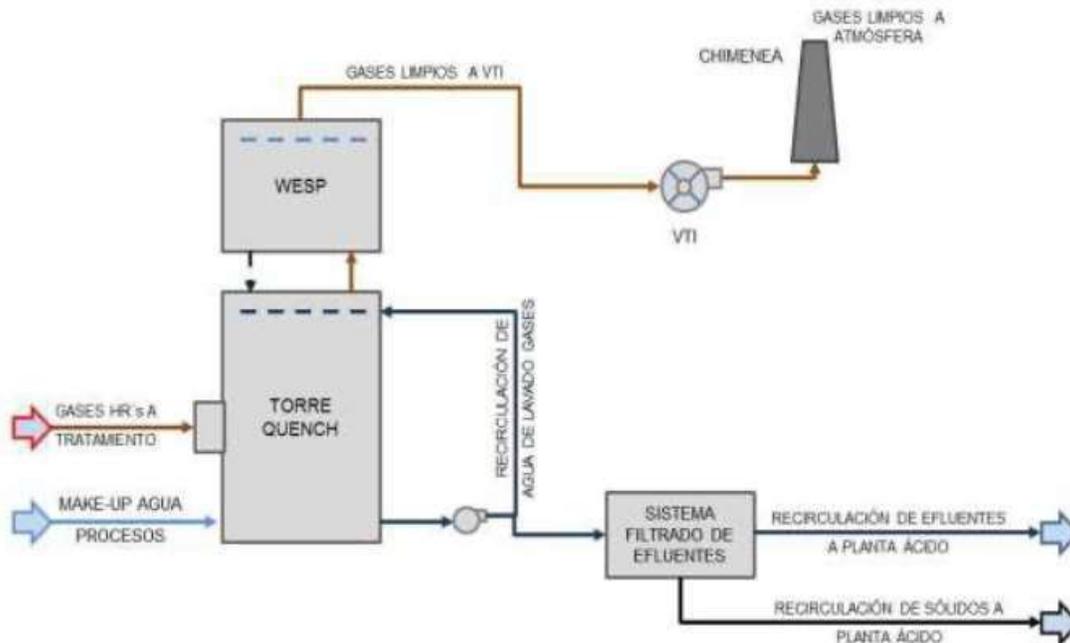
Fuente: Mediciones isocinéticas ch 5, Fundición Ventanas, año 2020

Análogamente, la fundición Chagres también utiliza un horno eléctrico de limpieza de escorias, el cual tiene un funcionamiento equivalente al de la fundición Ventanas descrito anteriormente, solo que este recibe la escoria desde el Horno Flash. En este horno eléctrico, se utilizan reductores orgánicos o bien sulfuros que actúan también como colector de metales, tales como pirrotita o concentrado y pirita<sup>56</sup> efectuando una reducción y sedimentación de las escorias, para entregar plateado con una ley aproximada de un 62% Cu para los CPS y una escoria a botadero, con un contenido de cobre entre 0,8% y 2%. En una etapa posterior cuya función es el control de emisiones, se cuenta con un lavador tipo Quench y dos precipitadores electrostáticos. Cabe señalar que la carga en operación es considerada del 100%, ya que los hornos funcionan con una capacidad de máxima de 70 toneladas por ciclo a razón de 15 ciclos por día. Además, cabe

<sup>55</sup> Muestreo Isocinético CH-5 Horno Eléctrico Limpieza de Escoria, ETFA SERCOAMB 019-12, CODELCO División Ventanas.

<sup>56</sup> Muestreo Isocinético CH-5 Horno Limpieza de Escoria, SEA-17912, Anglo American Sur S.A, Chagres.

mencionar que la etapa de reducción dura 30 minutos, mientras que la de sedimentación demora unos 40-50 minutos.



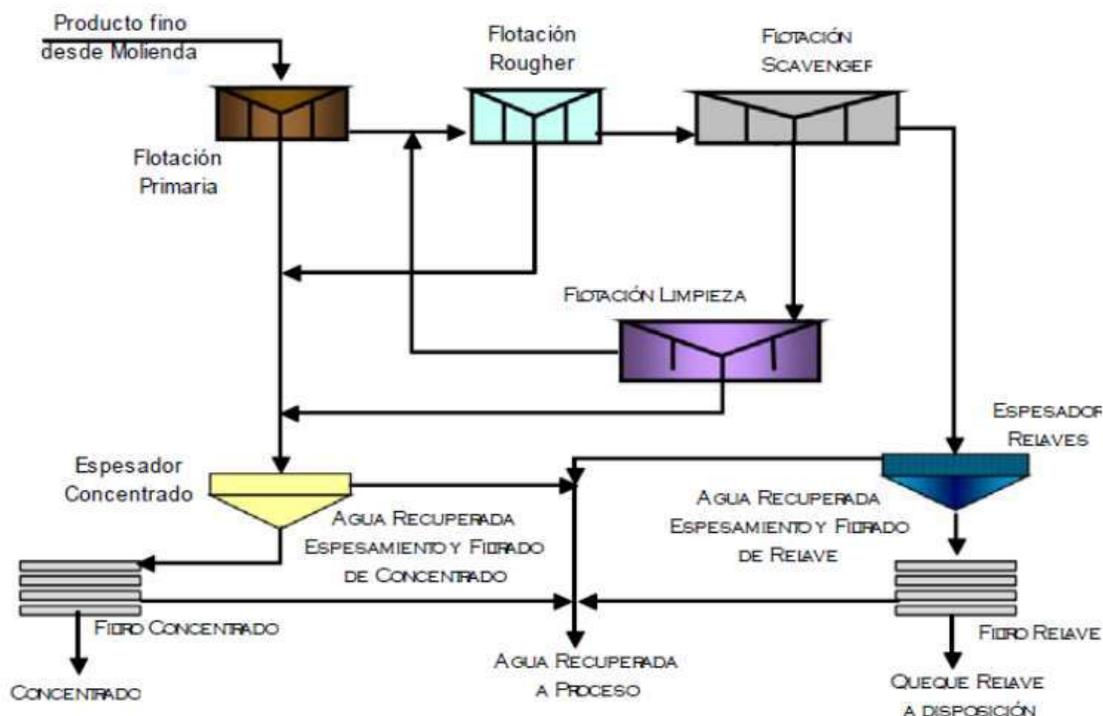
**Figura 3-26 Esquema de Hornos de Limpieza de la Fundición Chagres**

Fuente: Mediciones isocinéticas ch 5, Fundición Chagres, año 2019

Ahora bien, en las fundiciones Chuquicamata, Altonorte, Potrerillos, y Caletones para la limpieza de escoria, se optó por utilizar la vía metalúrgica, que funcionan a través de un proceso de flotación para recuperar el contenido de cobre que se encuentra como sulfuro de cobre atrapado en la escoria. El proceso completo asociado consiste en trasladar a través de ollas el material desde la fusión, donde ocurre una etapa de enfriamiento con agua, la cual contribuye al fraccionamiento de la escoria. Posterior a aquello, las ollas son trasladadas y volteadas para ser sometidas a fraccionamiento mediante el uso de un martillo neumático picador y un equipo rodante. Luego, se utilizan molinos semiautógenos (SAG) para la molienda gruesa, para posteriormente seguir con la molienda fina por medio de un molino de bolas. Después, este producto se traslada hacia la planta de flotación, donde se produce un concentrado de escoria que es espesado, filtrado y reintegrado a la fusión<sup>57</sup>. En el caso de las tres fundiciones de CODELCO, este proceso de flotación genera un concentrado de escoria con contenido de cobre de 8-9%, mientras que el material de descarga contiene niveles entre 0,5-0,6% y es almacenado como pulpa seca, luego de que esta se filtra y deposita. En el caso de Altonorte, se produce concentrado de escoria y es realimentado al reactor, además, se genera el relave, que es descartado.

<sup>57</sup> Flotación de Escorias Convertidor Teniente Fundición Potrerillos, CODELCO División Salvador.

A continuación, en la Figura 3-27 se presenta un esquema del circuito de flotación y de recuperación de agua de Potrerillos utilizado en el marco de la limpieza de escorias.



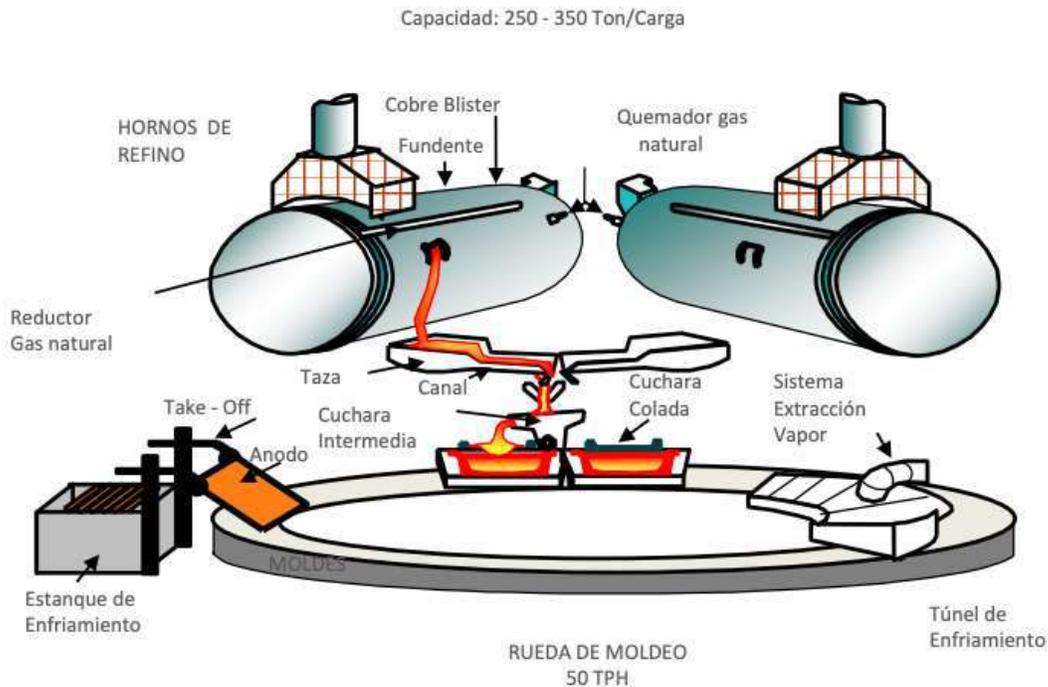
**Figura 3-27 Circuito de flotación y de recuperación de agua de Potrerillos**

Fuente: (Guarda, 2015)

### 3.2.1.6 Refinación

El proceso de refinación tiene como objetivo generar un producto según estándares de calidad en términos físicos, mecánicos y de pureza. El cobre blíster proveniente de los CPS se dirige a las distintas unidades de refino, para ser dispuesto a un proceso de oxidación, el cual debe ser seguido de una fase de reducción de oxígeno. Además, de ser necesario, se ingresan pequeñas cantidades de cal, que producen la formación de una escoria de descarte. Cabe señalar que el refino se realiza utilizando oxígeno como agente oxidativo y gas natural como agente reductor. De esta manera, se obtiene cobre anódico, con un contenido de cobre generalmente superior al 99,5%. Los equipos asociados a esta etapa son los hornos de refino y varían por fundición, en general, se utilizan de a varias unidades y de tipo basculante. Las fundiciones de Chuquicamata, Altonorte, Chagres y Caletones utilizan hornos de refino basculantes, contando con procesos batch (intermitentes). Especialmente, adicionalmente a lo anterior, la fundición Chuquicamata cuenta con dos hornos para fundir scrap, donde se tratan los ánodos y cátodos rechazados, además de disponer de seis hornos de refinación (ver ejemplo de configuración de dos hornos de refino de este tipo en la Figura 3-28). Asimismo, la fundición Chagres cuenta con dos hornos de refino basculantes. Luego, la división Caletones recibe el cobre blíster en los cuatro hornos de ánodos basculantes, de los cuales dos se encuentran en un lado de la nave y los otros hacia el

lado contrario, también, cabe señalar que generalmente se encuentran tres en funcionamiento y uno en mantención.



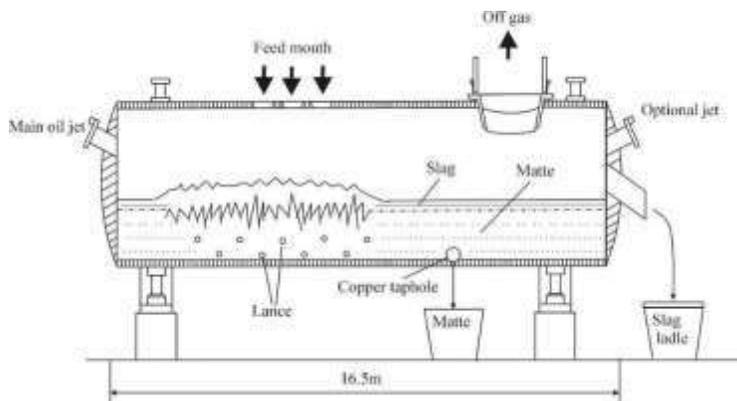
**Figura 3-28 Diagrama de la unidad de refino y moldeo de la fundición Chuquicamata**

Fuente: Entrevista con CODELCO<sup>58</sup>

Luego, en particular, la fundición Ventanas tiene un tratamiento de blíster que se realiza en una operación en línea. Esta operación utiliza un horno de retención, el cual recibe el material desde los CPS para generar escoria, la que retorna a la fundición. Por otro lado, el blíster remanente pasa al horno basculante para ser Refinado a Fuego (procesos RAF)<sup>59</sup> (ver esquema en Figura 3-29), donde a través de refinación electrolítica, los restos de ánodos son tratados y remodelados como ánodos.

<sup>58</sup> Ver minuta "Fundiciones CODELCO" en el Anexo E – Minutas de los anexos digitales

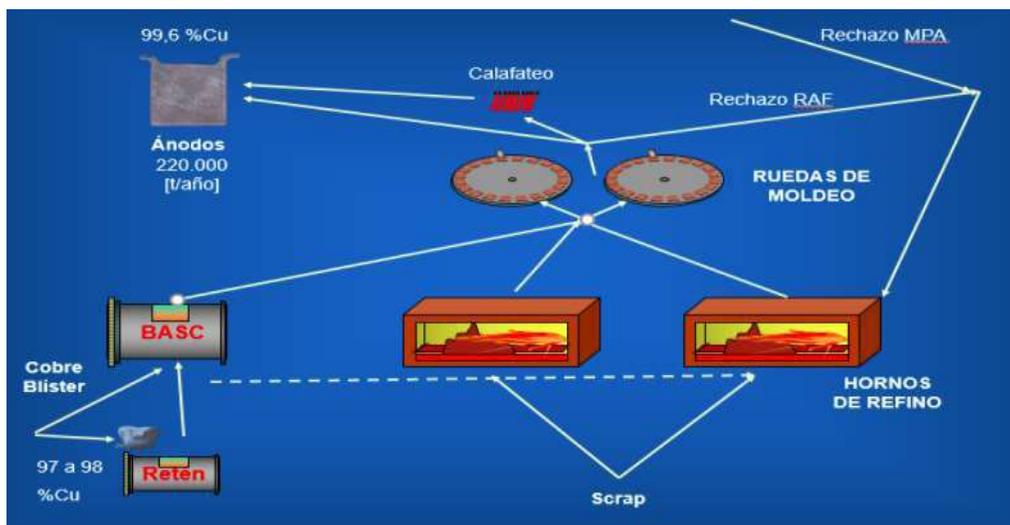
<sup>59</sup> (Benites & Ivannia, 2016)



**Figura 3-29 Esquema descriptivo de Horno de Refino tipo Basculante**

Fuente: (Zhao, Cui, & Wang, n.d.)

Por su parte, la fundición HVL también refina a fuego el cobre blíster (ver esquema descriptivo en Figura 3-30), con un horno único Wartsila, de capacidad de 200 toneladas por ciclo, el cual demora entre 5 y 6 horas en el proceso de refinación. En este se aplican los procesos de oxidación y reducción, en el primero se elimina el azufre mediante la inyección de oxígeno a través de dos toberas de aire, y luego, en el proceso de reducción, se realiza un *cracking* de hidrocarburo con gas licuado (compuesto de 80% propano y 20% butano) y vapor de agua.



**Figura 3-30 Esquema del proceso de refino a fuego**

Fuente: (Benites & Ivannia, 2016)

Análogamente, la fundición Potrerillos cuenta con dos hornos anódicos, los cuales son complementados con refinación electrolítica, hasta obtener cátodos comerciales de alta pureza (99,9% de contenido de cobre). Para este proceso, se sumergen los ánodos en una solución ácida, donde se aplica una densidad de corriente, lo que gatilla la disolución de los ánodos y la migración selectiva de los iones metálicos de cobre (Cerón Amigo, 2019). Así, se genera la separación de impurezas valiosas (oro y plata), además de aquellas perjudiciales para las propiedades químicas

y mecánicas del producto. En el proceso de tratado de blíster a través de procesos RAF, la oxidación también oxida al cobre, el cual es dirigido a la etapa de moldeo. En la Tabla 3-27, se observan las principales características de los equipos asociados a la etapa de refinación. En esta, se puede observar la cantidad de unidades, la capacidad, las dimensiones y el año de instalación.

**Tabla 3-27 Características de los Hornos de Refino**

Fundición	Cantidad de Equipos	Capacidad del Equipo	Dimensiones	Año de instalación
DCH	4 Hornos de Refino basculantes	250 t/d	4,0 [m]φ 9,2 [m] Largo	1952
	2 Hornos de Refino basculantes	350 t/d	4,6 [m]φ 9,2 [m] Largo	1990
	2 Hornos Fusión Scrap	250 t/d	4,0 [m]φ 9,2 [m] Largo	2000
ALN	1 Horno de Refino basculantes	1.200 t/d en conjunto	4,0 [m] Diámetro 11,0 [m] Largo	1996
	1 Horno de Refino basculantes			2003
	1 Horno de Refino basculantes			
POT	2 Hornos de Ánodos (refino)	250 t nominal c/u	3,65 [m]φ 9,1 [m] Largo	S/I
HVL	1 Horno de Refino a Fuego	9-12 ciclos/día	4,0 [m]φ 9,1 [m] Largo	1981
VEN	1 Horno de Retención	120 t/carga	3,4 [m] Diámetro 7,0 [m] Largo	1964
	1 Horno Basculante	200 t/carga	4,0 [m]φ 9,0 [m] Largo	1978
	2 Hornos de Refino	400 t/carga c/u	4,8 [m] Ancho 15,0 [m] Largo	1966
CHG	2 Hornos de Refino basculantes	544 t/d en conjunto	4,2 [m]φ 7,0 [m] Largo	1995
CAL	1 Horno de Refino basculantes	400 t/carga c/u	3,9 [m] Diámetro 11,7 [m] Largo	1988
	1 Horno de Refino basculantes			1989
	1 Horno de Refino basculantes		4,6 [m] Diámetro 10,7 [m] Largo	1988
	1 Horno de Refino basculantes			1998

S/I: Sin información

Fuente: Elaboración propia

Entre las características, destaca la fundición Chuquicamata, que cuenta con seis unidades para refino, donde dentro de aquellas, dos se dedican exclusivamente a la fusión de scrap. También, la fundición Caletones cuenta con cinco unidades de refino que, a pesar de tener distintas dimensiones, tienen la misma capacidad de carga, la cual corresponde a 400 toneladas por cada una. Luego, también se destaca la capacidad de refinación de la fundición Altonorte, donde se encuentra el horno con menor antigüedad en el territorio nacional (este fue instalado en 2003). Posteriormente, Potrerillos cuenta con dos unidades de refino de las mismas características geométricas y de capacidad. Por su parte, HVL cuenta con una única unidad, la cual satisface las capacidades y las condiciones operacionales de las etapas anteriores y posteriores del proceso de fundición. Adicionalmente, en Ventanas, los dos hornos de refino tienen una gran capacidad de refinación, de 400 toneladas por carga, estos fueron instalados en 1966. Por último, los hornos

de la fundición Chagres poseen las mismas características geométricas y capacidades, y fueron instalados en el año 1995.

### 3.2.1.7 Moldeo

Posterior a la etapa de refinación, se finaliza el proceso de producción de ánodos de cobre a través de moldeos. Esto se realiza a través de la extracción del material desde los hornos, por canaletas hacia ruedas de moldeo, donde se solidifica por contacto con el aire ambiente. Luego, se posicionan en agua de enfriamiento y se retiran hacia un área dedicada. Este proceso funciona por ciclos y depende de la producción y continuidad de etapas anteriores.

Tal como se describe en la Tabla 3-19, la fundición Chuquicamata tiene tres ruedas de moldeo Outotec (Twin) mientras que las fundiciones Altonorte y HVL cuentan con ruedas de moldeo Outokumpo (dos y una, respectivamente). Por su parte, Caletones posee una rueda de moldeo Outokumpo y dos Outotec (Twin). Además, Potrerillos tiene dos ruedas de moldeo marca DEMAG y Ventanas utiliza dos ruedas Walker. Por último, la fundición Chagres tiene un equipo modelo Wenmec. Ejemplos de estos equipos se pueden visualizar en las Figura 3-28 y Figura 3-30 proporcionadas en la subsección 3.2.1.6.

### 3.2.1.8 Tratamiento de gases

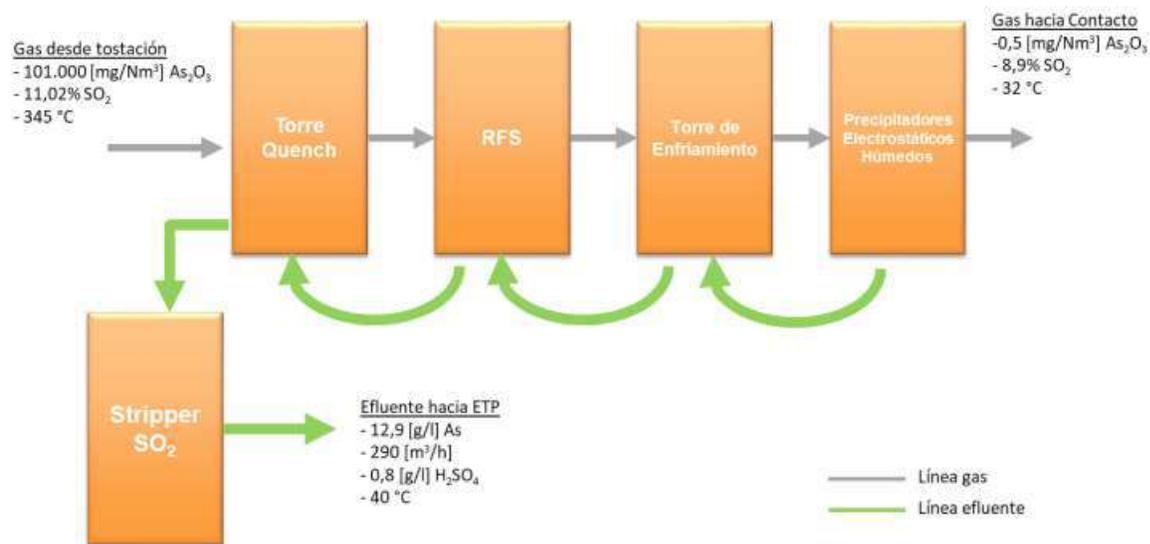
A lo largo de todo el procedimiento que llevan a cabo las fundiciones, se realizan distribuciones y tratamiento de flujos por configuraciones y necesidades específicas de captura y lavado de gases y contaminantes. Por esto, las plantas y unidades se asocian a otros nodos con una función de abatimiento de distintos compuestos. Esto comprende el tratamiento de los gases primarios con alto contenido de  $\text{SO}_2$  capturados en las campanas primarias en los equipos de fusión y convertidos en Plantas de Ácido Sulfúrico (PAS).

Aun así, los gases no capturados por los sistemas primarios de las operaciones unitarias del de los procesos de fundición son denominados gases secundarios. Estos tienen presencia durante los procesos de volteo de los hornos basculantes, por la ineficiencia de las campanas o durante el proceso de traslado de los materiales, e incluyen un menor contenido de  $\text{SO}_2$ . Una fracción de estos gases son capturados por campanas y son redirigidos a sistemas de tratamiento de gases secundarios. Los gases secundarios captados se someten a procesos de “lavado en seco” con recirculación, mediante reacción del gas con hidróxido de calcio, reactivo que posibilita la desulfuración. Posteriormente, los gases a la salida de la planta de tratamiento son evacuados a través de chimeneas, tras un paso por filtros de manga y ventiladores de tiro inducido (CODELCO, 2020b).

En general, las plantas de ácido sulfúrico instaladas en la tostadora Ministro Hales (DMH) y las fundiciones nacionales cuentan con tecnología de doble contacto (excepto en el caso de HVL y Caletones). Estas plantas de doble contacto permiten recolectar altos niveles de dióxido de azufre, superando generalmente el 98% de captación. Lo anterior se realiza mediante tres etapas sucesivas que son la purificación de gases, oxidación catalítica y absorción. También, una práctica

de abatimiento de arsénico comúnmente utilizada es el enfriamiento, ya que este componente se emite a altas temperaturas.

En asociación con la calcina recibida en la división Chuquicamata, la tostadora Ministro Hales cuenta con varios sistemas de abatimiento, principalmente asociados al tratamiento de gases. En la Figura 3-31, se describe el proceso de abatimiento mediante tratamiento de gases, donde se puede observar el flujo de los gases provenientes de la tostación, así como el flujo de los efluentes, y sus salidas respectivas hacia la planta de doble contacto (PAS) y la planta de tratamiento de efluentes (PTE). Además, las principales características de los sistemas de abatimiento en uso y equipos asociados se presentan en la Tabla 3-28 y Tabla 3-29, respectivamente. La torre Quench cumple con la función de saturar gases mediante enfriamiento, además de abatir parcialmente las impurezas y condensar el arsénico. Luego, el lavador de flujo radial (RFS, por sus siglas en inglés<sup>60</sup>), mediante la recirculación del ácido débil, cumple con retirar las impurezas con una eficiencia del 97%. Posteriormente, la torre de enfriamiento baja la temperatura de los gases y disipa el calor para cumplir con los balances de agua en la planta de ácido. Finalmente, tras captar polvos y neblina ácida, el stripper retira el dióxido de azufre disuelto en ácido débil para traspasar el gas a la línea correspondiente.



**Figura 3-31 Flujos de gases y efluentes en Ministro Hales**

Fuente: Entrevista con CODELCO<sup>61</sup>

<sup>60</sup> Denominado Radial Flow Scrubber en inglés.

<sup>61</sup> Ver minuta "Fundiciones CODELCO" en el Anexo E – Minutas de los anexos digitales

**Tabla 3-28 Características de los sistemas de abatimiento en Ministro Hales**

Equipo	Principio de funcionamiento	Marca	Modelo	Eficiencia nominal	Capacidad [Nm <sup>3</sup> /h]	Temp. [°C]
<b>Precipitadores Electrostáticos Secos (PES)</b>	El polvo se carga eléctricamente y es atrapado en placas colectoras.	FLSmidth	4 campos en serie	-	72.000	350
<b>Área de Limpieza de gases</b>	Enfriamiento, saturación, lavado y precipitación, electrostática de la corriente de gas.	Outotec GEA Bischoff	-	99,9%	77.000	350

Fuente: Entrevista con CODELCO<sup>62</sup>**Tabla 3-29 Descripción de los equipos utilizados para el abatimiento en Ministro Hales**

Equipo	Entrada [mg/Nm <sup>3</sup> ]	Salida [mg/Nm <sup>3</sup> ]	% de remoción de As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Torre Quench</b>	101.000	50.500	50%
<b>RFS</b>	50.500	1.515	97%
<b>Torre de Enfriamiento</b>	1.515	711	53%
<b>PES</b>	711	0,5	99,9%

Fuente: Entrevista con CODELCO<sup>63</sup>

En el caso de las fundiciones, la fundición Chuquicamata cuenta con dos Plantas de Ácido Sulfúrico (PAS) de marca MECS Dupont (Figura 3-32), y con una planta de tratamiento de efluentes de arsénico (abreviada ATP<sup>64</sup>) (Figura 3-33). Las plantas PAS cuentan con el objetivo de reducir las emisiones de anhídrido sulfuroso y arsénico, recibiendo los gases de los procesos de fusión y conversión. Análogamente, se genera efluente durante la etapa de lavado húmedo de gases metalúrgicos, antes de su tratamiento en las plantas de contacto. En la etapa de limpieza húmeda de gases se captan impurezas metálicas, tales como material particulado u arsénico, formando un efluente ácido. Este último es enviado a la planta ATP para la neutralización y fijación de arsénico. La planta de limpieza de gases cuenta con torres Quench, Venturi, de enfriamiento y precipitadores electroestáticos; esta es de marca GEA y tiene una capacidad de 93 kNm<sup>3</sup> por hora. Además, se habilitó un sistema de tratamiento de gases específico al secador, Horno Flash y Hornos de Refino, que cuenta con una capacidad de 88 m<sup>3</sup> por hora, y que es un modelo proporcionado por SNC Lavalin.

---

<sup>62</sup> Ver minuta "Fundiciones CODELCO" en el Anexo E – Minutas de los anexos digitales

<sup>63</sup> Ver minuta "Fundiciones CODELCO" en el Anexo E – Minutas de los anexos digitales

<sup>64</sup> La planta ATP de la División Chuquicamata se denomina alternativamente Planta de Tratamiento Efluente o Planta de Tratamiento de Arsénico.

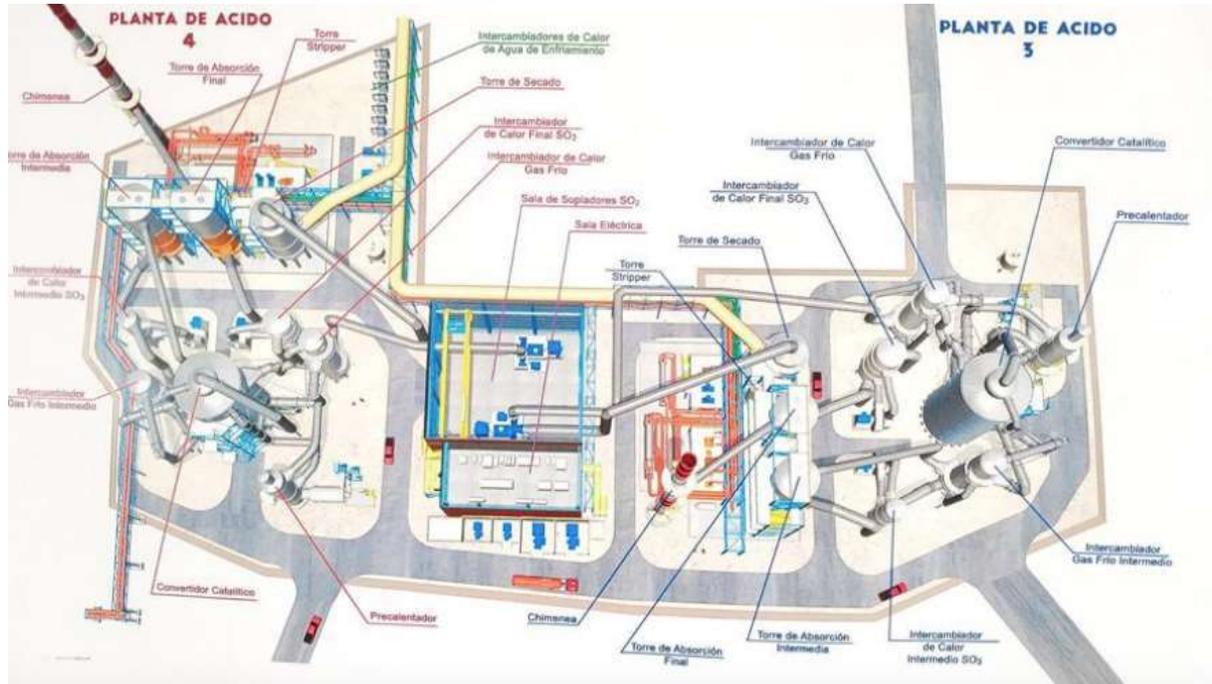
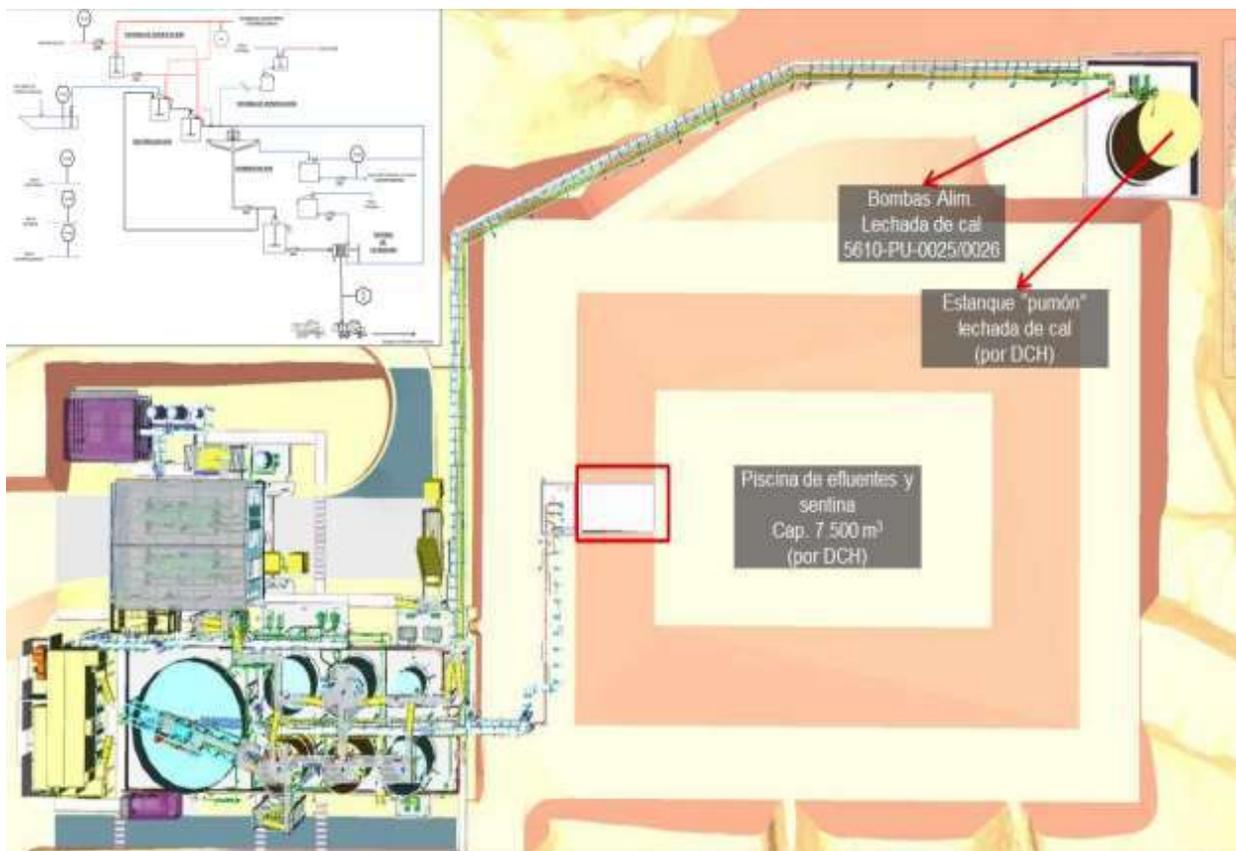


Figura 3-32 Planta de ácido sulfúrico de Chuquicamata

Fuente: Entrevista con CODELCO<sup>65</sup>

<sup>65</sup> Ver minuta "Fundiciones CODELCO" en el Anexo E – Minutas de los anexos digitales



**Figura 3-33 Planta de tratamiento de efluentes de Chuquicamata**

Fuente: Entrevista con CODELCO<sup>66</sup>

Además, la fundición Altonorte cuenta con varias líneas de manejo de gases: dos plantas de ácido sulfúrico (PAS), una planta de tratamiento de polvos (PTP), una planta de limpieza de escorias (PLE) y una línea de manejo de gases hacia la chimenea principal, la cual cuenta con un filtro de mangas. Adicionalmente, por su parte, el reactor y los CPS están dotados de una campana enfriada por agua, la cual permite minimizar la emisión de gases fugitivos por un sistema de ventilación. También, hay existencia de filtros de manga, los cuales llevan a cabo un proceso de limpieza de los gases secundarios, los que provienen de las campanas de los CPS y campanas menores de sangrías. Estos filtros utilizan cal hidratada en la entrada para el proceso de limpieza. Luego, los gases son transportados por ventilación para finalmente ser evacuados mediante chimenea.

Luego, el enfriamiento de gases permite la distribución a precipitadores electrostáticos hacia cada línea de manejo de gases. En particular, las PTP permiten reciclar polvos metalúrgicos provenientes del proceso de fusión de concentrado, a través de una lixiviación en estanques agitados, seguida por una filtración para separar el líquido y sólido. El líquido con contenido de cobre llamado "solución de lixiviación cargada" (PLS) es tratado para ser recirculado a la

<sup>66</sup> Ver minuta "Fundiciones CODELCO" en el Anexo E – Minutas de los anexos digitales

fundición. Las plantas de ácido de Altonorte poseen una capacidad de 209.000 Nm<sup>3</sup> por hora cada una, estas son de doble contacto y cuentan con una eficiencia mayor al 99,8%.

Por su parte, la fundición Potrerillos cuenta con una planta de ácido sulfúrico (ver características en la Tabla 3-30) y con un área de limpieza de gases para el acondicionamiento previo a la producción de ácido sulfúrico (Tabla 3-31). De esta manera, se disminuye la temperatura de los gases, luego hay un lavador de gases Venturi captador de polvos, y después el gas pasa por una torre de lecho empacada de enfriamiento, una torre empacada y posteriormente por Precipitadores Electroestáticos Húmedos (PEH) para retirar la neblina ácida que pudiera ser arrastrada. Posterior a esto, el gas entra a un área de contacto, donde se reduce el contenido de agua por absorción, para después formar trióxido de azufre a través de una reacción química. Antes de salir de la torre de absorción, el gas pasa por un filtro tipo vela, para evitar que las partículas de ácido sean arrastradas hasta la chimenea<sup>67</sup>. Con relación al control de emisiones, la fundición cuenta con una torre Otovent, para luego dirigir los gases a una torre humidificadora, donde se bañan los gases con ácido débil. Posteriormente, los gases pasan por un lavador y torre de enfriamiento, finalizando en precipitadores donde se elimina la totalidad del polvo en suspensión.

Continuando con la tecnología asociada al abatimiento de gases en la fundición Potrerillos, la Tabla 3-32 agrupa los equipos, junto a sus especificaciones técnicas y su posicionamiento en el flujo. En esta, se puede ver que varios equipos poseen una eficiencia de abatimiento cercana a 99%, mientras que la cámara de polvo y el Torre de Enfriamiento Evaporativo (TEE) del CT cuentan con un 6,8% de eficiencia, la cual es solo de 0,8% en el caso de los CPS. También, se observa que las temperaturas de los gases del CT y CPS son superiores al resto de los equipos, donde la menor temperatura registrada corresponde al filtro de manga de la Planta de Secado Fluosólido (PSF), siendo esta igual a 52°C, mientras que la mayor temperatura recopilada es igual a 668°C.

---

<sup>67</sup> Mediciones Isocinéticas CH29 de Metales Pesados en Chimenea Planta de Ácido, ETFA SERCOAMB 019-02, CODELCO División Potrerillos.

**Tabla 3-30 Equipos y características de planta de ácido sulfúrico de Potrerillos**

Equipo	Marca	Configuración	Otras características
Limpieza húmeda PAS	LURGI	Torre Otovent y 2 trenes paralelos de limpieza.	Eficiencia de limpieza: 99,6%
8 PEH Convertidor catalítico (Outotec)	LURGI GEA Bischoff	4 líneas en paralelo con 2 precipitadores en serie c/u.	-
2 sopladores principales	Siemens turbo machine	2 sopladores en serie operando.	Capacidad: 217.000 Nm <sup>3</sup> /h (bs)
Torre Secado	Metso Outotec	-	Flujo de irrigación: 2.000 tph
Convertidor Catalítico	Outotec	4 lechos de conversión, en configuración "3+1".	Eficiencia: 99,8%
Torre de Absorción Intermedia (TAI) y Final (TAF)	Metso Outotec	-	Flujo de irrigación TAI: 3.800 tph Flujo de irrigación TAF: 4.000 tph

Nota: La mantención de los equipos se realiza durante 8 horas a la semana, y la mantención anual dura 25 días.

Fuente: Entrevista con CODELCO<sup>68</sup>

**Tabla 3-31 Equipos y características de la planta de tratamiento de gases de Potrerillos**

Equipo y configuración	Marca	Características
Campana primaria de gases: 1 CT 3 CPS	Outotec	Modelo: Outotec Campana refrigerada con agua desmineralizada y compuerta móvil
TEE: 1 CT 3 para cada CPS	Outotec	Modelo: Vertical N° Lanzas de atomización: CT: 7 CPS: 4
Precipitador Electroestático Seco (PES): 1 línea CT 2 líneas CPS	FLSmith	Modelo: 4 campos en serie Eficiencia de la línea del CT: 98,9% Eficiencia de la línea del CPS: 93,2%
Ventilador de Tiro Inducido (VTI): 2 líneas CT 2 líneas CPS	Howden	Capacidad de la línea del CT: 143.000 Nm <sup>3</sup> /h Capacidad de la línea del CPS: 134.000 Nm <sup>3</sup> /h

Fuente: Entrevista con CODELCO<sup>69</sup>

Con relación a la captación de gases emitidos, la fundición Hernán Videla Lira cuenta con dos plantas de ácido sulfúrico de simple contacto, una está destinada para los gases del Convertidor Teniente, mientras que la segunda capta los gases de los dos CPS. Estas son de marca Lurgi y Monsanto, y cuentan con capacidades de 50.000 Nm<sup>3</sup> por hora y 80.000 Nm<sup>3</sup> por hora, respectivamente. Además, la fundición de ENAMI instaló una Planta de Tratamiento de Gases de Cola (PTGC), de modelo MECS con una capacidad de procesamiento de 150.000 Nm<sup>3</sup> por hora, la

<sup>68</sup> Ver minuta "Fundiciones CODELCO" en el Anexo E – Minutas de los anexos digitales

<sup>69</sup> Ver minuta "Fundiciones CODELCO" en el Anexo E – Minutas de los anexos digitales

cual efectúa el tratamiento del  $\text{SO}_2$  que no se alcanza a convertir en las plantas de ácido. La PTGC tiene como modo de operación el reaccionar los gases de dióxido de azufre con peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) a un 30% de concentración, generando ácido sulfúrico débil.

En comparación con lo anterior, la fundición Chagres tiene un sistema de tratamiento de gases donde se tratan los gases provenientes de las operaciones del HLE y del horno de refino. Estos gases están conformados por material particulado, azufre y arsénico, principalmente. Las emisiones que vienen desde el HLE, son enviadas a través de un ducto común hacia la planta de tratamiento de gases, la cual cuenta con una torre con un lavador tipo Quench y dos precipitadores electrostáticos. Por su parte, los gases se captan mediante una campana, en la cual se disminuye la temperatura mediante aire atmosférico infiltrado, y con el tiraje producido se dirigen hacia la planta. Luego, respecto a las emisiones del horno de refino, la planta ejecuta un enfriamiento y limpieza de gases. Respecto al secador, este cuenta con filtros de manga, los cuales capturan el material particulado de los vahos, a través de la extracción mediante Ventiladores de Tiro Inducido (VTI). Es importante señalar que los sólidos capturados por los sistemas de filtrados se reutilizan en otras etapas de la fundición, al igual que el material particulado recuperado de otros procesos, estos son dirigidos a tolvas de almacenamiento para ser utilizados en procesos de condensación<sup>70</sup>.

---

<sup>70</sup> Mediciones Isocinéticas CH29 de Metales Pesados en Chimenea Planta de Ácido, ETFA SERCOAMB 019-01, Anglo American S.A Chagres.

**Tabla 3-32 Características de equipos de abatimiento de gases en Potrerillos**

Equipo	Principio de funcionamiento	Marca	Modelo	Eficiencia nominal [%]	Capacidad [Nm <sup>3</sup> /h]	Temp. [°C]	Características específicas
<b>Cámara Polvo CT</b>	Cambio de dirección gases	Outotec	Outotec	6,8%	115.080	668	Entrada Cámara de Polvo
<b>TEE CT</b>	Cambio de dirección y enfriamiento de gases por evaporación de agua	Outotec	Outotec				
<b>PES CT</b>	Polvo se carga eléctricamente y es atrapado en placas colectoras	FLSmidth	4 campos en serie	98,9%	136.400	350	Entrada PES CT
<b>Cámara Polvo CPS</b>	Cambio de dirección gases	Outotec	Outotec	0,8%	55.975	668	Entrada Cámara de Polvo
<b>TEE CPS</b>	Cambio de dirección y enfriamiento de gases por evaporación de agua	Outotec	Outotec				
<b>PES CPS</b>	Polvo se carga eléctricamente y es atrapado en placas colectoras	FLSmidth	4 campos en serie	93,2%	68.757	350	Entrada PES CT
<b>Área Limpieza a PAS</b>	Enfriamiento, saturación, lavado y precipitación electrostática de la corriente de gas	LURGI	OTOVENT + 2 trenes paralelos limpieza	99,6%	208.660	347	Entrada OTOVENT
<b>Filtro Mangas PSF</b>	Separación de solido mediante filtro de tela tipo manga	BHA Original	Pulse-Jet Style Bags	99,0%	200.000	52	Entrada Filtro Mangas
<b>PTHN</b>	Enfriamiento, saturación, lavado y precipitación electrostática de la corriente de gas	GEA BISCHOFF	Torre Quench + 2 WESP en serie	99,4%	49.134	400	Entrada PTHN

 Fuente: Entrevista con CODELCO<sup>71</sup>
<sup>71</sup> Ver minuta "Fundiciones CODELCO" en el Anexo E – Minutas de los anexos digitales

En el caso de la fundición Ventanas, se dispone de una PAS para los gases emitidos por el Convertidor Teniente y los CPS, gases que son mezclados en una cámara común donde son conducidos a la planta de limpieza gases. El funcionamiento de la PAS comienza con la recepción de gases en la torre de lavado, para luego dirigirse a las torres de enfriamiento, los cuales retiran los efluentes hacia la planta de tratamiento de RILe mientras que los gases restantes van a precipitadores electrostáticos. En la Tabla 3-33 se pueden apreciar los sistemas de abatimiento con que cuenta Ventanas; en esta, se puede identificar que el principio de separación es de carácter físico para la mayoría de los equipos, a excepción de la torre de enfriamiento y la planta de tratamiento de RILes de la planta de ácido. Además, se cuenta con filtro de mangas para el secador, hornos de refino y CPS, donde la aplicación a los equipos convertidores corresponde a la línea de gases secundarios. En particular, respecto a los gases secundarios, el Convertidor Teniente cuenta con equipos de abatimiento para aquellos que son una campana, filtro de mangas y dispositivos para las sangrías de escoria y metal blanco. Asimismo, el horno eléctrico de limpieza de escorias cuenta con abatimiento a través de sangrías. Luego, se puede apreciar que las eficiencias de abatimiento de material particulado son superiores al 98% para los equipos que cuentan con información disponible.

**Tabla 3-33 Descripción de los equipos de abatimiento de la Fundición Ventanas**

Área	Equipo de abatimiento	Principio de separación	Eficiencia de abatimiento (Nominal)	Capacidad Optima [Nm <sup>3</sup> /h]	Flujos 2021 (promedio)		Temperatura Operación [°C]
					Isocinéticos [Nm <sup>3</sup> /h]	Instrumentos [Nm <sup>3</sup> /h]	
Secador Rotatorio	Filtro de Mangas	Física (Mecánica)	98 - 99% MP	45.000	40	-	110 - 100
Secador Rotatorio	Filtro T500		-	-	3,5	-	110 - 100
HLE/HE	Precipitador Electrostático Seco		98 - 99% MP	38.000	38,1	-	340 - 300
CT	Pre y Cámara		-	65.000	-	-	580 - 540
CT	Torre Enfriamiento Evaporativas		-	68.000	-	-	540 - 360
CT	Precipitador Electrostático Seco		98% MP	70.000	-	74	360 - 300
CPS 1	Pre y Cámara		-	48.000	-	-	580 - 540
CPS 1	Torre Enfriamiento Evaporativas		-	50.000	-	-	540 - 360
CPS 2	Pre y Cámara		-	48.000	-	-	580 - 540
CPS 2	Torre Enfriamiento Evaporativas		-	50.000	-	-	540 - 360
CPS 3	Pre y Cámara		-	48.000	-	-	580 - 540
CPS 3	Torre Enfriamiento Evaporativas		-	50.000	-	-	540 - 360
CPS Smith	Precipitador Electrostático Seco		98% MP	55.000	-	55	360 - 300
Hornos de Refino	Torre de Enfriamiento		-	44.000	40	-	-
Hornos de Refino	Filtro de Mangas		Física (Mecánica)	99% MP	44.000	40	-
PAS	Torre Enfriamiento K1	Química	-	120.000	101	-	70 - 65
PAS	Precipitadores Electrostáticos Húmedos	Física (Mecánica)	99% MP	125.000	-	120	40 - 35
PAS	Planta de Tratamiento de RILes (Neutralización)	Química	-	10	-	-	-
CT Secundario	Campana Filtro de Mangas	Física (Mecánica)	99% MP	200.000	-	200	60 - 80
CPS Secundario	Filtro de Mangas	Física (Mecánica)	99% MP	120.000	-	120	60 - 80
HLE/HE Secundario	Sangrías MB	-	-	-	-	120	-
Post-PAS Secundario	Planta de Tratamiento Gases de Cola <sup>(1)</sup>	Química	95 - 99% SO <sub>2</sub>	116.000	-	-	-

(1) Información obtenida de (COPRIM, 2012).

Fuente: Entrevista con CODELCO<sup>72</sup>

<sup>72</sup> Ver minuta "Fundiciones CODELCO" en el Anexo E – Minutas de los anexos digitales

### 3.2.2 Medidas implementadas para dar cumplimiento a norma y potencial de mejora

En esta sección se identifican y presentan las medidas implementadas para dar cumplimiento a la norma del D.S. 28 /2013 del MMA, junto con el potencial de mejora existente. En este sentido, se señalan los cambios de configuración, cambio y mantención de equipos y de unidades con el objetivo de reducir emisiones y tener un mejor tratamiento de gases, en el marco de obtener una optimización de los procesos.

Cabe señalar, que se ejecutaron las entrevistas con ENAMI, Angloamerican, CODELCO (Chuquicamata, Potrerillos, Ventanas y Caletones) y la fundición Altonorte, entre el 1 y 16 de diciembre de 2021. En dichas entrevistas se revisaron los antecedentes manejados a la fecha por el equipo consultor, y los titulares presentaron una descripción de sus procesos, medidas de mitigación instaladas, así como otros antecedentes relevantes. Posterior a la entrevista, los titulares hicieron entrega de los antecedentes expuestos en conjunto con otros antecedentes complementarios. Adicionalmente se consideraron los antecedentes presentados en la documentación dispuesta por la contraparte y la de acceso público en las plataformas digitales<sup>73</sup>. Las fechas entrevistas realizadas se documentan en la Tabla 3-34.

**Tabla 3-34 Fechas de entrevistas a fundiciones**

Fundición	Fecha de entrevista
HVL	1/12/2021
CHG	3/12/2021
DCH	13/12/2021
DMH	13/12/2021
POT	13/12/2021
DVE	13/12/2021
CAL	13/12/2021
ALN	16/12/2021

Fuente: Elaboración propia

Las medidas implementadas se presentan en la Tabla 3-35 con el detalle por etapa del proceso de la fundición de cobre.

---

<sup>73</sup> En el caso de CODELCO y Chagres, se entregan antecedentes conforme con el numeral 3 de la RE 1119 SMA/2020.

**Tabla 3-35 Proyectos y/o medidas implementadas para dar cumplimiento a la norma de emisión, D.S. 28/2013 del MMA**

Etapa del proceso	Chuquicamata	DMH	Altonorte <sup>1</sup>	Potrerrillos	Hernán Videla Lira	Ventanas	Chagres	Caletones
<b>Preparación de concentrados</b>	-	Mantenimiento tostación DMH	Modernización sistema de secado (Secado indirecto)	-	-	Aumento captación MP Secador	Modernización sistema de secado	Optimización PSFLUO
<b>Fusión</b>	HF Potenciado	-	-	-	-	Captación gases secundarios CT y sangrías	-	-
<b>Conversión</b>	Incorporación CPS N°5 Reemplazo campanas primarias y secundarias	-	-	-	Alimentación carga fría a CPS	Sistema Mecanizado Carga Fría CPS Captación Gases secundarios CPS	-	-
<b>Limpieza de escorias</b>	-	-	-	-	-	Aumento captación MP y gases secundarios HLE/HE y sangrías	-	Planta Limpieza de Escorias
<b>Refinación</b>	Planta de tratamiento de humos visibles	-	Reforming a gas natural	Sistema de tratamiento de Humos Negros	Sistema de eliminación Humos Negros RAF	Planta de tratamiento de humos visibles RAF	Planta de tratamiento de gases de horno de refino	Reducción opacidad humos Hornos Anódicos

Etapa del proceso	Chuquicamata	DMH	Altonorte <sup>1</sup>	Potrerrillos	Hernán Videla Lira	Ventanas	Chagres	Caletones
<b>Tratamiento de gases</b>	Aumento capacidad de tratamiento de efluentes  Sistemas de tratamiento de gases del Secador N°6, HF y Hornos de Refino  Implementación de las plantas de ácido N°3 y N°4, modificando tecnología de simple contacto a doble contacto	-	Filtro de Mangas (tratamiento de gases secundarios y sangrías)  Sustitución del catalizador de la PAS°3, por uno nuevo con cesio (julio/2012)	Mejoramiento integración captación procesamiento gases  Modificación de la planta de ácido de simple contacto a doble contacto	Planta De Tratamiento de Gases de Cola	Tratamiento gases de cola  Reemplazo Intercambiador de calor y Torre k5  Tratamiento de gases secundarios	Mejora Tratamiento de gases HR y HLE	Sistema de reducción de emisiones plantas de ácido

Las celdas rellenas con un guion “-” quieren decir que no se implementó medida o proyecto en la fundición para el proceso correspondiente.

1. Cabe destacar que Altonorte implementó algunas medidas no sólo para dar cumplimiento al D.S. 28/2013, sino que también pasó por un proceso de sanción por superar los límites de SO<sub>2</sub> establecidos por RCA. Es por esto que cambiaron el secador por uno a vapor e incorporaron cesio en el catalizador, entre otras medidas.

Fuente: Elaboración propia

De forma complementaria, en la Figura 3-34 se presenta el cronograma de eventos relevantes y proyectos implementados en el marco del D.S. 28/2013 del MMA. En esta, se pueden ver los procesos de ejecución de proyectos de ingeniería para alcanzar los límites de emisión y porcentajes de captura y fijación exigidos. Las inversiones realizadas, junto con los plazos, conllevan estudios de pre-factibilidad, factibilidad, aprobación de inversiones, obtención de autorizaciones y permisos, para finalmente ejecutar la puesta en marcha. Cabe destacar, que los proyectos fueron realizados específicamente por cada fundición para cumplir con la normativa a la fecha de su entrada en vigencia, es por esto, que se pueden apreciar trabajos en los años anteriores al comienzo de la evaluación del cumplimiento del decreto. En general, se pueden observar proyectos asociados a recambio y potenciamiento de equipos, instalación y mejoramiento de plantas de tratamiento de gases, mejoramiento de captación de gases y medidas asociadas a mejorar la medición de la opacidad de unidades.

Fuente	Proyecto	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
DMH	Mantenimiento Tostación														
DCH	HF Potenciado														
	Aumento Eficiencia PAS Doble Contacto/Absorción N3 y N4														
	Sistema PTG Secador N6, HF y HR														
	Planta de Tratamiento de Humos Visibles														
ALN	Reemplazo Campanas 1rias y 2rias CPS N3, N6 y N7 e implementación Sto CPS														
	Aumento Capacidad Tratamiento de Efluentes														
	Campanas Secundarias Fusión y Conversión														
	Sustitución del Catalizador con cesio PAS <sup>3</sup>														
POT	Mejoramiento Proceso Secado														
	Reforming (Humos Negros y Opacidad)														
	Cambio de quemador a GNL														
	Habilitación captura de Gases desde los hornos de ánodos														
HVL	Mejoramiento Integral Captación y Procesamiento de Gases														
	Humos Negros														
VEN	Plan de Actualización de Sistemas de Medición														
	Planta de Tratamiento de Gases de Cola														
	Mejoramiento del Sistema de Captura de Gases Primarios y sus respectivos Anexos														
	Eliminación de Humos Negros RAF														
CHG	Sistema de Alimentación de Carga Fría a CPS														
	Centro de Acopio Cobre Concentrado y Mallas Perimetrales														
	Aumento captación MP Secador Concentrado														
	Aumento captación MP Horno Eléctrico														
	Reemplazo Intercambiador de Calor														
	Sistema Mecanizado Marga Fría CPS														
	Captación Gases Secundarios CPS														
	Captación Gases Sangría CT y HE														
	Tratamiento Gases de Cola														
	Reemplazo Torre k5														
	Eliminación de Humos Visibles RAF														
	Captación Gases Secundarios CT														
CAL	Instalación paño N°6 SS/EE N°2														
	Tratamiento Gases Secundarios CPS y Sangrías HE/CT														
	Tratamiento de Gases Secundarios CT														
	Planta Tratamiento Gases HR														
CHG	Secador Kumera														
	Planta Tratamiento de Gases HLE														
	Planta Tratamiento de Escorias														
CAL	Reducción de Emisiones														
	Reducción Opacidad Humos Hornos Anódicos														
	Optimización Plantas Secado Fluosólidos 1 y 2														
Publicación DS 28															
Entrada en Vigencia Altonorte, Ventanas y Chagres															
Entrada en Vigencia DMH, Chuquicamata, Potrerillos, HVL y Caletones															

**Figura 3-34 Cronograma de proyectos asociados para el cumplimiento del D.S. 28/2013 del MMA**

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2.1 Chuquicamata

Las medidas implementadas en la fundición Chuquicamata y la División Ministro Hales fueron las que tuvieron el mayor nivel de inversión en comparación con las otras fundiciones nacionales; aquellas medidas conllevaron distintas actividades. Es importante señalar que la detención de actividades en la división Chuquicamata entre diciembre del año 2018 y mayo de 2019 dieron lugar a la ejecución de proyectos con el fin de alcanzar los niveles de captura exigidos por el D.S. 28/2013 del MMA.

Estos proyectos y mejoras significaron una nueva configuración del esquema operacional. Principalmente, se puede encontrar el mejoramiento de fundición por medio de un equipo Horno Flash potenciado, donde se modificó la torre de reacción, alargándose en un metro, para poder generar que la reacción ocurra dentro de esta y que el horno tenga mayor capacidad de fusión. Adicionalmente, en la unidad de conversión se reemplazó el CPS N°5, y se reemplazaron campanas primarias y secundarias.

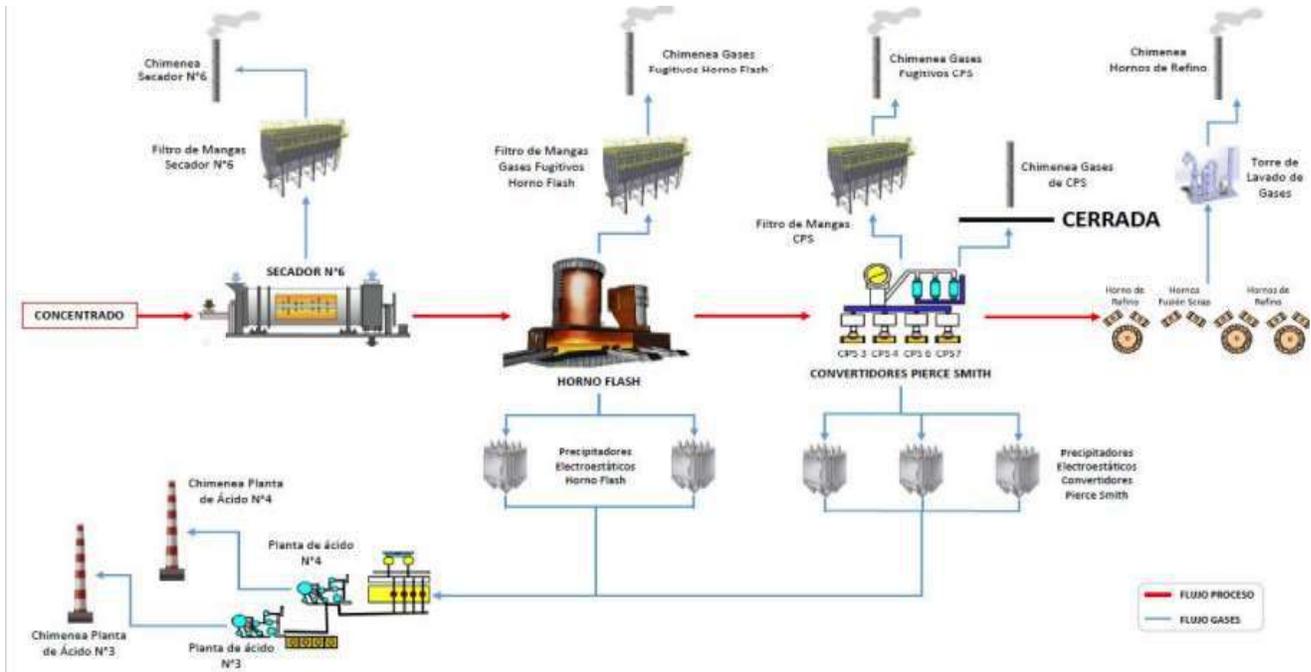
También, se ejecutó un proyecto de habilitación de un sistema de tratamiento de gases asociado a un Secador (N°6), Horno Flash y Hornos de Refino. Lo anterior se complementa con el *overhaul* al sistema de limpieza de gases y la optimización de la Planta de Tratamiento de Efluentes (PTE). Esta última tiene la función de retirar el arsénico como arsenito de calcio para posteriormente ser depositado en confinamiento.

Además, también en materia de tratamiento de gases, la fundición aumentó la eficiencia las plantas de ácido sulfúrico N°3 y N°4, mediante un *upgrade* desde simple contacto a doble contacto/doble absorción. Estas se ven condicionadas por el funcionamiento de los CPS, los cuales deben garantizar que los balances de los elementos en los gases sean tengan un carácter lo más estable posible. Particularmente, el contenido de azufre, el cual debe rondar por niveles cercanos al 12% para obtener las condiciones operacionales óptimas para procesos posteriores, tal como la obtención de ácido sulfúrico.

Luego, el reemplazo de las campanas primarias y secundarias de los CPS N°3, N°6 y N°7, además de la implementación del reemplazo del quinto convertidor tuvieron lugar dentro de las medidas ambientales.

Además, los gases fugitivos de los CPS y HF son alimentados a chimeneas y se cuenta con una etapa de lavado de gases en humos negros, en una torre específica para que no se emita hollín en la reducción.

En la Figura 3-35, se proporciona un diagrama de la gestión de gases que se realiza en Chuquicamata.



**Figura 3-35 Gestión de gases en Chuquicamata**

Fuente: Entrevista con CODELCO<sup>74</sup>

A pesar de ser otra división, Ministro Hales (DMH) procesa los concentrados en una etapa anterior a la fundición Chuquicamata, a través de una planta de tostación. De esta manera, el concentrado de cobre es convertido en una calcina de bajo contenido de arsénico y alta concentración de cobre (ver detalles en la subsección 3.2.1.1). En esta división se realizaron mantenimientos y un aumento de capacidad de beneficio de 660 kt/año a 780 kt/año<sup>75</sup>, entre el año 2018 y el 2019, además, el diseño de la planta tiene especial atención en las tronaduras y el control de polvo.

Luego de la tostación en DMH, se cuenta con tratamiento de gases para la captura de arsénico, tratado con cal, donde posteriormente son enfriados y expandidos. Además, existe un tratamiento de polvos mediante tolvas, los cuales son recirculados al tostador. La limpieza de gases cuenta con equipos como torre Quench, lavador de flujo radial y torre de enfriamiento empacada, esta última permite mayor área de flujo mediante esferas de prolipropeno.

### 3.2.2.2 Altonorte

Para el 2017, la fundición Altonorte ya cumplía con los nuevos estándares impuestos por el D.S. 28/2013 del MMA. Aun así, se realizaron modificaciones tecnológicas y operacionales para la entrada en vigencia de la norma. Cabe destacar que algunos cambios no fueron hechos sólo para

<sup>74</sup> Ver minuta "Fundiciones CODELCO" en el Anexo E – Minutas de los anexos digitales

<sup>75</sup> RE 0335/2017, SEA, Aumento Capacidad de Beneficio en Planta de Tostación.

dar cumplimiento a las exigencias del D.S. 28/2013, sino que también tuvieron relación con un proceso de sanción originado por la superación de los límites de SO<sub>2</sub> establecidos por la RCA. Es por esto que se cambió el secador por uno a vapor e incorporaron cesio en el catalizador, entre otras medidas.

En primer lugar, respecto al proceso de secado, se modifica el equipo para limitar las emisiones de material particulado, esto ocurre en el periodo 2011-2014 y consistió en instalar el secador Kumera, que actualmente se encuentra en la fundición. Esto significó pasar de un proceso de secado directo a uno indirecto, a través de calentamiento por vapor. También, esta tecnología no emite dióxido de azufre y se asocia a emisiones de dióxido de carbono más bajas que el secado directo, ya que utiliza combustible indirecto.

Luego, la modificación de las configuraciones de los equipos, flujos y procesos permitió desarrollar un sistema de recuperación de calor desde las calderas y la planta generadora de vapor, la cual funciona con gas natural. Los gases de estos procesos pasan por un filtro de mangas. Asimismo, actualmente se cuenta con plantas de ácido con tecnología de doble contacto y doble absorción, permitiendo niveles de eficiencia mayores a las anteriores.

También, se aplicó un proceso de *reforming*, el cual permite *crackear* al gas natural. Esto sirve para que no se generen humos negros por la mezcla de vapor con gas natural en el horno de refino, al momento de capturar oxígeno. Este mejoramiento va de la mano con las mediciones de opacidad impuestas por el decreto, las cuales fueron modificadas ya que anteriormente se inyectaba el combustible por las toberas, para retirar el oxígeno. Este proyecto tuvo su implementación en el periodo de 2014-2016.

Ahora bien, los filtros de manga aplicados para el aumento de captura de gases, llevan a cabo un proceso de limpieza de los gases secundarios, los que provienen de las campanas de los CPS y campanas menores de sangrías de fusión. Estos filtros utilizan cal hidratada en la entrada para el proceso de limpieza, luego los gases son transportados por ventilación para finalmente ser evacuados mediante chimenea.

Además, se tuvo la implementación de una planta satélite regasificadora para abastecer de gas natural al sistema interno. Este material se acumula en un estanque destinado a ese fin con el gas líquido, para pasar por vaporizadores y cambiar a fase gaseosa, para ser despachado. Este proceso conlleva una disminución en las emisiones de dióxido de azufre.

También, se incorporó la sustitución del catalizador de la planta de ácido N°3 del complejo. El catalizador era en base a Pentóxido de Vanadio y se sustituyó por uno nuevo que contiene cesio, sustancia que permite mejorar la eficiencia de captura de dióxido de azufre. Este proyecto fue implementado en el mes de julio/2012.

Cabe destacar el conjunto de hallazgos encontrados en el informe de fiscalización DFZ-2013-814-II-RCA-IA asociadas a varias RCA. En estos, se describe la conformidad en los puntos de emisiones

en chimenea de gases fugitivos mediante la RCA N°193/2012 y de la PAS°3, por medio de la N°193/2012, los cuales superan los límites de emisión anual de dióxido de azufre. Dado esto, afecta en las medidas implementadas en la fundición, que colaboran al cumplimiento del D.S. 28 MMA.

Finalmente, se encuentran tres proyectos aún no realizados, uno que habilitará la captura de gases desde los hornos de ánodos, el cual se espera para el 2023. Por otro lado, el terreno de la fundición ha sido modificado mediante un proyecto de caminos internos, el cual tiene como plan el asfaltado de los caminos para así permitir la remoción de material particulado. Por último, se encuentra en desarrollo la implementación de un sistema interno de distribución y control de gas natural licuado para el uso de quemadores en los CPS y hornos de refino.

### 3.2.2.3 Potrerillos

En el marco de la aplicación del D.S. 28/2013, la fundición Potrerillos ejecutó dos proyectos ambientales, uno para el mejoramiento de integración de captación de procesamiento de gases, además de un proyecto para el tratamiento de humos negros para dar cumplimiento a los niveles de opacidad exigidos en la norma.

De esta manera, el proyecto de captación y limpieza de gases contempló nuevas campanas para los equipos de las etapas de fusión y conversión, además, se adquirieron nuevos precipitadores electrostáticos, y se realizaron reparaciones a los existentes. También, se integró un nuevo layout de ductos de manejo de gases, una nueva torre de lavado Otovent y un cambio de ductos de gases. Por otro lado, la planta de ácido tuvo modificaciones en las torres humidificadoras y de enfriamiento, además de cambio y reparación de intercambiadores, rotores y convertidor catalítico, entre otros. Adicional a eso, se incorporó una planta de doble contacto/absorción. Asimismo, se reacondicionó la Planta de Tratamiento de Efluentes y se incorporó un sistema de recuperación de calor <sup>76</sup>.

Además, cabe señalar que la construcción y montaje de la planta de tratamiento de gases, provenientes de los hornos de ánodos, considera tecnología GEA Bischoff, una planta de separación sólido-líquido, floculantes y soda. Lo anterior permite tratar los humos negros de la fundición<sup>77</sup>.

También, es importante destacar que, a la fecha, se está trabajando en un proceso de modernización de sensores de niveles de opacidad para mejorar la confiabilidad de las mediciones, ya que varios de estos equipos son parcialmente manuales. Se adquirieron nuevos equipos que se instalarán en marzo del año 2022.

---

<sup>76</sup> Proyecto mejoramiento integral Captación y Procesamiento de Gases Fundición Potrerillos, CODELCO, Noviembre 2014.

<sup>77</sup> Construcción y Montaje Proyecto Tratamiento Humos Negros Fundición Potrerillos, CODELCO, Marzo 2018.

#### 3.2.2.4 Hernán Videla Lira

La fundición Hernán Videla Lira ha implementado mejoras en el marco del D.S. 28/2013 del MMA, por lo cual ha adquirido equipos y unidades, además de instalar un sistema de eliminación de humos negros en hornos de refino a fuego, e implementar mejoras del sistema de alimentación de carga fría a los CPS.

En primer lugar, se modificó la configuración del tratamiento de gases, a través de la adquisición de una Planta de Tratamiento de Gases de Cola (PTGC), con el fin de mejorar el sistema de captura de gases primarios. Esta planta tiene un equipo Dynawave-Scrubber, una torre desulfuradora y bombas de circulación. La planta genera ácido sulfúrico producto al 50% de concentración, el que se descarga en circuito de zona de contacto en ambas plantas de ácido, o también, se genera como ácido producto para su proceso en otras plantas. Dada esta modificación, las chimeneas de las Plantas de Ácido (PAS) se eliminaron y ahora los gases se envían a la PTGC.

En el mismo sentido, se realizó un cambio en la materialidad del tren de gases, además de reparación de los ductos del sistema de manejo de gases de las plantas de ácido. En una de las PAS se cambió el intercambiador de calor y la torre de catálisis, además de los hornos puesta en marcha. También, se implementó un sistema de alimentación de carga fría a los CPS, de manera de reducir su número de giros en su operación. Respecto a estos equipos convertidores, se repararon las campanas de captación de gases.

Por otra parte, se realizó la construcción y montaje de un sistema de eliminación de humos negros en el proceso de refinación anódica, mediante el uso de gas licuado de petróleo reformado con vapor.

#### 3.2.2.5 Ventanas

Respecto a la fundición Ventanas, se realizaron numerosos proyectos con la intención de aumentar la capacidad de captación y cumplimiento de la norma.

Entre los principales, se pueden encontrar proyectos asociados a la captación de gases secundarios del CPS y CT, captación de gases de sangría de CT y HLE/HE, de eliminación de humos visibles RAF y tratamiento de gases de cola. Luego, se encuentra el reemplazo de la torre k5, intercambiador de calor, además del aumento de captación de material particulado en el secador y en el horno eléctrico. Además, se elaboran proyectos de centro de Acopio CuCons y Mallas Perimetrales, sistema mecanizado marga fría para los CPS e instalación de paño N°6 SS/EE N°2.

Además, la RCA 294/2016 del proyecto “Tratamiento de Gases Secundarios Convertidor Teniente” incluye el detalle de la ejecución y las etapas de los sistemas implementados. En estos se encuentra, la captación y limpieza de los gases de sangrías del CT y del Horno Eléctrico, además de los gases secundarios de los CPS y del CT, todos estos a través de un sistema de captación, conducción y limpieza seca en filtros de manga. Luego, el tratamiento de gases fugitivos de los

CPS, sangría de CT y del Horno Eléctrico, además de los gases secundarios del CT, a través de un sistema de tratamiento de gases.

### 3.2.2.6 Chagres

La fundición representada por Anglo American S.A, cumplía con seis de los diez estándares de la norma, por lo que las medidas implementadas son específicas para las unidades donde el límite de emisión de contaminantes es exigido.

Dado esto, uno de los proyectos es la modernización del sistema de secado de concentrados, mediante el cual se efectuó un reemplazo de dos secadores por equipos con tecnología de mayor eficiente en el uso de energía, además de una mayor captura de material particulado.

También, la mejora de tratamiento de gases de los hornos de refino, donde se instaló un sistema de abatimiento de las partículas remanentes para los procedimientos de enfriamiento y lavado, además de un sistema de filtrado.

Luego, se elaboró una planta de tratamiento de gases de los hornos de limpieza de escorias, la que originó un sistema de abatimiento equivalente al de los hornos de refino, además de requerir dos precipitadores electroestáticos, dada la mayor cantidad de material particulado en este proceso.

### 3.2.2.7 Caletones

En la división Teniente de CODELCO, se ejecutaron varios proyectos, los cuales tienen como objetivo la reducción de emisiones y la optimización de procesos.

En primer lugar, se incorporó una planta de limpieza de escorias. Luego, hubo un proyecto ambiental asociado a la reducción de emisiones y otro asociado a la reducción de opacidad de humos de los hornos anódicos. Además, se optimizaron las Plantas de Secado Fluosólido (PSFLUO).

En particular, el proyecto de limpieza de escorias considera la instalación de una planta de chancado, molienda y flotación para las escorias provenientes del CT. Además, se instalaron dos sistemas de tratamiento de gases de cola para cada planta de lavado, con equipos reactores SULFACID. También, la inversión asociada a la reducción de opacidad de humos visibles significó la instalación de dos sistemas de tratamiento de gases provenientes de la refinación anódica de cobre, esta configuración está compuesta por una torre de enfriamiento evaporativa, filtros de manga y VTIs, junto a una nueva chimenea de evacuación. Asimismo, se intervinieron las Plantas de Secado Fluosólido (PSFLUO), mejorando su productividad y capacidad, además de disminuir las emisiones de material particulado.

### 3.2.3 Descripción del mercado o rubros para fundiciones de cobre y fuentes emisoras existentes

Actualmente en Chile existen siete fundiciones de cobre las cuales tienen una capacidad de procesamiento de concentrado que van desde en torno a 400 kt/año, como lo son Hernán Videla Lira y Ventanas, hasta cerca de 1.400 kt/año como Chuquicamata y Caletones. En total la capacidad de procesamiento de concentrados instalada está en torno a las 6.000 kt/año (ver Tabla 3-36). En el año 2020 el procesamiento reportado superó los 4.600 kt de concentrado, lo que representa un factor de planta de 79,2%.

A esta capacidad de producción de las fundiciones se suma la planta de tostación de Ministro Hales que actualmente tiene una capacidad de producción de calcinas de 550 kt/año. Esta planta produce calcinas con un contenido bajo en arsénico (en torno a 0,3%) a partir de concentrados de cobre con un contenido alto de cobre (cercanos al 6%). Las calcinas producidas son luego procesadas en algunas de las fundiciones chilenas, notablemente en Chuquicamata, o pueden ser comercializadas. Respecto a su producción del año 2020, según lo reportado en el marco del D.S. 28/2013 del MMA, se produjeron 100.559 t/año de finos de cobre. A partir de dicho valor se estima un factor de planta de 44,4%, en línea con la producción reducida de la fundición Chuquicamata, a lo que se suma un periodo de mantención en el último trimestre del año.

**Tabla 3-36 Fundiciones chilenas, capacidad y procesamiento [t/año], año 2020**

Fundición	Capacidad de procesamiento	Procesamiento 2020	Factor de planta 2020
Fundición Chuquicamata	1.170.000	661.423	56,5%
Fundición Altonorte	1.160.000	1.050.188	90,5%
Fundición Potrerillos	680.000	489.173	71,9%
Fundición HVL	380.000	313.142	82,4%
Fundición Ventanas	425.000	360.664	84,9%
Fundición Chagres	650.000	512.673	78,9%
Fundición Caletones	1.400.000	1.258.914	89,9%
<b>Total</b>	<b>5.865.000</b>	<b>4.646.177</b>	<b>79,2%</b>

Fuente: Elaboración propia según reportados por titulares en el marco del D.S. 28/2013 del MMA

Al analizar el factor de planta a nivel de fundición, llama la atención la fundición Chuquicamata que sólo alcanza un factor de planta de 56,5%, lo cual de acuerdo a CODELCO (2021a), ocurre pues la fundición:

*“aún se encuentra en proceso de ramp-up asociado a la implementación de los proyectos que han permitido dar cumplimiento a las exigencias del D.S. 28/2013 del MMA, de modo que todavía existe una merma en la producción derivada de que la fundición no ha alcanzado su estabilidad operativa” (Cap 3 CODELCO, 2021a)*

El actual nivel de operación contrasta con el nivel de producción que tenía Codelco antes de realizar las modificaciones para cumplir con el D.S. 28/2013 del MMA, donde de acuerdo a lo reportado en los reportes técnicos, alcanzó un procesamiento de 974 y 858 kt de concentrados en los años 2017 y 2018, respectivamente. De alcanzar dicho nivel de producción nuevamente se

podría alcanzar un factor de planta similar al reportado por el resto de las fundiciones. Cabe destacar que el año 2020, la fundición tuvo una actividad limitada especialmente en el mes de julio producto de una “detención del complejo fundición por escenario Covid-19”<sup>78</sup>.

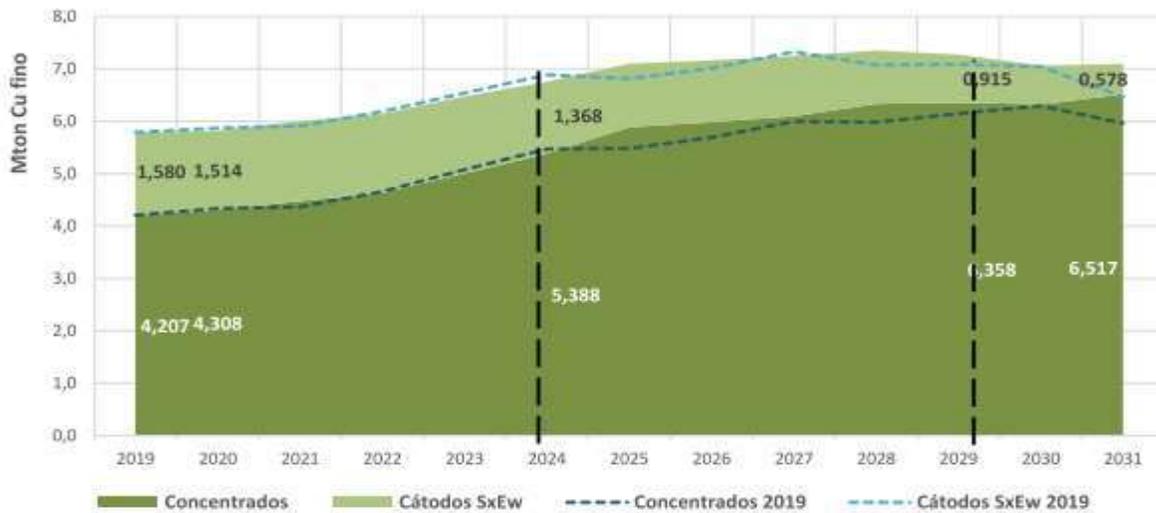
La Fundición Potrerillos también cuenta con una producción comparativamente menor a las otras fundiciones, lo cual responde a la detención entre mediados de enero y la primera semana de marzo “debido a una mantención mayor programada asociada al término de la instalación de ciertos equipos requeridos para el cumplimiento del D.S. 28/2013 del MMA” (CODELCO, 2021a). De esta forma, es esperable que la producción de estas dos fundiciones alcance valores de producción similares al resto de las fundiciones en régimen.

Para poner en perspectiva la producción de cobre de las fundiciones y refinería, se destaca que al año 2020 el 68% de la producción de concentrados de cobre en Chile no pasa por fundiciones chilenas, en perspectiva durante la década 2000-2010 este margen se movía entre 50% y 60%, desde donde ha crecido de forma constante hasta la situación actual (COCHILCO, 2020). A futuro, dado que se espera un crecimiento en la producción del concentrado de cobres mayor que el aumento en la producción de cobre refinados en el país, se espera que llegue hasta un 77% para el 2031 (COCHILCO, 2020). Lo anterior no responde a que los yacimientos tratados actualmente sean de óxidos de cobre - los cuales no son tratados pirometalúrgicamente en las fundiciones y refinerías- en lugar de sulfuros, puesto que en realidad ha aumentado la producción de sulfuros en el país.

A futuro se espera que el incremento en producción de minerales sulfurados se mantenga, mientras la producción de óxidos tratados por medio de SxEw disminuyan de forma importante (ver Figura 3-36). Alternativas como la hidrometalurgia de sulfuros, si bien podría ser posible desde un punto de vista técnico, tiene una serie de dificultades aumentan el costos del proceso y aún se requiere el desarrollo de tecnologías que avancen en la línea de dar uso a la capacidad instalada de hidrometalurgia a partir de sulfuros (Cochilco, 2017). De esta forma se espera que el exceso de concentrados de sulfuros de cobre, los cuales no alcancen a ser procesados por las fundiciones nacionales, sean exportados hacia otros países, especialmente China que se ha convertido en el principal actor en la pirometalurgia de cobre.

---

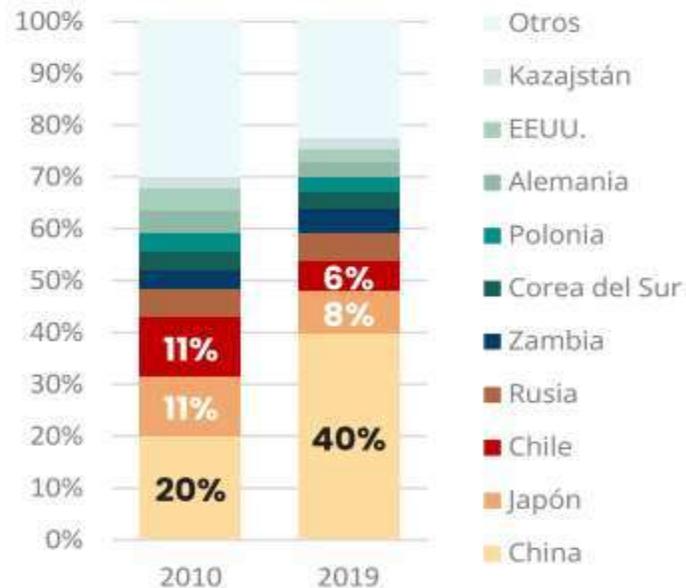
<sup>78</sup> De acuerdo a lo expuesto por el titular en la letra l) del reporte técnico de julio 2020.



**Figura 3-36 Proyección 2020 esperada a 2031 vs proyección 2019, según tipo de producto**

Fuente: (COCHILCO, 2020)

En este sentido, el peso relativo de la producción de cobre en fundiciones ha retrocedido especialmente por el fuerte avance que ha tenido China, el cual ha duplicado su peso específico en la producción de cobre en fundiciones entre 2010 y 2019. En el reciente anteproyecto de la PNM (Ministerio de Minería, 2021) se describe que Chile ha mantenido su tercera posición en término de producción de cobre. La diferencia entre estos valores y los presentados en la Sección 3.1 se deben a que estos valores considerarían tanto fundiciones primarias como secundarias de cobre, donde Japón cuenta con una producción relevante.



**Figura 3-37 Producción de cobre en fundiciones**

Fuente: Anteproyecto Política Nacional Minera (PNM) (Ministerio de Minería, 2021) basado en datos de Cochilco

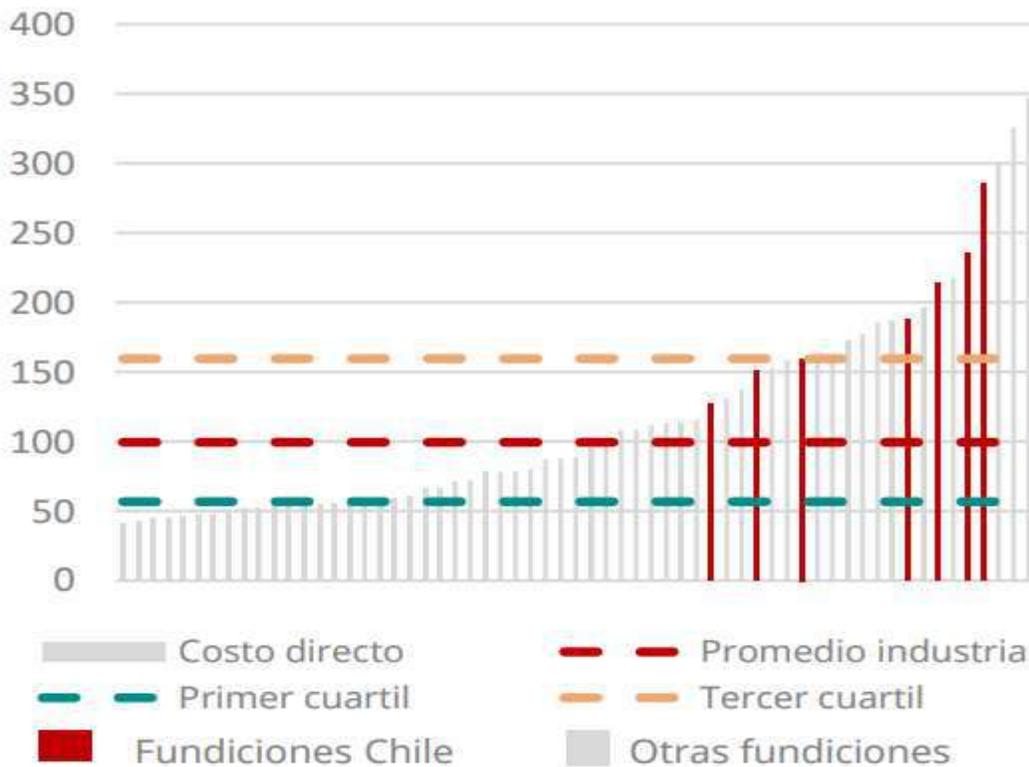
Respecto a las otras fuentes de emisión de arsénico consideradas, la única fuente actualmente considerada corresponde a la planta de tostación de Ministro Hales. Esta planta es de las plantas con mayor capacidad de producción mundial, lo cual responde al contenido muy superior de Arsénico de los concentrados de cobre producidos en el rajo de Ministro Hales. De esta forma, la planta de tostación se encuentra integrada a la operación de la mina.

Otro aspecto relevante de destacar en cuanto a las fundiciones chilenas, es que cinco de ellas se encuentran integradas a minas particulares, y de esta forma tienen menor flexibilidad para optar por otros concentrados de cobre. Lo anterior permitiría, por ejemplo, optar por concentrados más económicos, con mayor ley o con menores impurezas, lo cual permite a su vez mejorar su rendimiento ambiental y económico. Lo anterior es una de las razones que se ha identificado para explicar la baja competitividad de las fundiciones nacionales en comparación con las fundiciones a nivel mundial (Pérez et al., 2021), lo que se refleja en los costos de fundición presentados en la Figura 3-38.

**Tabla 3-37 Características de las fuentes de emisión regulada por DS28/2013**

Fuente de emisión	Propiedad	Integrada a mina
<b>Fundición Chuquicamata</b>	Pública (Codelco)	Sí
<b>Planta tostación MH</b>	Pública (Codelco)	Sí
<b>Fundición Altonorte</b>	Privada (Glencore)	No
<b>Fundición Potrerillos</b>	Pública (Codelco)	Sí
<b>Fundición HVL</b>	Pública (Enami)	No
<b>Fundición Ventanas</b>	Pública (Codelco)	Sí
<b>Fundición Chagres</b>	Privada (Angloamerican)	Sí
<b>Fundición Caletones</b>	Pública (Codelco)	Sí

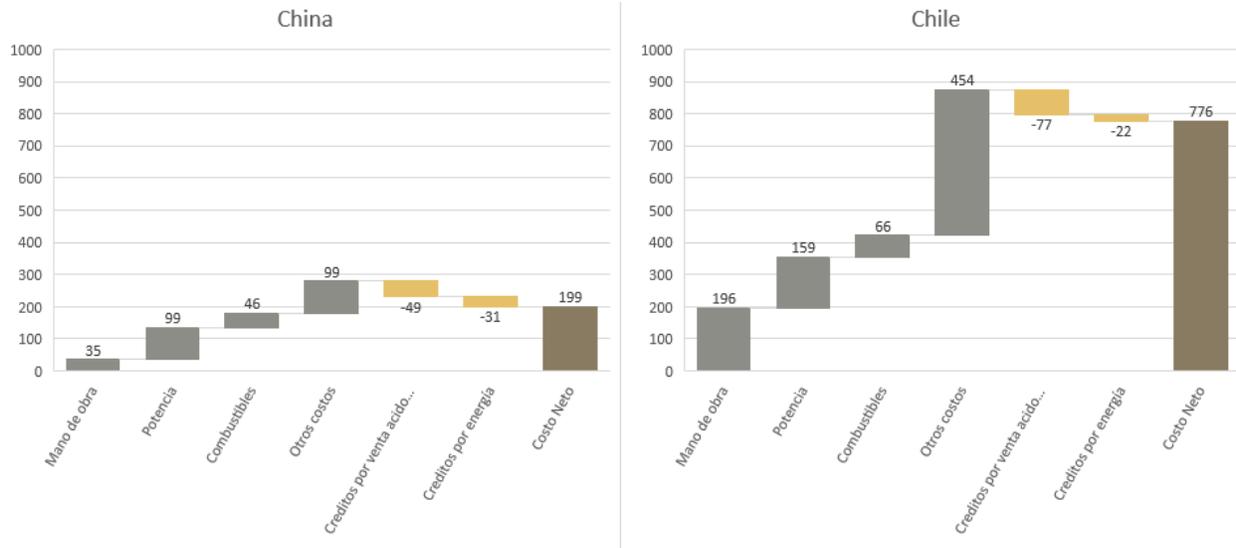
Fuente: Elaboración propia



**Figura 3-38 Costos directos de fundición (USD/t de concentrado), 2020**

Fuente: Anteproyecto PNM (Ministerio de Minería, 2021)

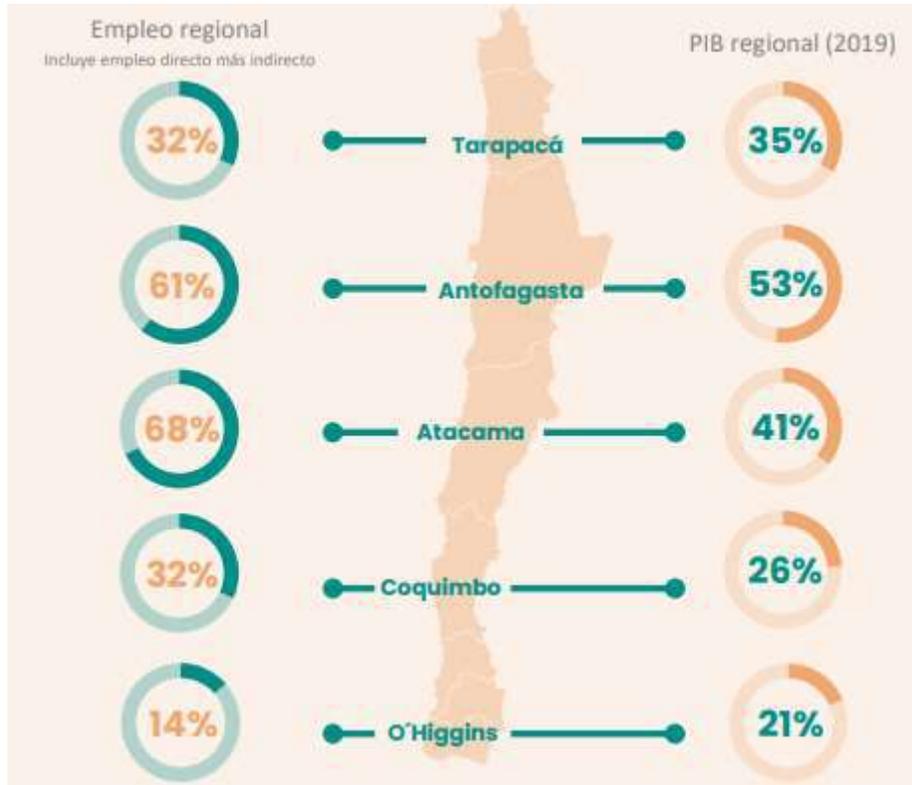
Tal como se presenta en la Figura 3-38 los costos de incluso las fundiciones nacionales con mejor desempeño económico están por sobre los costos medios del mercado mundial. Más aún, los ingresos por tratamiento de concentrado están entre los 160 y 200 USD/t, lo cual se traduce a que algunas de las fundiciones de mayor costo operen con pérdidas de manera regular (Ministerio de Minería, 2021). Se observa que las fundiciones de propiedad pública en Chile tienen peor desempeño económico que las privadas. Pérez et al. (2021) presenta un análisis por componente para una fundición promedio en China y en Chile el cual se reproduce en la Figura 3-39, observándose que los costos nacionales son más altos en las cuatro componentes consideradas, donde resalta la alta diferencia en mano de obra. Asimismo, observa que la provisión de energía (potencia y/o combustible) también son más costosas, lo cual respondería tanto a una matriz energética más costosa y a tecnología envejecida y menos eficiente. El mismo artículo destaca que la diferencia en los costos es producto de una combinación de salarios altos, falta de automatización y más contratación que la necesaria, bajas leyes de cobre, baja recuperación de coproductos comercializables, e inversiones inadecuadas en nuevas tecnologías.



**Figura 3-39 Costos operacionales medios de fundiciones en China y Chile [USD/TMF Cu]**

Fuente: En base a (Pérez et al., 2021)

Sin perjuicio de lo anterior, las fuentes de emisión reguladas actualmente por el DS28/2013 del MMA juegan un rol relevante en entregar valor agregado al concentrado de cobre extraído en el país, contribuyendo a la innovación, así como ser una relevante fuente de empleo para las zonas donde se ubican. En la Figura 3-40 se presenta el aporte del sector minero tanto en términos de empleo como en el PIB. Si bien dichas cifras no son específicas a la actividad de las fundiciones o la planta de tostación, su aporte contribuye al aporte del sector.



**Figura 3-40 Aporte del sector minería en la economía regional**

Fuente: Anteproyecto PNM (Ministerio de Minería, 2021)

### 3.2.4 Estimación de emisiones al aire y proyección de tendencia

Existen diferentes metodologías para la estimación de emisiones al aire, las cuales en general presentan un *trade-off* entre su nivel de precisión y el nivel de información requerida. En vista de que en este caso se busca priorizar el nivel de precisión, se privilegian aquellas metodologías que reporten resultados más precisos, sujetos a que se encuentre la información disponible para su estimación. Respecto a la disponibilidad de información, el D.S. 28/2013 del MMA permitió una mejora significativa en la información disponible para la estimación de algunos contaminantes. En vista de esto se hace notar que los diferentes contaminantes contarán con distinto nivel de detalle. En particular la priorización de metodologías para la cuantificación de emisiones utilizada en el presente estudio es:

1. Estimación de emisiones por balance de masa, la cual se basa en los balances de masa mensuales y su consolidación anual reportada por los titulares de las fundiciones en la letra a) de los reportes técnicos en el marco del D.S. 28/2013 del MMA.
2. Estimación a partir de datos provenientes de monitoreo continuo de emisiones (CEMS, por sus siglas en inglés), la cual se basa en los reportes horarios de la concentración de emisiones medidas de SO<sub>2</sub> en las chimeneas de las plantas de ácido afectas al D.S. 28/2013 del MMA.

3. Estimación a partir de mediciones isocinética, la cual se basa en los reportes mensuales de las emisiones determinadas en las chimeneas de los procesos unitarios, plantas de ácido y hornos de limpieza de escorias, regulados en el marco del D.S. 28/2013 del MMA.
4. Estimación a partir de factores de emisión, lo cual se basa en los niveles de actividad reportados por los titulares en el marco del D.S. 28/2013 del MMA y los factores de emisión TIER 1 propuestos por la agencia europea del medio ambiente (EMEP/EEA, 2019a).

A continuación, se presentan la estimación de emisiones disponibles para los diferentes contaminantes según las metodologías recién presentadas. En el anexo digital del presente informe<sup>79</sup> se presenta el modelo de estimación y el archivo que consolida los resultados del modelo.

#### 3.2.4.1 Estimación de emisiones por balance de masa

La estimación de emisiones por balance de masa se basa en la estimación de entradas, salidas y variaciones en los inventarios en un periodo de tiempo determinado. Su implementación en Chile se basa en la RE 694/2015 - “Protocolo para validación de metodologías para balance de masa de arsénico y azufre en fuentes emisoras de acuerdo al D.S. 28/2013 del MMA” (SMA, 2015), y fue explicado en la Sección 3.1.1 del Informe sobre la Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico de la presente consultoría, entregado adjunto al presente documento.

En particular la metodología por balance de masa reportada en el marco del D.S. 28/2013 del MMA se concentra en el balance de masa de dos elementos químicos: el arsénico (As) y el azufre (S). A partir de la cuantificación de entradas, salidas e inventarios, se considera que la diferencia corresponde a las emisiones, suponiéndose además que el azufre es emitido en su totalidad en forma de anhídrido sulfuroso (SO<sub>2</sub>).

La metodología de estimación mediante el método de balance de masa tiene la ventaja de que, de ser correctamente aplicada, permite contar con una estimación completa de las emisiones de cada elemento, incluyendo tanto las emisiones por chimenea como las emisiones fugitivas. La desventaja de este método, además de ser altamente complejo e intensivo en el uso de recursos para su correcta implementación, consiste en que la estimación no permite una desagregación por unidad, asimismo es esperable que la estimación sea más ajustada en un periodo mayor de tiempo en la medida que las variaciones en el inventario y material de limpieza puedan resultar en desplazamiento de emisiones de un periodo a otro.

Los resultados de la estimación de emisiones se presentan en la Tabla 3-38 donde se observan las estimaciones de As y SO<sub>2</sub> para cada una de las siete fundiciones. De los resultados se observa que no existe necesariamente una relación entre las emisiones de ambos contaminantes, pues,

---

<sup>79</sup> Modelo: NormaAs.ana. Resultados:NormaAs-EmisionesConsolidadasFundiciones\_kg.xlsx

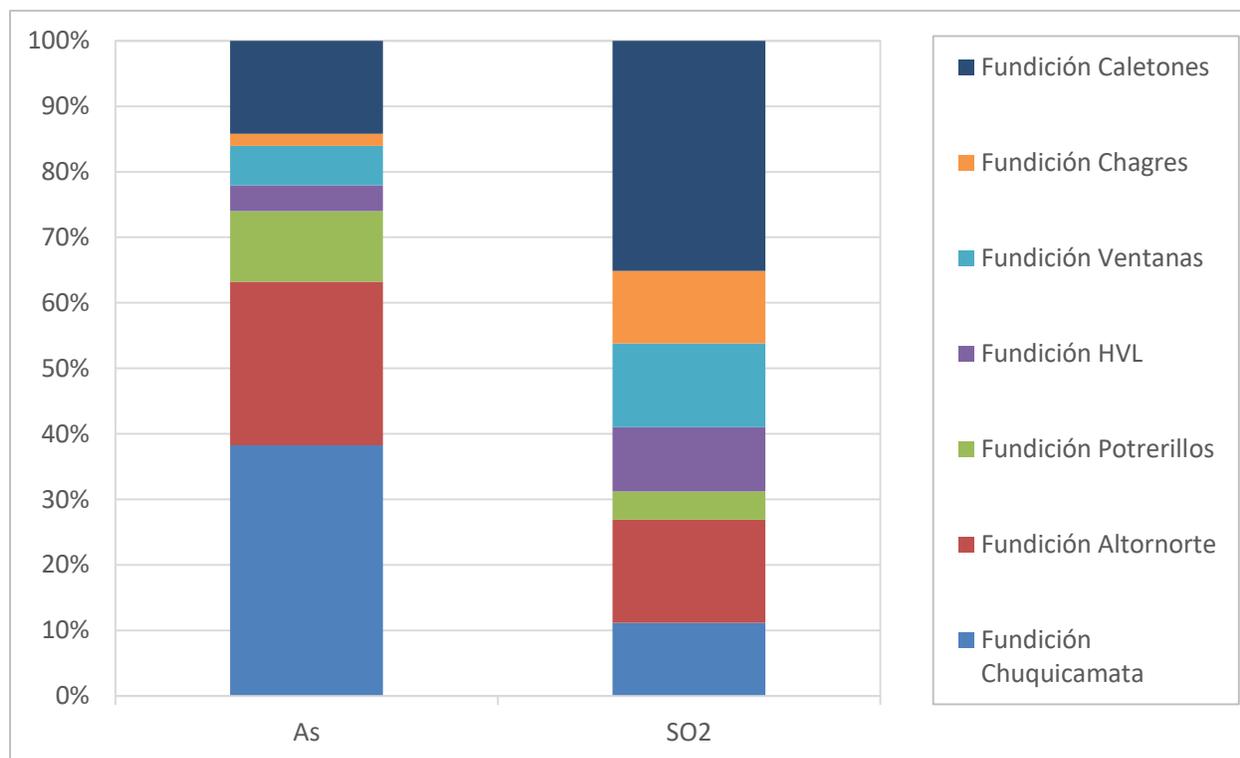
por ejemplo, mientras Chuquicamata tiene la principal emisión de Arsénico con poco más de 180 toneladas, en términos de SO<sub>2</sub> está en un lugar intermedio, con poco más de 9 mil toneladas, muy por debajo de las más de 28 mil toneladas reportadas por Caletones el 2020. Esta variación se puede observar de forma gráfica en la Figura 3-41.

**Tabla 3-38 Estimación de emisiones [kg/año] por balance de masa, año 2020**

Fundiciones	As	SO <sub>2</sub>
Fundición Chuquicamata	180.781	9.090.334
Fundición Altonorte	117.721	12.827.234
Fundición Potrerillos	51.037	3.516.746
Fundición HVL	(1) 18.652	7.999.918
Fundición Ventanas	28.439	10.421.635
Fundición Chagres	8.640	9.014.437
Fundición Caletones	67.041	28.625.910
<b>Total</b>	<b>472.312</b>	<b>81.496.216</b>

(1) Reestimación basada en intensidad de emisiones considerando los balances de masa del titular en el periodo oct2020 a sep2021. Las emisiones reportadas hasta agosto 2020 fueron estimadas con una metodología que no se ajusta a los datos operacionales, la cual contaba originalmente con dos meses con valores negativos.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes de titulares a SMA en el marco del D.S. 28/2013 del MMA



**Figura 3-41 Distribución de emisiones según balance de masa según fundición**

Fuente: Elaboración propia en base a reportes de titulares a SMA en el marco del D.S. 28/2013 del MMA

### 3.2.4.2 Estimación para chimeneas de emisiones por CEMS o mediciones isocinéticas

El D.S. 28/2013 del MMA exige el monitoreo continuo de las emisiones de SO<sub>2</sub> en las plantas de ácido, el cual debe ser reportado mensualmente a la SMA. Para la estimación de emisiones de SO<sub>2</sub> se consideró las concentraciones reportadas a nivel horario, junto con el caudal reportado mensualmente en las mediciones isocinética en las mismas chimeneas de las plantas de ácido, que de forma conjunta permiten estimar tasas de emisión horarias. La suma de las tasas de emisión horarias corresponde a la emisión de SO<sub>2</sub> para cada una de las chimeneas. Para las fuentes con más de una chimenea asociadas a las plantas de ácido se considera la suma de todas sus mediciones.

Por su parte, la misma norma de emisión incluye como requisito la medición y reporte de las emisiones de MP, As y Hg en las chimeneas de sus plantas de ácido (As y Hg), secadores (MP) y hornos de escorias (MP y As). En base a estas mediciones isocinética se procede a estimar la tasa de emisión horaria, medida en g/hora, a partir de las concentraciones de los contaminantes y caudales reportados. Lo anterior, en conjunto con las horas de operación de cada uno de los procesos unitarios, también reportados en el marco del D.S. 28/2013, permite la estimación de las emisiones mensuales y posteriormente emisiones anuales. En el Anexo Digital del presente informe<sup>80</sup>, se presenta el detalle del cálculo realizado. Adicionalmente en el caso de la fundición Ventanas, en el marco del D.S. 165/2018 del MMA, se entregan estimaciones semestrales de las emisiones de MP para otras chimeneas, las cuales se estiman a partir de mediciones isocinética. En particular, las estimaciones semestrales corresponden a la chimenea principal, planta de ácido, tolva 500, Horno de Refino a Fuego/bascúlata y Calderas, las cuales se complementan con las estimaciones del secador y del horno eléctrico de escorias que consideran la información mensual reportada en los reportes técnicos del D.S. 28/2013.

Respecto a las fuentes, se destaca que además de las fundiciones, la planta de tostación de Ministro Hales, calificada como fuente de emisión de arsénico según las definiciones del D.S. 28/2013 del MMA, también reporta emisiones asociada a su planta de ácido.

La ventaja de esta metodología para la medición de emisiones es el alto grado de precisión que se alcanza, obteniendo además el detalle para cada una de las fuentes, lo cual es un insumo relevante para, por ejemplo, la modelación de la dispersión de estos contaminantes y la estimación de los beneficios de su mitigación. La desventaja, adicional al alto costo de inversión y operación que se requiere, es que sólo permite estimaciones en fuentes puntuales donde se pueda instalar un equipo de medición continua o discreta.

Los resultados de esta estimación para los contaminantes con monitoreo continuo o mediciones discretas se presentan en la Tabla 3-39. Se observa que las emisiones de SO<sub>2</sub> por las chimeneas de las plantas de ácido superan las 6,2 mil toneladas, de las cuales un 31% corresponden a las emisiones de Caletones y un 22% adicional corresponden a las emisiones de Altonorte. Si bien,

---

<sup>80</sup> NormaAs-InventarioYProyección.xlsx

proporcionalmente ambas fundiciones tienen un peso similar en la estimación por balance de masa, esta situación no se mantiene en todas las fundiciones. La mayor diferencia se observa en la fundición Potrerillos, donde bajo las mediciones de los CEMS sus emisiones representan el 13% de las emisiones de SO<sub>2</sub> de las fundiciones<sup>81</sup>, sin embargo, con la metodología de balance de masa sus emisiones representan sólo el 4% de las emisiones de SO<sub>2</sub> de las fundiciones<sup>82</sup>.

**Tabla 3-39 Estimación de emisiones [kg/año] por monitoreo continuo o mediciones discretas, año 2020**

Fundiciones	MP (1)	As (2)	Hg (3)	SO <sub>2</sub> (3)
Fundición Chuquicamata	5.487	605	1	578.822
Fundición Altonorte	1.805	91	14	1.384.567
Fundición Potrerillos	16.492	546	1	805.518
Fundición HVL	17.362	108	6	374.182
Fundición Ventanas	7.511 (4) 59.741	318	1	285.695
Fundición Chagres	4.474	424	29	671.701
Fundición Caletones	28.488	765	1	1.941.468
Planta Tostación MH	(5) -	23	216	238.884
<b>Total</b>	<b>81.619</b>	<b>3.148</b>	<b>268</b>	<b>6.280.836</b>

- (1) MP reportado para secadores y hornos de escoria
- (2) As reportado para plantas de ácido y hornos de escoria
- (3) Hg y SO<sub>2</sub> reportado para plantas de ácido
- (4) Estimación de MP anual por chimeneas en el marco del DS105/2018 del MMA, realizado por Codelco 2021. Considera mediciones isocinética en Chimenea principal, secador, planta de ácido, horno eléctrico, tolva 500, Horno de refinó y calderas
- (5) Planta de tostación de Ministro Hales, no cuenta ni con secadores ni horno de escorias y luego solo reporta emisiones asociada a planta de tostación.

Fuente: Elaboración propia en base a reportes de titulares a SMA en el marco del D.S. 28/2013

### 3.2.4.3 Estimación de emisiones por factor de emisión

Una última aproximación para la estimación de las emisiones corresponde a la estimación por medio de factores de emisión. Esta metodología se basa en factores de emisión recomendados en la literatura y su uso a nivel nacional considerando los niveles de actividad observados. En particular, se utilizan los factores de emisión Tier 1 recomendados en la última versión de la guía europea para la estimación de inventarios (EMEP/EEA, 2019a). Esta guía si bien se basa en observaciones realizadas en Europa, corresponde a la más reciente consolidación de factores de emisión. Cabe destacar que en Europa se observa una combinación de diferentes tecnologías al igual que en Chile, y que la comparación para contaminantes con emisiones medidas en el país con los factores de emisión dan resultados bastante consistentes (ver Sección previa).

Aun así, el uso de estimaciones basadas en factor de emisión reviste de niveles relevantes de incertidumbre asociados al supuesto subyacente de que las condiciones de operación, las

<sup>81</sup> Por comparabilidad no se considera la planta de tostación en este ejercicio.

<sup>82</sup> Se debe considerar que el año 2020 la fundición Potrerillos presentó dos meses con datos negativos (febrero y junio).

características de los concentrados, las tecnologías de control, entre otras, son extrapolables a la situación local. De esta forma las emisiones presentadas en la Tabla 3-40 deben ser consideradas como una referencia que busca entregar una aproximación gruesa del nivel de emisión. Por lo demás, tanto los balances de masas como la estimación de emisiones a través de monitoreo y mediciones han permitido observar que existen diferencias en los niveles de emisión de los contaminantes más allá de la diferencia del nivel de actividad de las fundiciones. Estas diferencias no se reflejan en una metodología basada en factores de emisión.

Por lo anterior, se entregan estimaciones solo para los contaminantes con factor de emisión que no cuentan con estimaciones con los métodos previos. Lo anterior se justifica en que dichas estimaciones tienen un nivel de precisión más ajustado a la realidad de las fundiciones de cobre en Chile.

**Tabla 3-40 Estimación de emisiones [kg/año] por factor de emisión, año 2020**

Fundiciones	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	PCBs (1)	PCDD/F (1)
Fundición Chuquicamata	2.550	3.709	7.417	3.245	4.404	209	1.159
Fundición Altonorte	3.186	4.634	9.268	4.055	5.503	261	1.448
Fundición Potrerillos	1.387	2.018	4.036	1.766	2.396	114	631
Fundición HVL	865	1.258	2.516	1.101	1.494	71	393
Fundición Ventanas	1.799	2.617	5.233	2.290	3.107	147	818
Fundición Chagres	1.196	1.740	3.480	1.522	2.066	98	544
Fundición Caletones	3.536	5.143	10.286	4.500	6.107	289	1.607
<b>Total</b>	<b>14.519</b>	<b>21.118</b>	<b>42.236</b>	<b>18.478</b>	<b>25.078</b>	<b>1.188</b>	<b>6.599</b>

(1) Resultados en miligramos/año

Fuente: Elaboración propia en base a niveles de actividad reportado por titulares en el marco del D.S. 28/2013 del MMA y factores de emisión Tier 1 de la Agencia Europea del Medio Ambiente (EMEP/EEA, 2019a)

Un caso en especial interesante de uso de factores de emisión corresponde a la estimación que actualmente hace la Fundición Ventanas en el marco del PPDA de las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví (DS 105/2018 del MMA). Esta estimación se realiza por medio de la “Propuesta metodológica de estimación de emisiones de material particulado” (CODELCO, 2020b), para la cual de forma adicional a la medición de fuentes puntuales descritas anteriormente, se derivan factores de emisión de MP de emisiones fugitivas. Estos factores son derivados mediante supuestos de eficiencias de captura, mitigación de los sistemas primarios y secundarios y tiempos de operación de cada uno de los procesos unitarios aplicables a cada uno de los procesos considerados.

La aplicación de la metodología permite estimar emisiones para cada uno de los tres CPS, el CT (incluyendo sangrados) y el sangrado del Horno Eléctrico para el tratamiento de escorias. Las cuales se presentan en la Tabla 3-41. En esta tabla se observa que la principal fuente emisora de MP fugitivo serían el horno eléctrico dado los bajos niveles de captura observados.

**Tabla 3-41 Estimación de emisiones fugitivas de MP (kg/año), año 2020**

Fuente	Emisiones Fugitivas MP
CPS 1	2.911
CPS 2	3.282
CPS 3	2.911
CT	12.443
HE - MB	5.331
HE - Escoria	14.110
<b>Total</b>	<b>40.988</b>

Fuente: (Tabla 5.2 CODELCO, 2021b)

Sin embargo, se observa ciertas inconsistencias entre los resultados obtenidos y los supuestos considerados para la derivación del factor de emisión. En la Tabla 3-42 se presenta el detalle de las emisiones de MP las fuentes que descargan en la chimenea principal, comparándose la estimación de la emisión capturada por los sistemas de captura secundarios y de las sangrías con las emisiones reportadas en las chimeneas principales, calculándose la eficiencia de abatimiento del sistema de tratamiento de estos gases. Este resultado alcanza una eficiencia de 32% para el año 2020, lo cual es un valor muy por debajo de lo esperado considerando que el sistema de tratamiento considera una etapa de lavado en seco con recirculación, filtros de mangas y ventiladores de tiros inducidos, con lo cual se esperaría una eficiencia superior al 90% en el caso del MP.

Una de la explicación de esta diferencia podría corresponder a que se estén subestimando las emisiones fugitivas, o que las eficiencias de captura (con las cuales se estiman los factores de emisión) sean diferentes en la práctica. Este hallazgo busca dar cuenta de que métodos basados en factores de emisión no son necesariamente robustos, y sus resultados podrían variar de forma significativa de las emisiones reales.

**Tabla 3-42 Comparación de emisiones fugitivas y emisiones de chimenea principal (kg/año), año 2020**

Fuente	Emisión fugitiva estimada (1)	Eficiencia captura supuesta (2)	Emisión capturada en sistemas secundarios (3)	Emisiones chimenea principal (4)	Eficiencia abatimiento equivalente (5)
CPS 1	2.911	70%	6.792	37.720	32%
CPS 2	3.282	70%	7.658		
CPS 3	2.911	70%	6.792		
CT	12.443	70%	29.034		
HE - MB	5.331	50%	5.331		

(1) Emisiones fugitivas estimadas y reportadas para año 2020 (Tabla 5.2 CODELCO, 2021c)

(2) Eficiencia supuesta de los sistemas de captura para la estimación de los factores de emisión de las fuentes que descargan a chimenea principal (CODELCO, 2020b)

(3) Emisión secundaria capturada considerando emisión fugitiva estimada y supuestos de eficiencia supuesto =  $(1) \cdot (2) / (1 - (2))$ 

(4) Emisión reportada de MP reportada en chimenea principal en (Tabla 5.2 CODELCO, 2021c)

(5) Eficiencia equivalente de abatimiento, estimada como a partir de emisiones capturadas estimadas y las emisiones reales =  $1 - (4) / (3)$ 

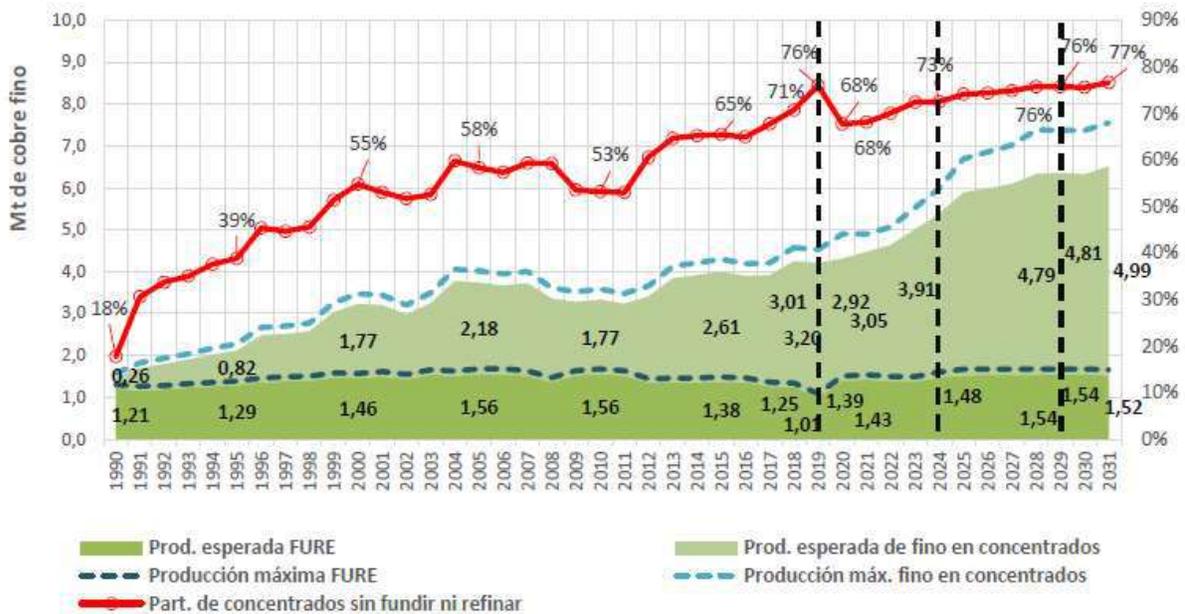
Fuente: Elaboración propia

#### 3.2.4.4 Proyección de tendencia

De forma general la tendencia de emisiones se ve afectada por la combinación de dos factores: por un lado, la tasa de emisión, que se ve influenciada por las tecnologías, composición de los concentrados y sistemas de control de emisiones operativos, y, por otro lado, los niveles de actividad que refleja variaciones en el nivel futuro de producción de las fundiciones respecto de la situación actual.

Respecto al primero de estos factores, la norma de emisión para fundiciones y otras fuentes de arsénico, D.S. 28/2013 del MMA, significó entre otras cosas, la instalación de nuevos sistemas de control, cambios tecnológicos y una reestructuración las fundiciones de forma de cumplir con las exigencias establecidas en la norma. Actualmente, las exigencias en términos de emisiones se estarían cumpliendo sin encontrarse hallazgos de este tipo en los últimos reportes de la SMA. En este sentido, no se esperan cambios que hagan varias las tasas de emisión de las fundiciones. De esta forma, los cambios en las tendencias estarían relacionado sólo por variaciones en las tendencias de los niveles de actividad.

Respecto a cambios en los niveles de actividad, COCHILCO (2021) proyecto que hasta el 2032, habrá pequeñas variaciones en la medida que se realizan mejoras operativas, así como las fundiciones terminan de adaptarse a los cambios tecnológicos que implicó la implementación del D.S. 28/2013 del MMA. De esta forma se espera que las fundiciones pasen de una producción cercana a las 1.400 kt de Cu hasta una producción cercana a 1.530 kt hacia fines de la década. Cabe destacar que según se observa en la Figura 3-42 desde el año 2000 la producción de las fundiciones se ha estabilizado en torno a las 1.500 kton de cobre fino con variaciones que responden a los cambios en la ley de cobre, optimizaciones tecnológicas y las detenciones para la implementación de los ajustes requeridos en el marco de la Norma de Emisión. Esta estabilización de la producción de las fundiciones, contrasta con el aumento sostenido que ha tenido la producción de concentrados de cobre sin fundir ni refinar que actualmente se encuentran en torno al 70% del cobre fino producido en el país. Sin perjuicio de esto, actualmente no se cuentan con planes concretos que permitan proyectar la instalación de una nueva fundición en los próximos años.



**Figura 3-42 Proyección de producción de concentrados de cobre refinados y sin refinar**

Fuente: (COCHILCO, 2020)

En vista de lo anterior, y en concordancia con la proyección de las emisiones de arsénico realizada en la Sección 3.4 del Informe complementario sobre la NPCA para Arsénico de la presente consultoría, la tendencia de las emisiones del resto de los contaminantes sigue la misma tendencia que la producción de las fundiciones, esto es un suave crecimiento hasta mediados de la década, y una posterior estabilización. Cabe destacar que este crecimiento no se distribuye de forma homogénea entre las diferentes fundiciones, observándose que algunas de ellas como Chuquicamata o Potrerillos, que el año 2020 estaban con una operación reducida producto del proceso de *ramp-up* tras las modificaciones operacionales producto para dar cumplimiento a las exigencias de los límites del DS 28/2013 del MMA, tendrán un mayor aumento en su producción. De esta forma, considerando las características tecnológicas y concentrados de cada fundición, se espera que las emisiones de SO<sub>2</sub> aumenten entre 10%-15%, hasta cerca de 90 mil toneladas anuales, mientras que las emisiones de As tendrían un aumento cercano al 25%, hasta cerca de las 600 toneladas anuales.

## 4. Potenciales tecnologías de abatimiento

Las emisiones de contaminantes son el resultado de la operación de las fundiciones, directamente relacionadas con la intensidad de dicha operación, sin embargo, también se relacionan con las diferentes alternativas tecnológicas y de configuración general de las plantas de fundición. Por este motivo la reducción de emisiones tiene diversas alternativas de acción:

4. Medidas operacionales de manejo de materia prima y maquinaria.
5. Medidas tecnológicas de recambio de tecnología a tecnología más limpia.
6. Medidas tecnológicas de equipos adicionales para abatimiento de las emisiones de ciertos contaminantes.

Las medidas operacionales son más bien blandas de acciones que deben realizar las personas que operan maquinaria o que manejan materia prima, también hay un factor muy relevante de medidas operacionales asociadas al transporte de las materias primas. A continuación, se presenta un resumen de las principales medidas operacionales recomendadas en la literatura nacional e internacional en cuanto a la prevención, reducción y/o minimización de emisiones en plantas de fundición de cobre.

**Tabla 4-1 Principales buenas prácticas identificadas**

Etapa del proceso	Descripción
General	Realizar mantenimiento periódica adecuada a equipos: campanas, compuertas, bombas de agua de refrigeración, cámaras de enfriamiento, dampers, precipitadores electrostáticos y ductos
	Mantener puertas de inspección o de mantenimiento permanentemente cerradas, para evitar infiltración de aire al sistema
	Disponer de manuales de operación actualizados y materiales para el manejo de contingencias (quemadores auxiliares y otros)
Recepción y almacenamiento	Camiones cubiertos con carpas
	Descarga de concentrado efectuada sobre parrillas en piso con tolvas subterráneas
	Conducción del concentrado en correas transportadoras encapsuladas
	Sector de descarga de camiones tolva cerrados
	Preparación y almacenamiento del material circulante (producto del enfriamiento intermedio de materiales como mata/MB y escorias) con medidas de control de material particulado
Fusión	Compresión de la materia prima en ladrillos o pellets, esto se realiza principalmente para cumplir con requerimientos del horno, pero también es efectivo en la reducción de emisiones fugitivas
	Utilizar tazas u ollas a un nivel adecuado de llenado, para evitar ensuciamiento de la boca, golpes y deterioro de la boca o compuerta de la campana primaria
	Carga del horno a bajas presiones, modificación de sistemas de carga para entregar pequeñas y constantes cargas de materia prima
	Ubicación de los hornos, en lugares cerrados, con techo y extracción y limpieza de gases
Conversión	Evitar la operación de carguío de materiales por boca, con el convertidor soplando (CT o CPS)
	Privilegiar la coordinación de CPS, evitando el giro de inicio del soplado de una unidad adicional, por sobre la capacidad de diseño del sistema
	Evitar el sobrellenado del convertidor, privilegiando el re carguío posterior
Tratamiento de gases	Incorporar señales y datos relevantes al sistema integrado de control (PI), para uso de operación desde sala de control (Tirajes en campanas, volumen y concentración de SO <sub>2</sub> en plantas de ácido, así como concentración de descarga de gases por chimenea)

Etapa del proceso	Descripción
	Realizar entrenamiento de operadores, idealmente con simuladores del sistema de manejo gases y certificación de competencias de operadores de convertidores y plantas de ácido
	Incorporar factores de desempeño tales como ton ácido/ ton concentrado fundido a tableros de control y convenios de desempeño
	Realizar seguimiento periódico de control de eficiencia de precipitadores y en el reactor de la planta de ácido

Fuente: (COPRIM, 2012; European Commission-JRC, 2017)

Si bien se reconoce que las medidas presentadas en la Tabla 4-1 pueden tener un fuerte impacto sobre las mediciones, su cuantificación no es posible debido a la arbitrariedad de su correcta implementación. Esto se refiere a que dependerá exclusivamente de aquella persona que implemente la medida si lo hace correctamente, por lo cual no existen estimaciones veraces acerca de una reducción porcentual que se pueda lograr al implementarlas. Así también es difícil estimar el costo, ya que muchas veces involucran tiempo de operadores en capacitación y luego correcta implementación, lo cual nuevamente es sujeto de cada operador.

Las prácticas operacionales, en su mayoría se dirigen a la reducción de las emisiones fugitivas, aunque algunas corresponden a técnicas de carga o mantenimiento oportuno de maquinaria específica, favoreciendo a la disminución de emisiones puntuales de dicha maquinaria. Para tener una idea de la magnitud del efecto de las buenas prácticas, se estima que para el arsénico y otros metales la buenas prácticas podrían resultar en una reducción de 10% (Theloke, Kummer, Nitter, Fegtler, & Friedrich, 2008).

Se considera relevante la mención de estas alternativas operacionales como potenciales fuentes de reducción de emisiones en fundiciones de cobre ya que existe un potencial de estandarización y oficialización de dichas prácticas, lo cual permitirá la futura estimación del impacto que estas puedan tener en las emisiones.

El presente capítulo se centrará en el análisis de medidas tecnológicas de reducción de emisiones, tanto de recambio tecnológico como de adición al proceso con fines de abatimiento de emisiones.

## 4.1 Identificación de factores determinantes

Para la correcta identificación y selección de medidas de abatimiento de emisiones, se debe comprender en detalle el origen de las emisiones que se buscan abatir. Con este fin la presente sección analiza cada etapa del proceso de fundición, de manera de identificar los factores que determinan las emisiones a generar en cada una.

#### 4.1.1 Preparación de concentrados

La preparación de concentrados es la primera etapa del proceso de fundición, partiendo con la recepción de la materia prima, para su posterior secado para disminuir su contenido de humedad de un 6-8% a un 0,2-0,3% aproximadamente.

En general existen dos tipos de secadores de concentrados, rotatorios a gas (secado directo), secadores de bobina con vapor (secado indirecto) (European Commission-JRC, 2017). Se utilizan campanas para la captación de gases, particularmente hay emisiones de arsénico (tanto en el flujo de material particulado que se levanta durante el secado, como el contenido en el combustible utilizado para el secado) y material particulado, para el cual se utilizan filtros de mangas para captar el polvo suspendido, de manera de recircularlo en el proceso (recapturando no solo MP, sino que también otros metales que puedan estar en dicho polvo).

En esta etapa pueden ocurrir emisiones fugitivas dependiendo del manejo de la materia prima, por este motivo muchas fundiciones cuentan con sistemas cerrados de recepción de materia prima (camiones cubiertos, galpones) y sistemas automáticos de cargas con captura de gases (cintas transportadoras).

Una alternativa al proceso de secado es el uso de plantas de tostación, las cuales son alimentadas por los concentrados produciendo calcinas, las cuales tienen la ventaja de contener menos arsénico. En este proceso además de arsénico se emiten otros metales volatilizados, cuenta con una fracción de entre 10% y 12% de SO<sub>2</sub>, razón por la cual usualmente los gases son tratados en plantas de ácido.

#### 4.1.2 Fusión

Inicialmente se realiza una tostación parcial de los concentrados para lograr la oxidación parcial de los sulfuros del concentrado (eliminación parcial como SO<sub>2</sub>). Esta puede ocurrir simultáneamente con la fusión en un mismo horno, produciendo una fase rica en cobre, conocida como metal blanco, escoria y gases primarios con alta concentración de SO<sub>2</sub>. Para la fusión en Chile se utilizan dos tipos de tecnologías de conversión, fusión por baño (ya sea el convertidor Teniente o el convertidor Noranda) y hornos flash.

La fusión flash, es fusión en llama, ocurre en un horno estático donde el concentrado en presencia de oxígeno se combustiona en un quemador ubicado en una torre de reacción (COPRIM, 2012). El convertidor Teniente, fusión de baño, ocurre en un horno bascular está equipado con toberas que inyectan aire enriquecido en oxígeno (36-40%) y toberas que inyectan el concentrado con aire dentro del baño de mata. En comparación con el reactor Noranda el convertidor Teniente tiene los orificios de sangrado de mata y escoria en lados opuestos, lo que genera un movimiento en contra corriente de mata y escoria en el horno (Universidad de Chile, 2010). Al tratarse de hornos basculantes estas tecnologías tienden a tener mayores emisiones fugitivas por la boca del convertidor, que los hornos flash estáticos.

Por cinética y nivel de oxidación, el reactor Teniente presenta un mayor nivel de destilación de As que la fusión flash, así como también un menor arrastre de material particulado en los gases evacuados. El flujo de gases de  $\text{SO}_2$  dependerá de los niveles de enriquecimiento de oxígeno (esta puede variar entre un 36 y 80% de  $\text{O}_2$ , siendo mayor para la fusión en llama) que determinará la eficiencia de la reacción de oxidación y aumentará la concentración de  $\text{SO}_2$  en el gas resultante, lo cual, a la vez, aumenta la eficiencia de la planta de tratamiento de gases. Generalmente, estos gases calientes son captados a la salida de los equipos por campanas con un flujo forzado de extracción. Estos gases pasan por distintas etapas de tratamiento: enfriamiento, limpieza seca y limpieza húmeda.

Las emisiones de esta etapa provienen de las chimeneas y de los procesos de carga y descarga de los concentrados en los hornos (sangrías), debido a su carácter semicontinuo (Universidad de Chile, 2010). Se generan grandes cantidades de gases metalúrgicos que contienen distintos tipos de compuestos contaminantes, entre ellos: polvos, dióxido de azufre y compuestos metálicos volátiles. Para evitar emisiones fugitivas se puede compactar la materia prima en ladrillos o pellets, así también el uso de ollas o tazas para controlar la carga del horno. Nuevamente se busca que estas cargas y descargas sean en lugares cerrados con sistemas de captación de gases. Los gases generados en este proceso, mezclados con otros gases de menor concentración (usualmente del proceso de conversión), son tratados en la planta de ácido sulfúrico.

En las unidades de fusión CT y Noranda, en ciertas circunstancias se producen emisiones de gases de proceso en las campanas, que captan los gases. Esta situación es causada por un tiraje insuficiente del VTI en el tren de gases, generándose internamente una presión positiva en el interior de la campana, que proyecta los gases hacia fuera. La solución es instalar una campana secundaria que capture estos gases, para ser conducidos fuera de la nave, para su posterior tratamiento, abatiendo el MP,  $\text{SO}_2$  y los elementos volátiles como el As, Hg, Pb y otros. La unidad de fusión flash es eficiente ambientalmente por ser una unidad cerrada, donde no se observan gases, salvo en las sangrías de eje, escoria y canales de conducción de los líquidos a las ollas. Sólo requiere control de gases fugitivos, mediante campanas sobre las sangrías, canales y ollas. En su conjunto estos equipos pueden alcanzar captaciones en torno al 50-60% de los gases y MP.

### 4.1.3 Conversión

Luego de la fusión, el metal blanco es procesado por soplado con adición de fundentes y oxígeno en convertidores de forma discontinua. El más común de los hornos de conversión es el convertidor Peirce-Smith (CPS), único horno de conversión utilizado en Chile. El típico proceso tiene 4 etapas, carga, soplado, escoriado y evacuación de cobre blíster, donde todos los procesos son fuentes de emisiones fugitivas.

Al igual que para la fusión, este proceso puede prevenir emisiones fugitivas mediante el control de la carga y descarga, así como del enfriamiento y giros del horno. Generalmente se cuenta con captación de gases que luego se envían a la planta de ácido sulfúrico.

La conversión de mata o metal blanco produce cobre blíster y escoria de conversión. La escoria es reciclada al horno de fusión y el cobre blíster enviado a la refinación (Universidad de Chile, 2010).

#### 4.1.4 Limpieza de escorias

La escoria conteniendo sobre 1% de cobre no puede ser tratada como escoria de descarte y es direccionada al proceso de limpieza de escorias. Por un lado, tal como descrito en la Sección 3, para esta etapa del proceso de fundición, existe la vía pirometalúrgica, caracterizada por el uso de hornos de limpieza de escorias. Entre ellos se destaca el Horno Eléctrico (HE) y el Horno Eléctrico de Limpieza de Escorias (HLE)<sup>83</sup>, masivamente utilizados para la recuperación de cobre de escorias. En calidad de HE, uno que es comúnmente utilizado es el horno eléctrico de arco sumergido, y en materia de HLE existe el horno Teniente de limpieza de escorias. Por otro lado, existe la vía metalúrgica que consiste en la flotación de escoria después de enfriamiento lento chancado, y molienda. Esta vía es cada vez más utilizada en fundiciones nacionales porque se asocia a menores emisiones de contaminantes y permite una mayor recuperación de cobre. No obstante, cabe notar que una limitante para instalar sistemas de flotación es el espacio; a título de ejemplo, en la fundición HVL, se descartó la instalación de dicho sistema por falta de espacio. Tal como descrito en la Sección 3, en un horno HLE, la recuperación de cobre se logra mediante la reducción de la magnetita, la cual permite disminuir la viscosidad de la escoria facilitando la sedimentación de cobre contenido en ésta que se encuentra como mata y como cobre metálico, depositándose en la parte inferior del horno para luego ser retirado y recirculado a los convertidores. En un Horno Eléctrico, la reducción de la magnetita y óxido de cobre se logra mediante el uso de carbón coque y bajo la acción de los electrodos sumergidos. Se modifica la viscosidad y la temperatura de la escoria, lo que facilita e incrementa la tasa de sedimentación. A consecuencia de las reacciones de este proceso, se forma monóxido de carbono, dióxido de carbono y otras sustancias volátiles como dióxido de azufre, hidrógeno y metales gaseosos (Universidad de Chile, 2010). Los gases generados en este horno son gases secundarios de baja concentración de SO<sub>2</sub> con presencia de As por desorción de la fase metal, CO y hollín por el uso de reductores. Estos gases se conducen a chimeneas simples de evacuación de gases, y no a precipitadores electrostáticos como es el caso de los Hornos Eléctricos de Limpieza de Escorias. Se puede incluir una unidad de incineración posterior para completar la combustión y disminuir las emisiones de gases de combustión incompleta.

#### 4.1.5 Refinación

En refinación a fuego de cobre se usan fundamentalmente los hornos de tipo bascular y en los casos en donde las fundiciones requieren fundir scrap o restos de ánodos el horno de refino tipo

---

<sup>83</sup> Dado que el tipo de horno no siempre se especifica en los antecedentes entregados por las fundiciones, para efectos de este informe, se utiliza la sigla "HLE/HE" para referirse a los Hornos de Limpieza de Escorias de manera genérica. Sin embargo, en caso de ser disponible, se entrega información diferenciada por el tipo de horno.

reverbero. La refinación a fuego consiste de dos etapas: oxidación del obre y escorificación de impurezas con o sin adición de fundentes y reducción del cobre. Se aplican varios reductores: petróleo pesado, petróleo diésel, gas reformado, propano, amoníaco y el viejo y clásico apaleo con árboles húmedos.

Algunos operan con sistema de limpieza de gases, pero la mayoría están conectados a sistemas de simple evacuación y conducción de los gases por chimenea.

Esta etapa es responsable de las emisiones de humos negros en las fundiciones de cobre cuando se usa petróleo en la reducción, el craqueo del petróleo, genera carbón que no reacciona y es responsable del hollín y de los humos negros. Se generan gases que presentan menor contenido de  $\text{SO}_2$ , presencia de carbón que no ha combustionado y algunos volátiles residuales. La reacción química de ocurrencia es similar a la de los hornos de limpieza de escorias, de igual manera se puede incorporar una etapa posterior de incineración para completar la combustión. Para evitar una posible contaminación con azufre durante la reducción se usa petróleo Diésel bajo en azufre o kerosene, siendo su eficiencia ligeramente superior al 50%. El uso de gas natural o licuado de petróleo tiene un efecto completamente distinto ya que la eficiencia de la reacción es superior al 85%, debido principalmente a que en su composición predomina el hidrógeno por sobre el carbón. (Universidad de Chile, 2010).

#### 4.1.6 Tratamiento de gases

El tratamiento de gases dependerá fuertemente del flujo y características de los gases a tratar de los hornos de fusión y los convertidores. La eficiencia de conversión se ve favorecida por un flujo y concentración constante de  $\text{SO}_2$  para su conversión a ácido sulfúrico.

Las plantas de ácido sulfúrico reciben el mayor flujo de gases provenientes de las etapas de fusión y conversión, por lo cual el funcionamiento continuo y correcto es fundamental para el control de emisiones. En particular analizando, por ejemplos, datos de presión, tiraje en campanas, volumen y concentración de  $\text{SO}_2$ , entre otros, permitirán asegurar una mejor eficiencia de conversión de  $\text{SO}_2$  en ácido sulfúrico.

En las plantas de ácido, se tratan los gases provenientes de los Hornos Flash, de los Convertidores Teniente y de los Convertidores Peirce-Smith.

La eficiencia de conversión de  $\text{SO}_2$  dependerá del tipo de planta de ácido (contacto simple o doble) y de la razón  $\text{O}_2/\text{SO}_2$ , con las siguientes tasas de conversión (EMEP/EEA, 2019a; Universidad de Chile, 2010; US-EPA, 1995):

- Absorción simple:  $\text{SO}_2 > 8\%$ ,  $\text{O}_2/\text{SO}_2$  1:1 → 98% conversión
- Absorción simple:  $\text{SO}_2 = 5$  a  $8\%$ ,  $\text{O}_2/\text{SO}_2$  1:1 → 97 a 98% conversión
- Absorción simple:  $\text{SO}_2 < 5\%$ ,  $\text{O}_2/\text{SO}_2$  1:1 → 96 a 97% conversión
- Doble absorción → 99 a 99,6% conversión

En algunos casos hay captación de gases secundarios, que pueden ser en los procesos de fusión, conversión, limpieza de escoria, refinación, como también de sangrías. Estos gases son recolectados y sometidos a tratamiento para control de material particulado y otros contaminantes (por ejemplo, un filtro de mangas o un precipitador electrostático), para luego ser liberados a la atmósfera.

#### 4.1.7 Emisiones por contaminante

A modo resumen, la tabla a continuación presenta los principales contaminantes, sus fuentes y los factores que impactan la magnitud de su emisión.

**Tabla 4-2 Principales contaminantes de fundiciones chilenas y sus fuentes y factores que determinan su emisión**

Contaminante	Fuente	Principales factores que impactan la emisión
Polvo de arrastre y partículas de condensación (MP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partículas primarias: polvo de arrastre, concentrado que no reacciona completamente</li> <li>• Partículas secundarias: condensación de compuestos volátiles al enfriar los gases</li> <li>• Partículas mixtas</li> <li>• Emisiones fugitivas (principalmente por etapas con procesos discontinuos durante carga y descarga de material)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manejo de concentrados</li> <li>• Carga y descarga de hornos</li> <li>• Temperatura de gases</li> <li>• Sistemas de captación de gases primarios y secundarios</li> <li>• Eficiencia de sistemas de abatimiento</li> </ul>
Dióxido de azufre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emisiones por chimenea (gases captados, pero no tratados)</li> <li>• Emisiones fugitivas (principalmente por etapas con procesos discontinuos durante carga y descarga de material)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relación S/Cu en los concentrados.</li> <li>• Eficiencia plantas de ácido (flujo constante en volumen y concentración)</li> <li>• Sistemas de captación de gases primarios y secundarios</li> </ul>
Arsénico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emisiones por chimenea (gases captados, pero no tratados)</li> <li>• Volatilización a altas temperaturas (en gases de los procesos de fusión y conversión)</li> <li>• Emisiones fugitivas (principalmente por etapas con procesos discontinuos durante carga y descarga de material)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contenido de arsénico en los concentrados</li> <li>• Temperatura de procesos (permite la volatilización)</li> <li>• Sistemas de captación de gases primarios y secundarios</li> <li>• Sistemas de limpieza de gases</li> </ul>

Fuente: En base a (COPRIM, 2012; Universidad de Chile, 2010; US-EPA, 1995)

## 4.2 Identificación de tecnologías o modificaciones implementadas por D.S. 28/2013 del MMA

En la presente sección se identifican y presentan las medidas implementadas desde la entrada en vigor de la norma del D.S. 28/2013 del MMA. Las medidas implementadas se presentan en la Tabla 4-3, con el detalle por etapa del proceso de la fundición de cobre.

**Tabla 4-3 Costos y eficiencia teórica de proyectos y medidas implementadas desde la entrada en vigor del D.S. 28/2013 del MMA**

Etapa	Medida	Eficiencia esperada	Costo de Inversión (USD)	Costo de operación (USD/t)	Fundición
Preparación de concentrados	Mantenimiento Tostación DMH	Mantener la eficiencia de la planta de tostación que es 67,8% As y 25,8% S	\$ 31.434.000	S.I	Ministro Hales (Planta de Tostación)
	Aumento captación MP Secador	N.A	\$ 2.394.000	S.I	Ventanas
	Modernización sistema de secado	N.I	\$ 71.326.000 (en todas las medidas)	S.I	Chagres
	Cambio secador de secado directo a indirecto	Reducción de emisiones de SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> y MP	\$ 41.000.000	S.I	Altonorte
	Pavimentación de caminos principales	Reducción de MP	\$ 2.600.000	S.I	
	Implementación de planta satélite regasificadora para abastecer de GN al sistema interno.	Reducción de SO <sub>2</sub>	\$ 4.000.000		
	Optimización PSFLUO	N.I	\$ 32.000.000	S.I	Caletones
Fusión	Horno Flash Potenciado	N.A	\$ 127.827.000		Chuquicamata
	Captación Gases secundarios CT y sangrías.	Disminución de azufre de 0,4%	\$ 23.500.000	\$300	Ventanas
Conversión	Implementación quinto CPS Reemplazo campanas primarias y Secundarias.	N.I	\$ 103.928.000	S.I	Chuquicamata
	Alimentación Carga Fría a CPS	No se cuenta con mediciones	\$ 6.262.548	N.I	Hernán Videla Lira
	Sistema Mecanizado Carga Fría CPS.	Disminución de azufre de 1,5%	\$ 60.000.000	\$300	Ventanas
	Captación Gases secundarios CPS	S.I	\$ 27.572.000	S.I	
Refinación	Sistema de Eliminación Humos Negros RAF	N.I	\$ 3.172.382	S.I	Hernán Videla Lira
	Sistema reforming para reducción de la opacidad de gases en hornos de refinación	N.I	\$ 6.000.000	S.I	Altonorte
	Eliminación Humos Visibles RAF	N.I	\$ 2.900.000	S.I	Ventanas
	Reducción Opacidad Humos Hornos Anódicos	N.I	\$ 62.000.000	S.I	Caletones
Limpieza de Escoria	Aumento captación MP y gases secundarios HLE/HE y sangrías.	0,4% S global 1% As global	\$ 5.500.000	S.I	Ventanas
	Planta Limpieza de Escorias	N.I	\$ 316.000.000	S.I	Caletones
Tratamiento de Gases	Aumento Capacidad de Tratamiento de Efluentes.	N.A	\$ 53.160.000	S.I	Chuquicamata
	Aumento eficiencia PAS, transformación de PAS N°3 y N°4 de simple contacto a doble contacto	N.I	\$ 560.000.000	S.I	
	Habilitación sistema de tratamiento de gases secador, HF y hornos de refino	N.I	\$ 210.164.000	S.I	
	Humos Negros (Planta de tratamiento de humos negros)	99,4% captación de MP	\$ 40.500.000	S.I	Potrerillos
	Mejoramiento Filtros de mangas	99% captación de MP		S.I	

Etapa	Medida	Eficiencia esperada	Costo de Inversión (USD)	Costo de operación (USD/t)	Fundición
Integral Captación y Procesamiento Gases	Precipitadores electrostáticos	93,2-98,9% captación de MP			
	Cámara de polvo y enfriamiento de gases	0.8-6.8% captación MP			
	Área de limpieza PAS	99,6% captación MP			
	Cambio de PAS de simple a doble contacto	Aumento de la fijación de azufre de 80% a 95%			
Planta de Limpieza de Gases	Torre Quench	50% As	N.I	N.I	Ministro Hales (Planta de Tostación)
	Lavador de flujo radial	97% impurezas			
	Precipitadores húmedos	99,85% As y captación de polvos y neblina ácida			
	Stripper	Retira SO2 en ácido débil			
Planta de Tratamiento de Gases de Cola y mejora de sistema de captura de gases primarios		N.I	\$ 10.711.590	\$12.000.000 (USD/año)	Hernán Videla Lira
Cambio de PAS N°3 de contacto simple a doble		Reducción de SO <sub>2</sub> , As y MP	\$ 41.000.000	S.I	Altonorte
Filtro de mangas (tratamiento de gases secundarios y sangrías)		N.I (98-99% MP teórico)	\$ 41.500.000	S.I	
Tratamiento Gases de Cola		Eficiencia de reducción de SO <sub>2</sub> 95 a 99%	\$ 19.200.000	\$300	Ventanas
Reemplazo Intercambiador de calor y Torre k5		S.I	\$ 10.392.000	S.I	Chagres
Mejora Tratamiento de gases HR y HLE/HE		N.I	\$ 71.326.000 (en todas las medidas)	S.I	
Reducción Emisiones (2 plantas de tratamiento de gases de cola)		N.I	\$ 176.000.000	S.I	

Fuente: (COPRIM, 2012) e información de CODELCO, Fundición HVL, Fundición Chagres y Fundición Altonorte

### 4.3 Identificación y análisis de tecnologías de control de emisiones

Las emisiones de gases en una fundición son de dos orígenes principales, fuentes puntuales y fuentes fugitivas. Las fuentes puntuales corresponden a puntos intencionales de liberación de gases al medio ambiente, tales como chimeneas de maquinaria. Las emisiones de gases fugitivos tienen que ver con emisiones no controladas, fugas que ocurren en los procesos o en el transporte de un proceso a otro. Las emisiones de gases fugitivos provienen principalmente de las siguientes fuentes (ver Tabla 5-1):

- Ineficiencia en la captura de gases por campanas primarias (CT, HF y CPS).
- Pérdidas de gases en los giros de los reactores fuera de campana y en su carga y descarga. Se pueden colectar estos gases a través de campanas secundarias, que alimentan un circuito independiente al de los gases primarios.
- Extracción de productos, a través de sangrías y canaletas, en el transporte de líquidos fundidos y el vaciado mediante ollas hacia los equipos, principalmente en el manejo de matas.
- Gases secundarios, por su menor contenido de  $\text{SO}_2$ , aunque contienen otros contaminantes y material particulado los que se generan en otras operaciones unitarias o reactores existentes. Entre estos gases secundarios están las chimeneas de los Hornos Secadores, en los Hornos de Limpieza de Escorias (HLE/HE), en los Hornos de Refinación, en los CPS, en los HF y en el reactor Noranda.

El control de las emisiones fugitivas se realiza mediante sistemas auxiliares de captación como son las campanas secundarias, las tapas en canaletas y campanas móviles. Generalmente, estos gases secundarios son filtrados en filtros manga y/o enviados a la atmósfera a través de una chimenea (los gases presentan baja concentración de  $\text{SO}_2$ , que es insuficiente para permitir su procesamiento en plantas de ácido<sup>84</sup>).

Las secciones a continuación presentan las alternativas de medidas de abatimiento de emisiones, presentando información con respecto a los costos levantados en literatura, las eficiencias esperadas y consideraciones.

#### 4.3.1 Almacenamiento de concentrados con control de emisiones

Esta medida consiste en la construcción de zonas de recepción y almacenamiento de materia prima con ciertas medidas para la prevención y reducción de emisiones de polvo de los concentrados. Esta medida se implementa en la etapa de preparación de concentrado.

---

<sup>84</sup> Se podrían tratar los gases secundarios en una planta de ácido, pero para esto se deberá controlar la concentración de  $\text{SO}_2$ , por ejemplo, mezclando gases primarios y secundarios.

**Tabla 4-4 Eficiencia y costos de lugar de almacenamiento con medidas de reducción de polvo**

Características	Dimensiones	Volumen [Nm <sup>3</sup> /h]	Eficiencia de reducción de MP	Costo de inversión	Fuente
Lugar de almacenamiento con filtro de mangas	5.000 m <sup>2</sup>	70.000	1-5 mg MP/Nm <sup>3</sup>	7,5 MM Euro	(European Commission-JRC, 2017)
Construcción con concreto impermeabilizado, boquillas de pulverización de agua e instalaciones de lavado de neumáticos para camiones de transporte	10.600 m <sup>2</sup> , (210.000 m <sup>3</sup> )	S.I.	1-5 mg MP/Nm <sup>3</sup>	7,5 MM Euro	(European Commission-JRC, 2017)

Fuente: Elaboración propia

Los costos levantados para estas medidas de reducción de polvos en el almacenamiento de concentrados, son casos particulares documentados, por lo cual se deben ver los costos caso a caso según el volumen de material a tratar, el espacio de almacenamiento, entre otros.

#### 4.3.2 Planta de tostación

Las plantas de tostación son instalaciones industriales que permiten la remoción de arsénico y azufre del concentrado. Esto resulta en una entrada menor de arsénico y azufre a las fundiciones. Si bien, este proceso resulta en emisiones, las cuales son tratadas en plantas de ácido, permite una remoción relevante del arsénico contenido, lo cual se traduce en menores emisiones de As y SO<sub>2</sub> en todas las etapas posteriores.

La eficiencia de esta medida se refleja en la reducción de las emisiones en todas las etapas posteriores. Para ello el escenario base de comparación corresponde al caso en que no se calcinan los concentrados, y por lo tanto entran con un contenido alto de impureza a la planta.

Para estimar la eficiencia de remoción se considera los datos observados en el caso de Chuquicamata durante el año 2020. En arsénico se observa que el contenido medio de los concentrados está entre 1% y 1,1% (promedio de 1,08%), mientras que las calcinas tienen una eficiencia de entre 0,3% y 0,4% (promedio de 0,35%). Lo anterior resulta en una eficiencia de reducción de 67,8% del contenido de arsénico en el caso del uso de calcina vs concentrado. De forma análoga el contenido de azufre en los concentrados está en un promedio de 31%, mientras que las calcinas alcanzan un 23%. Lo anterior es equivalente a una reducción de 25,8% para dicho contaminante.

Sin embargo, se debe considerar que la fundición opera con una combinación de concentrados y calcinas, que en el caso de Chuquicamata entre el 2017 y 2020 ha mantenido una proporción de 1 medida de calcina a 11,5 medidas de concentrado.

Considerando la operación del año 2020 en DCH, se estima que de no haber sido por la tostación hubieran entrado 929 toneladas adicionales de arsénico que considerando la eficiencia promedio

de captura y fijación, resultan en una emisión de 21,4 toneladas adicionales de arsénico. Considerando que las emisiones de arsénico estuvieron en torno a 180 toneladas, la reducción es equivalente a un 10,6%, de forma análoga en azufre se estima que sin la planta de tostación hubiera habido una estimación adicional de 152 toneladas, lo que se traduce en una reducción equivalente de 1,6%.

A partir de la experiencia de la planta de tostación en Ministro Hales se estiman costos ajustados a la realidad local, para ello se revisa la RCA 240/2010 en las cuales se presenta la planta de tostación y la RCA 335/2017 en la cual se ejecutan modificaciones para aumentar su capacidad, pasando de 660 kt/año a 780 kt/año. De esta revisión se estima un costo para plantas de tamaño similar de 1,8 MMUSD por kt/año de capacidad. Sus costos de operación se ubican en torno a los 450 USD/t procesada (Lagos et al., 2021).

**Tabla 4-5 Eficiencia y costos de lugar de almacenamiento con medidas de reducción de polvo**

Dimensiones	Eficiencia de reducción	Costo de inversión	Costo de operación	Vida útil [años]	Fuente
780 kt/año	67,8% As 25,8% S	1,8 MMUSD por kt/año de capacidad	450 USD/t procesada	20	RCA 240/2010 RCA 335/2017 (Lagos et al., 2021)

Nota: la eficiencia se calcula en base a un caso real

Fuente: Elaboración propia

Considerando una vida útil de 20 años, una tasa de descuento de 6%, se obtiene un valor medio de 600 USD/t de concentrado procesado. Dependiendo de los niveles de arsénico contenidos en los concentrados, así como del nivel de captura de las fundiciones los valores unitarios por tonelada de arsénico evitada pueden variar, sin embargo, considerando que en Chuquicamata se procesaron cerca de 6000 toneladas de calcinas para lograr la reducción de 1 tonelada de arsénico, el costo por tonelada anual de arsénico evitada está en el orden de los 3,6 MUSD.

### 4.3.3 Filtro de mangas

Filtros construidos de tela porosa por la cual fluyen los gases y se retienen las partículas. La selección de la tela a utilizar dependerá del tamaño de las partículas que se busca capturar y las características de temperatura y presión del gas a tratar (European Commission-JRC, 2017).

Los filtros de mangas pueden implementarse a la salida de gases para diversas etapas tales como secado, fusión, conversión, refinación y generalmente se incluye en las etapas iniciales de tratamiento de gases de las plantas de ácido.

**Tabla 4-6 Eficiencia y costos de filtro de mangas**

Volumen [Nm <sup>3</sup> /h]	Eficiencia de reducción de MP	Costo de inversión	Costo de operación	Vida útil [años]	Fuente
S.I.	99,5% Emisión menor o igual 1 – 5 mg/Nm <sup>3</sup>	5.885.000 USD		15	(COPRIM, 2012)
730.000	Emisión menor a 10 mg/Nm <sup>3</sup>	14 MM EUR (1998)	2-3 kWh/1000 Nm <sup>3</sup>	S.I.	(European Commission-JRC, 2017)
70.000	Emisión menor a 10 mg/Nm <sup>3</sup>	2 a 2,5 MM EUR (1998)	1,5-4 kWh/1000 Nm <sup>3</sup>	S.I.	
S.I.	Hg 10% Cd 99,9% Ni 99,9% As 99,9% Pb 99,9% MP 2,5 >99,6% MP10 > 99,9%	S.I.	Recambio de telas cada 2 años	20	(EMEP/EEA, 2019b, Chapter 2.C.7.a)
45.000	98-99% <sup>(*)</sup>	S.I.	S.I.	S.I.	Codelco, división Ventanas (2021)
125.000	99% <sup>(*)</sup>	S.I.	S.I.	S.I.	
200.000	99% <sup>(*)</sup>	S.I.	S.I.	S.I.	Codelco, división Salvador (2021)
S.I.	90%	18 MM USD (2019)	2,4 MM USD (2019)	20	(US-EPA & French, 2020)

Nota: en el caso de estudio de Asarco, Estados Unidos (US-EPA & French, 2020), se incorpora un capturador de techo y un filtro de manga en un horno de fundición flash.

(\*) Información nominal entregada por CODELCO

Fuente: Elaboración propia

Las diferentes fuentes de información coinciden en la identificación de una alta eficiencia de reducción de MP para el filtro de mangas. No se cuenta con mucha información con respecto a costos, sin embargo, el costo aumenta con mayor flujo de gases a tratar y dependerá también del material de las mangas del filtro y del método de limpieza de dichas mangas (EPA, 1998). Si se analiza el costo por Nm<sup>3</sup> se tiene que, para grandes volúmenes, se tiene un costo de 19,18 EUR/Nm<sup>3</sup> y 32,14 EUR/Nm<sup>3</sup> para volúmenes menores, estos costos son en euros en 1998. Si estos costos se llevan a UF 2021 se tiene un costo de 0,55 UF/Nm<sup>3</sup> y 0,93 UF/Nm<sup>3</sup> para 730.000 y 70.000 Nm<sup>3</sup> respectivamente, mientras que para el caso de Asarco se tiene un costo de inversión de 0,64 UF/t producida.

#### 4.3.4 Precipitador electrostático

Equipo que se utiliza para extraer el polvo arrastrado de un flujo gaseoso. Se expone a las partículas a un campo magnético, aprovechando las propiedades de éstas de cargarse eléctricamente, separándose por atracción electromagnética. Los precipitadores pueden implementarse a la salida de gases para diversas etapas tales como secado, fusión, conversión, refinación y generalmente se incluye en las etapas iniciales de tratamiento de gases de las plantas de ácido.

**Tabla 4-7 Eficiencia y costos de precipitador electrostático seco**

Volumen [Nm <sup>3</sup> /h]	Eficiencia de reducción de MP	Costo de inversión	Consideraciones de operación	Fuente
S.I.	99% Emisión menor o igual 5 – 15 mg/Nm <sup>3</sup>	S.I.	S.I.	(COPRIM, 2012)
136.400	98,9% <sup>(*)</sup>	S.I.	S.I.	Codelco, división Salvador (2021)
68.757	93,2% <sup>(*)</sup>	S.I.	S.I.	
38.000	98-99% <sup>(*)</sup>	S.I.	S.I.	Codelco, división Ventanas (2021)
70.000	98,0% <sup>(*)</sup>	S.I.	S.I.	
55.000	99,0%	S.I.	S.I.	
S.I.	Hg 5% Cd 84,7% Ni 84,7% As 84,7% Pb 84,7%	S.I.	S.I.	(EMEP/EEA, 2019b, Chapter 2.C.7.a)
43.000	99,9%	1 MM EUR (1991)	250 kW instalados	(European Commission-JRC, 2017)
61.000	99,8%	2 MM EUR (1991)	400 kW instalados	

(\*) Información nominal entregada por CODELCO

Fuente: Elaboración propia

Al igual que para el filtro de mangas, las diferentes referencias y casos de aplicación (como en las divisiones Salvados y Ventanas de Codelco) coinciden en altos valores de eficiencia de reducción para MP (sobre 90%). Los costos aumentan al aumentar el flujo a tratar, quedando en 0,86 UF/Nm<sup>3</sup>/h para 43.000 Nm<sup>3</sup>/h y 1,21 UF/Nm<sup>3</sup>/h para 61.000 Nm<sup>3</sup>/h.

Cuando el material precipitado se remueve de las placas recolectoras por lavado con un líquido apropiado, generalmente agua, se habla de un precipitador electrostático húmedo. Generalmente incluye un mecanismo para remover gotas de agua antes de la emisión del gas residual (European Commission-JRC, 2017).

**Tabla 4-8 Eficiencia y costos de precipitador electrostático húmedo**

Volumen [Nm <sup>3</sup> /h]	Eficiencia de reducción	Costo de inversión	Consideraciones de operación	Fuente
88.000	99% Polvo, As y H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2 MM EUR (1991)	Consumo energético de 112 kW	(European Commission-JRC, 2017)
96.000	96-97% Polvo 99% Arsénico	7,5-8 MM EUR (1991)	Consumo energético de 828 kW	
250.000	96-97% Polvo 99% Arsénico	16-17 MM EUR (1991)	Consumo energético de 1250 kW	
S.I.	MP2,5 94,4% MP10 98,2%	S.I.	S.I.	(EMEP/EEA, 2019b, Chapter 2.C.7.a)
S.I.	95%	39 MM USD (2019)	S.I.	(US-EPA & French, 2020)
522.686 [101.941-2.534.407] (*)	95%	33 [14-96] MM USD (2017) (*)	S.I.	(US-EPA & Jones, 2019)

(\*) Valor promedio, y rango mínimo y máximo entre paréntesis cuadrado, de 24 precipitadores electrostáticos húmedos.

Fuente: Elaboración propia

Los precipitadores electrostáticos húmedos tienen costos mayores que los precipitadores secos, presentando valores de 3,07 UF/Nm<sup>3</sup>/h, 2,43 UF/Nm<sup>3</sup>/h y 0,84 UF/Nm<sup>3</sup>/h, para flujos de 96.000, 250.000 y 88.000 Nm<sup>3</sup>/h, respectivamente. Por otro lado, se evalúa la aplicación de precipitadores electrostáticos húmedos en el horno anódico en Asarco y Freeport, Estados Unidos (US-EPA & French, 2020). En dicho caso de estudio, se obtiene para Asarco un costo de inversión de 1,39 UF/t producida y para Freeport de 1,66 UF/t producida. Finalmente, en el documento “*Ample Margin of Safety Analysis for Point Sources in the II&S Industry*” (US-EPA & Jones, 2019), se obtienen datos de 24 precipitadores electrostáticos húmedos aplicados en distintas instalaciones de Estados Unidos (US-EPA & Jones, 2019), con un valor promedio de 0,3 UF/Nm<sup>3</sup>/h con un flujo promedio de 522.686 Nm<sup>3</sup>/h.

#### 4.3.5 Scrubber

Equipo de lavado de gases, mediante la aplicación de una lluvia finamente diseminada aplicada en contra corriente de los gases. El compuesto formado depende del contaminante que se desea fijar y de la composición de la solución utilizada. Los scrubbers pueden implementarse a la salida de gases para diversas etapas tales como secado, fusión, conversión y refinación.

**Tabla 4-9 Eficiencia y costos de diferentes scrubbers**

Tipo de scrubber	Volumen [Nm <sup>3</sup> /h]	Eficiencia de reducción	Costo de inversión	Consideraciones de operación	Fuente
Alcalino	50.000	85% SO <sub>2</sub> 97% As	S.I.	4.050 t/año de yeso residual	(COPRIM, 2012)
	S.I.	S.I.	150-250 EUR/t producida/año	S.I.	(European Commission-JRC, 2017)
Seco	S.I.	S.I.	100-200 EUR/t producida/año	S.I.	
Semi-seco	80.000	<50 mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup> 95% dioxinas y furanos	9,01 EUR/t metal (1999)	S.I.	
Húmedo con agua de mar	S.I.	S.I.	200-300 EUR/t producida/año	S.I.	
Venturi	S.I.	MP2,5 92,3% MP10 96,7%	S.I.	S.I.	(EMEP/EEA, 2019b, Chapter 2.C.7.a)
Venturi moderno	S.I.	MP2,5 99% MP10 > 99,9%	S.I.	S.I.	

Fuente: Elaboración propia

Para los scrubber los costos varían dependiendo del tipo de scrubber, así también varían las eficiencias de reducción de contaminantes. El scrubber alcalino cuenta con un costo de 5,51 UF/t producida, el scrubber seco tiene un costo mayor de 6,89 UF/t producida, el scrubber de agua de mar tiene un costo de 4,13 UF/t, mientras que el scrubber del caso de estudio (US-EPA & French, 2020), aplicado como control de combinación de emisiones secundarias en Freeport, Arizona, tiene un costo de 1,53 UF/t, siendo el scrubber semi seco el de menor valor con 0,33 UF/t producida.

#### 4.3.6 Planta de limpieza de escorias por flotación

Planta de flotación, con la finalidad de recuperar materia prima de las escorias de fundición. La planta es en reemplazo de hornos de limpieza de escoria, por lo cual genera ahorros en combustible. Esta medida se implementa luego de la fusión o conversión, para tratar las escorias de dichos procesos.

**Tabla 4-10 Eficiencia y costos de planta de limpieza de escorias por flotación**

Eficiencia de reducción	Costo de inversión	Vida útil [años]	Fuente
6% S (*) 35% As (*) 57% MP (*)	60 MMUSD (2011)	5	Fundición Potrerillos, 2011
S.I.	316 MMUSD (2021)	S.I.	Codelco, División Teniente (2021)

(\*) Información nominal entregada por CODELCO

Fuente: Elaboración propia

### 4.3.7 Incineradores post-combustión

Sistema de combustión en el cual el contaminante dentro del flujo de gas reacciona con el oxígeno en un ambiente controlado para generar reacciones de oxidación. Se utilizan para oxidar CO, polvo y materiales orgánicos en un flujo de gas. La eficiencia de reducción de contaminantes dependerá de la temperatura y tiempo de residencia del flujo de gas en la cámara de incineración.

Medida de abatimiento de gases que busca conseguir la combustión completa de los humos provenientes de la unidad de refino, requiere de un precipitador electrostático seco posterior a la incineración.

Esta medida en general se implementa luego del refino, para tratar los gases provenientes de dicha etapa, ya que estos son los principales responsables de las emisiones de hollín.

**Tabla 4-11 Eficiencia y costos de incineradores post-combustión**

Volumen [Nm <sup>3</sup> /h]	Eficiencia de reducción	Costo de inversión	Consideraciones de operación	Fuente
S.I.	Opacidad menor a 4	S.I.	S.I.	(COPRIM, 2012)
S.I.	99% compuestos orgánicos	15-60 EUR/t producida/año (2017)	Tiempo de residencia de 2 segundos	(European Commission-JRC, 2017)
20.000	98% dioxinas y furanos	12,72 EUR/t metal (1999)	Incluye incinerador, reactor y filtro de mangas	
		10,03 EUR/t metal (1999)	S.I.	

Fuente: Elaboración propia

Los costos de los incineradores se presentan por tonelada de metal producido, existiendo importantes variaciones según el año de estimación. Los costos de 1999 son de 0,37 UF/t para el incinerador simple y 0,46 UF/t al adicionar un filtro de mangas, sin embargo, el costo del 2014 se informa en el rango de 0,41 a 1,66 UF/t producida.

### 4.3.8 Sistemas de captura de emisiones fugitivas

Estos sistemas permiten capturar las emisiones que no se evacúan directamente por chimeneas —incluyendo emisiones secundarias y otros gases de proceso—. Si bien no consiste en una medida de abatimiento en sí misma, la captura de emisiones fugitivas permite aumentar la eficiencia de medidas existentes en la fundición, al aumentar los gases y contaminantes capturados, los que son redireccionados a sistemas de tratamiento, de tal manera que se disminuyen las emisiones del tipo fugitivas. La captura de emisiones fugitivas puede realizarse en todas las etapas del proceso de fundición. Suele incluir sistemas de captura de techo, como campanas.

**Tabla 4-12 Costos de sistemas de captación de gases secundarios**

Detalles	Costo de inversión	Consideraciones de operación	Fuente
Instalación de una campana doble	2 a 3 MMUSD	Para un convertidor Peirce-Smith de tamaño estándar	(Universidad de Chile, 2010)
Instalación de un sistema completo de captura de gases secundarios	10 MM USD	S.I.	
Capturador de techo	3.5 MM USD	Para un horno de fundición	(US-EPA & French, 2020)
Capturador de techo	3.5 MM USD	Para un convertidor	(US-EPA & French, 2020)

Fuente: Elaboración propia

Los datos de las instalaciones proporcionadas por la Universidad de Chile no contienen la información del flujo o capacidad de estas, por lo que no se puede calcular el valor unitario para esos casos. Por otro lado, se analiza el caso de captación de gases con un capturador de techo en un horno de fundición y de un convertidor en Freeport, Estados Unidos, donde el captador del convertidor corresponde a un captador terciario. En el caso de estos capturadores de techo, los costos considerados por la US-EPA incluyen únicamente la instalación de los sistemas de captura en techo, dado que las fundiciones analizadas ya cuentan con sistemas de tratamiento con capacidad disponible, de modo que se asume que el nuevo flujo de gases capturados se podría tratar con los sistemas ya operativos. El costo unitario para cada capturador es de 0,15 UF/t producida.

### 4.3.9 Planta de ácido sulfúrico

La planta de ácido permite reducir los niveles de SO<sub>2</sub>, material particulado y arsénico ambiental. Cuenta con un sistema de captación de gases, sistema de enfriamiento y limpieza de gases, unidad de contacto, sistema de almacenamiento y sistema de enfriamiento de agua. Dispone además de una planta de tratamiento de efluentes para procesar los residuos líquidos generados en la etapa de limpieza de los gases. La planta de ácido se ubica posterior a los equipos de los cuales obtiene los gases a tratar, los cuales pueden estar en las etapas de fusión o conversión. Se pueden tratar los gases de una o más etapas, para su posterior tratamiento.

**Tabla 4-13 Eficiencia y costos de plantas de ácido sulfúrico**

Tipo de planta	Volumen [Nm <sup>3</sup> /h]	Eficiencia de reducción	Costo de inversión	Consideraciones de operación	Vida útil [años]	Fuente
Contacto simple	200.000	97% SO <sub>2</sub> 73% As	100 MMUSD (1999)	Concentración de SO <sub>2</sub> de 6-9% 1.500 t/d de ácido sulfúrico	25	Fundición Potrerillos, 1999
	S.I.	97,6% SO <sub>2</sub>	S.I.	S.I.	S.I.	(EMEP/EEA, 2019b, Chapter 2.C.7.a)
Contacto doble	S.I.	99,6% SO <sub>2</sub>	421 MMUSD (2021)	Incluye mejoramiento general de la captación de gases	S.I.	Fundición Potrerillos, 2021

Fuente: Elaboración propia

La inversión de la fundición Potrerillos en 1999 se traduce en un costo de 17,11 UF/Nm<sup>3</sup>. Si bien no se tienen mayores fuentes para obtener costos, las diferentes fuentes concuerdan en la eficiencia de reducción de SO<sub>2</sub>, siendo mayor la eficiencia para las plantas de ácido de doble contacto.

#### 4.3.9.1 Acondicionamiento de planta de ácido sulfúrico de contacto simple a contacto doble

Mejoramiento integral al sistema de captación y tratamiento de gases existente, desde las campanas de captación de gases de los reactores al interior de la Fundición hasta la producción de ácido sulfúrico, a través de un cambio tecnológico importante como lo es el Doble Contacto para la planta de ácido sulfúrico, y la reparación integral del sistema de tratamiento de gases, por lo cual es posible mejorar aún más los niveles de captación de gases generados por la operación, así como aumentar los índices de fijación de S y As en el proceso de la Planta de Ácido Sulfúrico

**Tabla 4-14 Costos de cambio de planta de ácido de contacto simple a doble**

Características	Capacidad	Costo de inversión	Consideraciones de operación	Vida útil [años]	Fuente
Mejoramiento integral de la captación y procesamiento de gases y cambio PAS de contacto simple a doble	Planta de 500 t/d de ácido	155 MM USD (2012)	Aumento en consumo eléctrico 2MW/año Ahorro en combustible 5.892 t/año Consumo adicional de agua 57 m <sup>3</sup> /h	25	RCA Proyecto “Mejoramiento Integral de la Captación y Procesamiento de Gases Fundación Potrerillos”, Fundación Potrerillos, 2012
Cambio PAS de contacto simple a doble	S.I.	6 MM USD (2000)	S.I.	S.I.	(COPRIM, 2012)
Cambio de dos PAS de contacto simple a doble	S.I.	30 MM USD (2015)	No se contempla consumo eléctrico adicional Consumo adicional de agua 450 m <sup>3</sup> /mes	15	RCA Proyecto “Aumento de Eficiencia Plantas de Ácido Sulfúrico N°3 y 4 a Doble Contacto – Doble Absorción”, Fundación Chuquicamata, 2015

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.10 Planta de tratamiento de gases de cola

Consiste en una planta de tratamiento de los gases provenientes de las plantas de ácido. Está compuesta por una torre de absorción empacada, la cual utiliza peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) en conjunto con agua desmineralizada para oxidar el dióxido de azufre proveniente de las plantas de ácido, obteniéndose ácido sulfúrico débil (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), el cual puede ser recirculado hacia las plantas de ácido como agua de dilución y aporte de ácido.

**Tabla 4-15 Eficiencia y costos de plantas de tratamiento de gases de cola**

Reactivo	Volumen [Nm <sup>3</sup> /h]	Concentración a alcanzar	Costo de inversión	Costo de operación	Consideraciones	Fuente emisora	Fuente
Hidróxido de sodio	100.000	200 mg SO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup> 2 kg SO <sub>2</sub> /t H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	6 MM Euro <sup>(1)</sup>	4,5 Euro/t	Generan residuos en grandes cantidades	General	(COPRIM, 2012)
Hidróxido de amonio				4,4 Euro/t			
Hidróxido de calcio				4 Euro/t			
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>				40 Euro/t			
Carbón activado				6 Euro/t			
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	116.000	64% de SO <sub>2</sub>	13,8 MM USD	S.I.	S.I.	Ventanas	(CODELCO, 2017) (COPRIM, 2012)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	150.000	< 600 ppm/día	10.711.590 USD <sup>(1)</sup>	12.000.000 USD/año	S.I.	HVL	Fundición HVL (2021)
Carbón activado	S.I.	S.I.	176 MM USD <sup>(2)</sup>	S.I.	S.I.	Caletones	RCA Proyecto "Reducción de emisiones de anhídrido sulfuroso en gases de cola de las plantas de limpieza de gases Caletones – Tecnología Sulfacid", 2016

(1) Los costos de inversión son estimaciones del año 2000

(2) Costo de dos PTGC

Fuente: Elaboración propia

Los costos de inversión para plantas de tratamiento de gases de cola son bastantes similares para los diferentes reactivos, como se muestra en la Tabla 4-16, variando entre 1,45 y 1,97 UF/Nm<sup>3</sup>. Para la operación, sin embargo, los costos son similares, excepto para el uso de peróxido de hidrógeno como reactivo, siendo hasta 10 veces mayor que otros costos operativos. Esto coincide con la experiencia levantada en la fundición HVL, que cuenta con una Planta de Tratamiento de Gases de Cola con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, con altos costos operativos anuales (2,21 UF/Nm<sup>3</sup>-año).

**Tabla 4-16 Costos unitarios de inversión y operación para plantas de tratamiento de gases de cola**

Reactivo	Costo unitario de inversión [UF/Nm <sup>3</sup> ]	Costo de operación [UF/t]	Fuente
Hidróxido de sodio	1,94	0,15	(COPRIM, 2012)
Hidróxido de amonio		0,14	
Hidróxido de calcio		0,13	
H2O2	1,78	1,29	
Carbón activado	1,45	0,19	
S.I.	1,97	2,21 UF/Nm <sup>3</sup> -año	Fundición HVL (2021)

Fuente: Elaboración propia

De manera adicional, en las plantas de tratamiento de gases de cola se pueden abatir otros contaminantes, tales como el mercurio, la Tabla 4-17 presenta diversas alternativas de tratamientos, en plantas de tratamiento de gases de cola para abatir mercurio del flujo de gases.

**Tabla 4-17 Eficiencia tratamiento de gases de cola para abatimiento de mercurio**

Reactivo	Concentración a alcanzar	Eficiencia	Fuente
Filtro de Selenio	Filtro poroso relleno con ácido selenioso tratado para dar selenio rojo amorfo para bajas concentraciones de mercurio	90%	(COPRIM, 2012)
Lavador de selenio	Ácido sulfúrico en el rango 20-40% de concentración, conteniendo selenio es circulado en una torre empacada (scrubber), por la que pasa el gas con relativamente altos contenidos de mercurio.	90%	
Filtro de carbón	Adsorción de mercurio con carbón activado	90%	
Precipitación de sulfuro en fase gaseosa	Una cantidad controlada de H2S es inyectado en la fase gaseosa que reacciona con el mercurio para formar HgS	90%	
Proceso Outokumpu	Se basa en la conversión de Hg en HgSO4, donde el gas es lavado con ácido sulfúrico de 80-90% de concentración a 150-180°C, siendo recirculado hasta la saturación con HgSO4, hasta que comienza la precipitación	S.I.	
Proceso Bolkem	El Hg se captura en dos torres de secado operando en serie, la primera con un ácido de 80% de concentración y bajo 50°C. La segunda torre de secado es convencional y opera con ácido de 93% H2SO4.	S.I.	

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.11 Planta de tratamiento de humos negros

Este sistema busca disminuir la opacidad de los humos provenientes de los hornos de refino, esto se logra mediante el enfriamiento, saturación, lavado y precipitación electrostática de la corriente de gas.

**Tabla 4-18 Eficiencia y costos de plantas de tratamiento de humos negros**

Volumen [Nm <sup>3</sup> /h]	Eficiencia de reducción	Costo de inversión	Costo de operación	Consideraciones	Fuente emisora	Fuente
49.134	99,4% MP	40,5 MMUSD	S.I.	S.I.	Potrerrillos	Codelco, división el Salvador (2021)
42.084	S.I.	71,3 MMUSD <sup>(1)</sup>	S.I.	S.I.	Chagres	(AngloAmerican, 2021) (Ponce, Oyaneder, & Pastén, 2018)
S.I.	S.I.	210,2 MMUSD <sup>(2)</sup>	S.I.	S.I.	Chuquicamata	CODELCO, 2021

(1) En la implementación de la modernización del Sistema de Secado de Concentrados, en el Tratamiento de los Gases de los Hornos de Refino y Tratamiento de los Gases de los Hornos de Limpieza de Escorias.

(2) Habilitación sistema de tratamiento de gases secador, HF y hornos de refino

Fuente: Elaboración propia

La inversión de la división el Salvador de Codelco se traduce en un costo de 21 UF/Nm<sup>3</sup> de gases a tratar.

#### 4.3.1 Sistema de alimentación de carga fría a convertidores CPS

Corresponde a un sistema para agregar carga fría sin volteo del convertidor, optimizando la captura de las emisiones, al evitar las emisiones fugitivas que de otro modo se liberarían durante el volteo del convertidor en la alimentación de carga fría. Esta “alimentación de carga fría a CPS” nombrada en la fundición HVL es lo que en la fundición Ventanas se denomina “sistema mecanizado de carga fría de los CPS” (ver Tabla 4-3 en la Sección 4.2).

**Tabla 4-19 Eficiencia y costos de sistema de alimentación de carga fría a convertidores CPS**

Eficiencia de reducción	Costo de Inversión	Costo de operación	Fuente
S.I.	3.131.274 USD	S.I.	Fundición HVL
1,5% SO <sub>2</sub>	60.000.000 USD	300 USD/t	Fundición Ventanas

Fuente: Elaboración propia

## 5. Estimación de potencial de reducción de emisiones para las actuales fuentes emisoras de arsénico

Para establecer la estimación potencial de reducción de emisiones para las fuentes emisoras de arsénico, es necesario contar con una estimación a nivel de proceso unitario de las emisiones. Con ello se puede realizar una modelación numérica de cómo cambian las emisiones en escenarios con que se implementen diferentes alternativas de mitigación, comparando con la situación actual<sup>85</sup>. Si bien con la metodología de balance de masa se cuenta con una buena aproximación del total de emisiones (ver Sección 3.2.4), su distribución a nivel de proceso unitario es complejo, dependiendo de factores como las características de los concentrados, la tecnología utilizada, las eficiencias de los sistemas de captura y sistemas de abatimiento, entre otros.

De esta forma, la primera Sección del presente capítulo se enfoca en lograr una aproximación razonable de la distribución de las emisiones actuales para establecer, a nivel de procesos unitarios, una estimación de emisiones por nivel de procesamiento. En la segunda Sección, a partir de los resultados previos y lo desarrollado en el Capítulo anterior, se realiza una estimación del potencial de reducción de las diferentes alternativas.

El proceso anterior se concentra en las principales fuentes emisoras de arsénico que a su vez presentan niveles de emisión muy por sobre las emisiones de otras fuentes emisoras de arsénico. Respecto a las otras fuentes emisoras de arsénico existentes, actualmente la única fuente que calza con la definición del D.S. 28/2013 del MMA corresponde a la planta de tostación de la División Ministro Hales. La planta de tostación si bien es un proceso complejo con múltiples etapas (tostador, soplador, enfriador, sistemas de gestión de gases y sistema de gestión de polvo), genera sus principales emisiones durante el proceso de tostación siendo sus gases liberados tras el tratamiento de los gases en una primera etapa con un Torre Quench, Scrubber, torre de enfriamiento y precipitados húmedos, y luego en una planta de ácido. De esta forma, la planta de tostación es tratada como un único proceso unitario en el presente informe.

### 5.1 Relación emisión – nivel de procesamiento

Del resultado del balance de masa de las siete fundiciones de cobre del país, se cuenta con una estimación de la cantidad total de emisiones de SO<sub>2</sub> y Arsénico, las cuales el año 2020 superaron las 81 kt/año en el caso del SO<sub>2</sub>, y las 470 t/año en el caso del Arsénico (ver Sección 3.2.4.1). La estimación del balance de masa, permite contar con la estimación de emisiones para cada una de las fundiciones y es complementario con la estimación de emisiones por chimenea con información disponible para las mismas fundiciones y la planta de tostación de DMH. Estas

---

<sup>85</sup> Para el presente estudio, la situación actual se utiliza como escenario contrafactual, tomando el rol de línea base. Bajo esta aproximación, el supuesto subyacente es que la situación futura sea equivalente a la situación observada en el año base (2020).

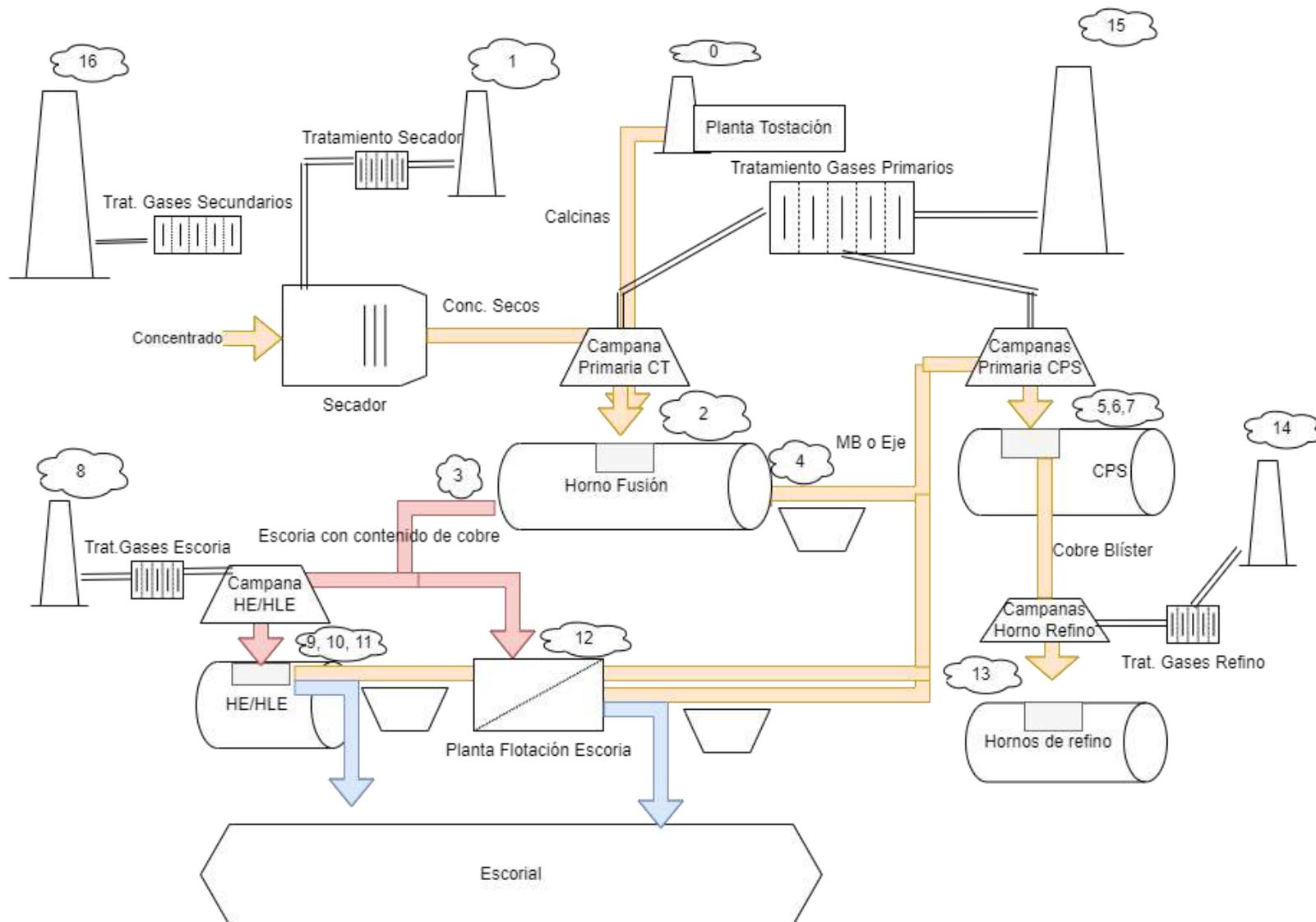
emisiones se pueden estimar por medio de las mediciones isocinética y monitoreo continuos, cuyos resultados son reportados en el marco de la actual norma de emisiones (ver detalles Sección 3.2.4.2).

Dado la forma en que se estima el balance de masa reportado, las emisiones estimadas por chimenea están contenidas en el resultado del balance de masa, por lo tanto, la diferencia entre las emisiones obtenidas a partir de balance de masa y las emisiones estimadas en chimenea corresponde a las emisiones en las otras fuentes, ya sean las otras chimeneas o emisiones fugitivas.

Para poder aproximar la distribución de las emisiones de las otras fuentes unitarias cabe considerar cual es el origen de estas emisiones. De forma general, por un lado, están las emisiones puntuales de los procesos unitarios asociadas tanto a la combustión de combustibles, como a las emisiones de procesos que ocurren como consecuencia de las transformaciones de la materia prima en cada uno de los procesos unitarios. Estas emisiones ocurren en las diferentes etapas de preparación de los concentrados, fusión, convertidores, refinado, limpieza de escorias y tratamiento de gases, y, actualmente, la mayor parte de sus emisiones son capturadas y abatidas. No obstante, de la fracción que no es capturada y abatida se distinguen dos tipos. En primer lugar, aquellas emisiones capturadas, pero que dada las ineficiencias de los sistemas de abatimiento instalados no son capturadas, sino que se liberan a la atmósfera por medio de chimeneas que favorecen su dispersión. Por otro lado, un segundo tipo de emisiones corresponden a las emisiones fugitivas que ocurren producto de la ineficiencia de los sistemas de captura instalados, así como por las emisiones que ocurren sin sistemas de capturas durante los procesos batch, tales como carga, sangría, transporte de material en ollas, entre otras.

Al respecto, se destaca que actualmente en algunas de las fundiciones parte de las emisiones fugitivas son capturadas mediante sistemas de captura secundarios, y son tratadas en sistemas de tratamiento secundarios especializados para ser liberadas a la atmósfera por medio de chimeneas adecuadas para ellos. Estas descargas actualmente no están reguladas directamente por el D.S. 28/2013 del MMA, sino que su control ocurre de forma indirecta por medio de los límites anuales de emisión y exigencias de eficiencia de captura y fijación. Independiente de lo anterior, existen otros instrumentos de gestión ambiental que han regulado las emisiones de estas chimeneas, lo cual depende de la normativa específica aplicable a cada fundición.

Si bien, existen numerosas opciones de clasificar los procesos unitarios, a partir de una revisión bibliográfica de esfuerzos por caracterizar las emisiones en procesos unitarios (COPRIM, 2012; Universidad de Chile, 2010; US-EPA, 1995) se seleccionaron los principales procesos emisores. Al respecto cabe destacar, que existe consenso en que las emisiones, especialmente las que se ven afectadas por la disponibilidad de algún elemento (tales como SO<sub>2</sub> y As), se ven afectadas por la configuración y tecnología de cada fundición. En este sentido se privilegiaron estudios nacionales que hayan justamente realizado ejercicios similares en Chile. En la Tabla 5-1 se presenta el detalle de los procesos unitarios considerados, las cuales se esquematizan en la Figura 5-1.



**Figura 5-1 Diagrama esquemático de fuentes emisoras consideradas**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-1 Clasificación de fuentes emisoras consideradas en las fundiciones**

Etapa	Tipo de fuente emisora	Id (1)	Fuente emisora y/o actividad
Preparación de concentrados	Puntual	0	Tostador <sup>86</sup>
		1	Secador
Fusión	Fugitiva	2	Fugitivo Boca Reactor
		3	Sangría/transporte Escoria Reactor
		4	Sangría/transporte MB o eje
Convertidores	Fugitiva	5	Fugitivo Boca CPS
		6	Vaciado/transporte Blíster
		7	Vaciado/transporte Escoria CPS
Limpieza de escorias	Puntual	8	Chimenea HLE/HE
	Fugitiva	9	Fugitivo Boca HLE/HE
		10	Sangría/Transporte MB HLE/HE
		11	Sangría/Transporte Escoria HLE/HE
12	Transporte/enfriado/chancado Escoria		
Refinación	Puntual	13	Chimenea de planta de tratamiento de gases de hornos de refinación y /o basculante
	Fugitiva	14	Fugitivo Horno Anódico
Tratamiento de gases	Puntual	15	Gases de Cola Planta de ácido
		16	Tratamiento de gases secundarios

(1) Id se refiere a la emisión según la numeración explicitada en la Figura 5-1.

Fuente: Elaboración propia

Las fuentes de emisión esquematizadas en la Figura 5-1 corresponden a una visión general de las fuentes, pues no todas las fundiciones tienen las mismas fuentes de emisión. Por ejemplo, las fundiciones de Chuquicamata, Altonorte, Potrerillos y Caletones no operan con HE/HLE, sino que utilizan sistemas de flotación de escoria para la recuperación del Cobre desde las escorias con alto contenido de cobre. Asimismo, en ninguna de las fundiciones se encuentra integrado actualmente una etapa de tostación, aunque existe actualmente la planta de tostación de la División Ministro Hales que opera como una fuente de emisión independiente, proveyendo de calcinas principalmente a la fundición de Chuquicamata.

Por otro lado, las fuentes emisoras descritas no son necesariamente independiente entre ellas. Por ejemplo, las emisiones fugitivas del reactor dependen tanto de la eficiencia de captura de la campana primaria, cuyas emisiones son tratadas y llevadas a las plantas de ácido, como de los sistemas de captura secundario, cuyas emisiones son procesadas por sistemas de tratamiento de gases secundarios y posteriormente liberadas por chimeneas adecuadas para ello. De la misma forma las emisiones asociadas a las chimeneas de las plantas de ácido, dependen tanto de las eficiencias de las capturas en los reactores como en los CPS, así como de la eficiencia de abatimiento de los contaminantes durante su tratamiento. Lo anterior busca ilustrar que la

<sup>86</sup> En Chile actualmente la única otra fuente de emisión de arsénico, según la definición del D.S. 28/2013 del MMA, corresponde a la planta de tostación de la División Ministro Hales, la cual, si bien produce calcinas para Chuquicamata, no está directamente integrada a dicha fundición.

complejidad de las fuentes emisoras no se debe sólo al alto número de fuentes y su dependencia de múltiples variables, sino que también a la interrelación que existe entre ellas.

La metodología para estimar la distribución de emisiones, presentada de forma esquemática en la Figura 5-2, consiste en estimar los efectos de las tecnologías implementadas desde la entrada de la norma sobre la distribución de emisiones. Al respecto, se advierte que los resultados de esta metodología están sujetos a la incertidumbre propia de los supuestos utilizados tanto para la situación pre-norma, como para los efectos de los cambios implementados desde la norma. Vale la pena destacar, sin embargo, que el efecto agregado de esta incertidumbre está controlado por dos aspectos metodológicos:

1. Se cuentan con mediciones y/o monitoreo en algunas de las chimeneas, los cuales han cubierto un periodo extenso de tiempo, permitiendo identificar posibles datos que se desvíen de la operación normal de las distintas fuentes.
2. Se cuenta con las estimaciones por balance de masa y, por la metodología, se busca lograr una estimación razonable de las emisiones de cada una de las fuentes emisoras, de forma que de forma agregada las emisiones sean similares a las emisiones estimadas por el balance.



**Figura 5-2 Esquema conceptual para estimación de distribución de emisiones**

Fuente: Elaboración propia

Para la **estimación de las emisiones pre-norma** se cuentan con los antecedentes levantados durante el proceso de elaboración de dicha norma. A juicio del consultor, el estudio de COPRIM (2012) corresponde al estudio sobre fundiciones locales que realiza el esfuerzo más comprehensivo por realizar una aproximación de las emisiones por proceso unitario en las fundiciones chilenas. La metodología se basa en encuestas, criterios expertos y supuestos del consultor ajustados a la realidad de las fundiciones chilenas para realizar una estimación de la distribución de las emisiones en cada una de las fuentes de emisión. Los resultados de la implementación de dicha metodología fueron validados, mediante el contraste con las emisiones de SO<sub>2</sub> declaradas por los titulares, observándose que en general tiende a subestimar las emisiones declaradas en un 8,4%. La mayor parte de la diferencia (55% del total) está asociada a la fundición Altonorte, cuyo valor de captura y fijación de S estimado fue de 90,9%, por debajo

del valor reportado por la fundición de 93,7%, el origen de las diferencias es atribuido a que en la realidad el sistema de captura de gases fugitivos, relativamente nuevo en comparación con las otras fundiciones, alcanzaría un mayor nivel de captura que el estimado.

En el estudio de COPRIM se proponen de 4 composiciones tecnológicas genéricas, que representan las composiciones tecnológicas genéricas actuales de las fundiciones (ver Tabla 5-2). Mientras que para la fracción restante propone una distribución entre los procesos unitarios la cual se presenta en las Tabla 5-3 y Tabla 5-4.

**Tabla 5-2 Capturas base pre normas propuestas por COPRIM y asignación a fundiciones**

Composición Tecnológica	Fundición	Captura Base S	Captura Base As
Secador – HF – CPS – Planta Flotación Escoria	Chuquicamata	88,5%	90,7%
Secador – CT – CPS Planta Flotación	Altonorte	89,2%	95,2%
	Potrerrillos		
	Caletones		
Secador – CT – CPS – HLE/HE	HVL	91,2%	94,0%
	Ventanas		
Secador – HF – CPS – HLE/HE	Chagres	91,8%	97,8%

Fuente: Elaboración propia en base a COPRIM (2012)

**Tabla 5-3 Distribución de las emisiones de As pre-norma según configuración tecnológica**

Fuente Emisora y/o actividad	S-CT-CPS-HLE/HE	S-CT-CPS-PFE	S-FSF-CPS-HLE/HE	S-FSF-CPS-PFE
Secado	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Fugitivo Boca Reactor	29,0%	56,4%	0,0%	0,0%
Sangría/transporte Escoria Reactor	3,2%	6,3%	8,3%	22,7%
Sangría/transporte Metal Blanco o eje	5,5%	10,6%	3,1%	8,6%
Fugitivo Boca CPS	2,4%	3,1%	4,8%	11,4%
Vacío/transporte Blíster	0,1%	0,2%	0,3%	0,9%
Vacío/transporte Escoria CPS	0,1%	0,2%	0,3%	0,5%
Chimenea HLE/HE	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Fugitivo Boca HLE/HE	35,2%	0,0%	43,4%	0,0%
Sangría/Transporte Escoria HLE/HE	12,0%	0,0%	14,7%	0,0%
Sangría/Transporte Metal Blanco HLE/HE	0,9%	0,0%	1,2%	0,0%
Transporte/enfriado/chancado escoria	0,0%	0,6%	0,0%	0,9%
Horno Anódico	11,6%	22,5%	23,8%	55,0%
Gas de Cola Planta de Ácido	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Nota: Estudio original considera despreciable las emisiones de As en chimeneas de Secador, HE/HLE y en Planta de Ácido

Fuente: Elaboración en base a (COPRIM, 2012)

**Tabla 5-4 Distribución de las emisiones de SO<sub>2</sub> pre-norma según configuración tecnológica**

Fuente Emisora y/o actividad	S-CT-CPS-HLE/HE	S-CT-CPS-PFE	S-FSF-CPS-HLE/HE	S-FSF-CPS-PFE
Secado	0,3%	0,4%	0,2%	0,5%
Fugitivo Boca Reactor	26,0%	27,9%	0,0%	0,0%
Sangría/transporte Escoria Reactor	3,0%	3,3%	1,8%	1,9%
Sangría/transporte Metal Blanco o eje	5,3%	5,7%	2,4%	2,6%
Fugitivo Boca CPS	35,3%	32,3%	54,2%	52,3%
Vacío/transporte Blíster	2,6%	2,4%	4,0%	3,9%
Vacío/transporte Escoria CPS	2,2%	2,0%	3,3%	3,3%
Chimenea HLE/HE	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Fugitivo Boca HLE/HE	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Sangría/Transporte Escoria HLE/HE	0,3%	0,0%	0,3%	0,0%
Sangría/Transporte Metal Blanco HLE/HE	1,0%	0,0%	1,0%	0,0%
Transporte/enfriado/chancado escoria	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%
Horno Anódico	1,0%	0,9%	1,5%	1,5%
Gas de Cola Planta de Ácido	23,1%	25,1%	31,2%	34,0%

Nota: Estudio original considera despreciable las emisiones de As en chimeneas HE/HLE.

Fuente: Elaboración en base a (COPRIM, 2012)

Desde la publicación del D.S. 28/2013 del MMA se han **implementado medidas tecnológicas y mejoras operativas** han permitido dar cumplimiento a las exigencias de la norma, lo cual ha implicado la modificación de algunas de los factores unitarios y, por lo tanto, de la distribución de las emisiones en las diferentes etapas. Los proyectos que han resultado en reducción de emisiones se recogieron a partir de entrevistas con los titulares, y pueden observarse en la Sección 3.2.2.

Respecto a los cambios particulares en los procesos unitarios desde la publicación del DS 28/2013 del MMA, en la Tabla 5-5 se presentan los principales supuestos realizados para la simulación del proceso con las medidas identificadas. Estos supuestos de modelación tienen efecto sobre las emisiones modeladas para cada una de las etapas, modificando de esta forma las distribuciones de las emisiones pre-norma. Cabe destacar que se proponen supuestos razonables, y que el efecto de su incertidumbre es acotado, dado que la metodología busca una aproximación razonable de la distribución de las emisiones estimadas mediante el balance de masa. Respecto a las eficiencias de captura y fijación modeladas, estas fueron supuestas de forma que los resultados estén en línea con la estimación global y su comparación con los balances de masa, considerando aspectos como la evaluación original de COPRIM, la instalación de nuevos equipos de captura y mitigación, o el recambio de los mismos.

**Tabla 5-5 Principales supuestos de modelación para modelación de emisiones post norma**

Fundición	Principales supuestos
<b>Chuquicamata</b>	<p>Gases capturados de secador pasan por filtro de mangas, con funcionamiento similar al planteado en el AP42 (US-EPA, 1995).</p> <p>Cierre de Convertidor Teniente y potenciamiento de Horno Flash.</p> <p>Recambia de campanas primarias en los CPS, para las cuales se modela una eficiencia de captura de 97%.</p> <p>Campana instaladas en la sangría de eje del Horno Flash con eficiencia de captura de 50% (COPRIM, 2012)</p> <p>Reemplazo de campanas secundarias con altos niveles de eficiencia (70%).</p> <p>Abatimiento de gases secundarios por medio de cal y filtrado con eficiencias de 40% (S) y 80% (As).</p> <p>Nuevas plantas de ácido con doble contacto y mejoramiento de tratamiento de efluentes de fundición, con emisiones estimadas a partir de muestreo y mediciones CEMS.</p>
<b>Altonorte</b>	<p>Cambio de secador rotatorio por secado por contacto indirecto, gases pasan por filtro de mangas, con funcionamiento similar al planteado en</p> <p>Reactor Noranda (RN) con campana primaria con eficiencia de captura de 99%, manteniendo estimaciones de estudio original para esta fundición (COPRIM, 2012), y en línea con las emisiones estimadas por balance de masa.</p> <p>Se asume eficiencia de 98% para campanas primarias de CPS, privilegiado por menos volteos.</p> <p>Campanas secundarias de RN y CPS (70%) con tratamiento en nuevo filtro de mangas (2020) permite abatimiento en orden de 98% (As), supuesto basado en mediciones realizadas en chimenea entre 2020 y 2021. Estimación de eficiencia de nuevo filtro de manga se basa en datos provistos por Altonorte de mediciones en chimenea principal entre 2020 y 2021.</p> <p>Reforming en hornos de refino para alcanzar opacidad, se supone captura de 50% de las emisiones y abatimiento del 98% del As,</p> <p>Emisiones de nuevas plantas de ácido medidas a partir de muestreos y mediciones CEMS.</p>
<b>Potrerrillos</b>	<p>Nueva campana en convertidor Teniente, con eficiencia de captura similar a la observada en Altonorte 99%.</p> <p>Nuevas campanas Boliden y torres de enfriamiento en captura de CPS, con eficiencia estimada de 97%.</p> <p>Nuevos precipitadores en el manejo de gases principales (CT, CPS PAS, Torre de enfriamiento)</p> <p>Proyecto humos negros, con enfriamiento, saturación, lavado y precipitación electrostática en hornos de refino 98% (As).</p>
<b>HVL</b>	<p>Mejoras en captura y manejo de gases primarios en CT y CPS, con eficiencia de captura de 98% y 97,5%.</p> <p>Cambio en sistema de alimentación de carga fría en CPS, se evita un 50% de los volteos en para carga. Se refleja en la eficiencia de captura de sistema primario en los CPS.</p> <p>Procesamiento de gases de horno de refino, se asume captura de 50% y abatimiento del 90% del As.</p> <p>Mejoramiento en sistemas de tratamiento de gases primario y adquisición de PTGC, con emisiones medidas a partir de muestreos y mediciones CEMS.</p>

<b>Fundición</b>	<b>Principales supuestos</b>
<b>Ventanas</b>	<p>Mejoras en la captación de secador concentrado, alcanzando funcionamiento similar al planteado en el AP-42 (US-EPA, 1995)</p> <p>Sistema mecanizado de carga fría lleva a menor número de volteos. Uso de tazas grandes y soplado independiente favorecen alta captura (97,5%) (COPRIM, 2012).</p> <p>Captación de nuevos sistemas de gases secundarios en CT (70%), así como de sangría CT (70%), CPS (70%) y HLE/HE (50%), con eficiencias según supuestos de metodología en el marco del DS165/2018 del MMA (CODELCO, 2020b).</p> <p>Tratamiento de gases secundarios CT, CPS y sangrías con lavado en seco con recirculación con hidróxido de calcio, filtro de mangas y ventilador de tiro inducido, con eficiencias de 40% para S y 95% para As.</p> <p>Sistema de eliminación de humos visibles en hornos de refino con sistema de enfriamiento de gases y filtros de mangas 90% (As).</p> <p>Tratamiento de gases de cola tras planta de ácido cuyas emisiones medidas según medición y monitoreo CEMS.</p>
<b>Chagres</b>	<p>Reemplazo de secador por secador KUMERA y filtros de mangas con mayor eficiencia de captura de MP, alcanzando funcionamiento similar al planteado en el AP-42 (US-EPA, 1995)</p> <p>Uso de sistema hermético (horno flash) para la fusión, mientras que en los CPS se asume que se mantiene la eficiencia de captura de las campanas primarias (97,5%) (COPRIM, 2012)</p> <p>Nueva planta de tratamiento de gases de HLE y de refino, se asume 50% de captura y eficiencias de abatimiento de 95% para S y As. El HLE incluye torre de enfriamiento, dos ESP húmedos en serie y un VTI, además de un filtrado de efluentes. En hornos de refino torre quench de lavado y enfriamiento y sistema ESP húmedo con VTI además de un sistema de tratamiento de efluentes.</p> <p>Emisiones de plantas de ácido con emisiones estimadas a partir de muestreos y mediciones CEMS.</p>
<b>Caletones</b>	<p>Optimización de plantas de secado, con instalación de plantas de secado Fluosólido, alcanzando funcionamiento similar al planteado en el AP-42 (US-EPA, 1995)</p> <p>Se estima una captura primaria levemente superior a la estimada por COPRIM, asociado a una optimización operativa del proceso basado en los resultados del balance de masa, CT (97,5%) y CPS (95%).</p> <p>Nueva planta de limpieza de escorias con flotación en reemplazo de los HE/HLE</p> <p>Tratamiento de gases de horno anódico para reducción de opacidad en los cuatro hornos de refino, con torre de enfriamiento evaporativa, filtros de mangas y VTI. Se asume captura de 50% y mitigación de 98% (As).</p> <p>Instalación de sistemas de tratamiento de gases de cola, uno en cada planta con sus emisiones estimadas según medición y monitoreo CEMS.</p>
<b>Planta Tostación Ministro Hales</b>	<p>Incluye enfriador, tren de gases con mitigación y planta de ácido. Sus emisiones se estiman según medición y monitoreo CEMS</p>

Nota: en las eficiencias se reporta el supuesto de modelación utilizado, basado en la aproximación de la eficiencia efectiva para alcanzar los niveles de emisión reportados.

Fuente: Elaboración propia

Otro efecto de la entrada en vigencia de la norma de emisiones es la generación de nuevos antecedentes que permiten caracterizar de mejor forma las emisiones, notablemente la medición y monitoreo de contaminantes en las chimeneas han permitido contar con mejores aproximaciones de las emisiones. De esta forma, de los procesos unitarios se cuenta con estimaciones para SO<sub>2</sub> en las chimeneas de las plantas de ácido (ver Tabla 5-6), y de As en las

mismas chimeneas, además de las chimeneas de los HE/HLE (ver Tabla 5-7). Esto reduce la incertidumbre respecto a la estimación de las emisiones.

Lo anterior se refleja tanto en la estimación de emisiones de azufre y arsénico presente en las siguientes tablas, así como la estimación del total de masa de los elementos cuyo destino no es emisión (fracción de captura y fijación), presentado en la Tabla 5-8. Considerando esta información se observa que la estimación del resto de las emisiones corresponde a una fracción menor del potencial de emisiones de las fundiciones.

**Tabla 5-6 Estimación S emitido [t/año] en chimenea de planta de ácido y fracción respecto del total de S que entra al sistema**

Fundición	Emisión S planta de ácido (t/año)	Fracción S (%)
Fundición Chuquicamata	289,4	0,15%
Fundición Altonorte	692,0	0,20%
Fundición Potrerillos	402,8	0,25%
Fundición HVL	187,1	(1) 0,19%
Fundición Ventanas	119,5	0,11%
Fundición Chagres	335,9	0,22%
Fundición Caletones	970,5	0,23%

(1) Estimación referencial, puesto que estimaciones de balance de masa no fueron estimadas con metodología aprobada.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-7 As emitido [t/año] en chimeneas de planta de ácido y hornos de limpieza de escorias y fracción respecto del total de As que entra al sistema**

Fundición	Emisión As planta de ácido (t/año)	Emisión As en Hornos de limpieza de escorias (t/año)	Fracción As %
Fundición Chuquicamata	0,605	-	0,01%
Fundición Altonorte	0,091	-	0,00%
Fundición Potrerillos	0,546	-	0,55%
Fundición HVL	0,032	0,075	(1) 0,02%
Fundición Ventanas	0,224	0,094	0,05%
Fundición Chagres	0,061	0,364	0,09%
Fundición Caletones	0,765	-	0,04%

(1) Estimación referencial, puesto que estimaciones de balance de masa no fueron estimadas con metodología aprobada.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-8 Fracción de captura y fijación de S y As por fundición año 2020, según balance de masa**

Fundición	S	As
Fundición Chuquicamata	97,7%	97,3%
Fundición Altonorte	98,1%	98,0%
Fundición Potrerillos	98,9%	97,7%
Fundición HVL	(1) 95,9%	(1) 95,8%
Fundición Ventanas	95,2%	95,1%
Fundición Chagres	97,0%	98,1%
Fundición Caletones	96,6%	96,6%

(1) Estimación referencial, puesto que estimaciones de balance de masa no fueron estimadas con metodología aprobada.

Nota: Fracciones incluyen contenido de los elementos en los materiales de limpieza reportados para el año 2020, la frecuencia de mantención en las fundiciones puede ser mayor a 12 meses.

Nota 2: La norma actual exige un 95% de eficiencia para ambos elementos

Fuente: Elaboración propia

Por motivos de transparencia la metodología descrita es implementada en un modelo del software Analytica, el cual es incluido en los anexos digitales de la presente entrega, para la revisión detallada de la implementación. Asimismo, los resultados son incluidos en los anexos digitales en forma de base de datos<sup>87</sup> donde se puede explorar con mayor detalle los resultados de la aproximación de emisiones para cada una de las etapas.

La estimación de las emisiones resultante de implementar la metodología se presentan en las Tabla 5-9 y Tabla 5-10, donde se observa que existen variaciones pequeñas respecto de los resultados del balance de emisión producto de las aproximaciones, sin embargo, se considera que son suficientemente pequeñas.

Se observa que en el caso del SO<sub>2</sub> las emisiones se concentran en las emisiones fugitivas de las bocas tanto de los CPS como de los Convertidores Tenientes, las cuales ocurren durante el proceso de alimentación, influenciadas por el soplado, así como por las ineficiencias de los sistemas de captura. Lo anterior coincide con lo esperado en la medida en que justamente son estos procesos los que generan la mayor cantidad de SO<sub>2</sub> producto del proceso endotérmico de oxidación del azufre contenido en los concentrados secos y en el eje que alimenta a los CPS. En las etapas posteriores, el contenido de azufre es bastante menor y sus emisiones son significativamente menores a las de estas etapas (US-EPA, 1995). Por su parte las emisiones de arsénico se concentran la mayor parte en la etapa de fusión, seguida por la refinación, lo anterior responde al proceso de volatilización del arsénico, así como al arrastre de polvo por los gases generados en los diferentes procesos (Universidad de Chile, 2010).

---

<sup>87</sup> "NormaAs-EmisionPorFuente.xlsx"

**Tabla 5-9 Estimación de emisiones de SO2 [t/año] por fuente unitaria, año 2020**

Etapa	Fuente unitaria	DCH	ALN	POT	HVL	DVE	CHG	CAL	DMH	Total
Preparación de concentrados	Planta Tostación	-	-	-	-	-	-	-	239	<b>239</b>
	Secador	331	527	253	166	180	256	629	-	<b>2.343</b>
Fusión	Fugitivo Boca Reactor	-	2.784	541	2.570	4.253	-	10.629	-	<b>20.776</b>
	Sangría/transporte Escoria Reactor	479	974	189	450	496	344	1.488	-	<b>4.421</b>
	Sangría/transporte MB o eje	503	1.698	330	784	865	452	2.593	-	<b>7.225</b>
CPS	Fugitivo Boca CPS	5.547	3.875	1.129	2.615	2.885	5.122	8.877	-	<b>30.050</b>
	Vaciado/transporte Blíster	690	724	141	385	425	753	1.105	-	<b>4.223</b>
	Vaciado/transporte Escoria CPS	582	585	114	161	354	624	893	-	<b>3.312</b>
Limpieza de escorias	Chimenea HLE/HE	-	-	-	166	180	256	-	-	<b>602</b>
	Fugitivo Boca HLE/HE	-	-	-	3	4	2	-	-	<b>9</b>
	Sangría/Transporte Escoria HLE/HE	-	-	-	39	59	65	-	-	<b>162</b>
	Sangría/Transporte MB HLE/HE	-	-	-	141	217	194	-	-	<b>552</b>
	Transporte/enfriado/chancado Escoria	30	28	5	-	-	-	43	-	<b>106</b>
Refinación	Horno Anódico	359	278	54	141	217	280	425	-	<b>1.754</b>
Tratamiento de gases	Gas de Cola Planta de ácido	579	1.385	806	374	286	672	1.941	-	<b>6.042</b>
<b>Total</b>		<b>9.099</b>	<b>12.857</b>	<b>3.562</b>	<b>7.994</b>	<b>10.420</b>	<b>9.021</b>	<b>28.624</b>	<b>239</b>	<b>81.816</b>

Nota: Las emisiones de los sistemas de gases secundarios se distribuyen en las fuentes unitarias donde se originan las emisiones. Este supuesto se realiza en vista de que no se cuenta con información suficiente para todas las fundiciones respecto de la fracción efectivamente capturada y abatidas por los sistemas de captura y mitigación.

Las emisiones de la planta de tostación son emitidas en la chimenea de su planta de ácido, se reportan como planta de tostación para reforzar el hecho de que la planta de tostación corresponde a un proceso independiente de las fundiciones.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-10 Estimación de emisiones de As [t/año] por fuente unitaria, año 2020**

Etapa	Fuente unitaria	DCH	ALN	POT	HVL	DVE	CHG	CAL	DMH	Total
<b>Preparación de concentrados</b>	Planta de tostación	-	-	-	-	-	-	-	0,0	<b>0,0</b>
<b>Fusión</b>	Fugitivo Boca Reactor	-	19,4	18,9	4,3	5,4	-	39,8	-	<b>89,8</b>
	Sangría/transporte Escoria Reactor	45,9	20,6	6,3	0,7	0,6	1,2	5,3	-	<b>67,1</b>
	Sangría/transporte MB o eje	10,5	35,0	10,7	1,2	1,0	0,4	9,0	-	<b>71,6</b>
<b>CPS</b>	Fugitivo Boca CPS	6,1	1,3	1,9	0,3	0,2	0,3	1,6	-	<b>14,9</b>
	Vaciado/transporte Blíster	0,8	0,7	0,2	0,0	0,0	0,1	0,2	-	<b>2,1</b>
	Vaciado/transporte Escoria CPS	0,4	0,7	0,2	0,0	0,0	0,1	0,2	-	<b>1,6</b>
<b>Limpieza de escorias</b>	Chimenea HLE/HE	-	-	-	0,1	0,1	0,4	-	-	<b>0,5</b>
	Fugitivo Boca HLE/HE	-	-	-	7,8	10,7	3,2	-	-	<b>21,6</b>
	Sangría/Transporte Escoria HLE/HE	-	-	-	2,7	6,6	1,1	-	-	<b>10,4</b>
	Sangría/Transporte MB HLE/HE	-	-	-	0,2	0,3	0,1	-	-	<b>0,5</b>
	Transporte/enfriado/chancado Escoria	1,8	2,1	0,6	-	-	-	0,5	-	<b>5,3</b>
<b>Refinación</b>	Fugitivo Horno Anódico	111,0	37,8	11,6	1,4	3,4	1,8	9,7	-	<b>180,7</b>
<b>Tratamiento de gases</b>	Gas de Cola Planta de ácido	0,6	0,1	0,6	0,0	0,2	0,1	0,8	-	<b>2,3</b>
<b>Total</b>		<b>177,1</b>	<b>117,6</b>	<b>50,9</b>	<b>18,6</b>	<b>28,5</b>	<b>8,6</b>	<b>67,1</b>	<b>0,0</b>	<b>468,4</b>

Nota: Las emisiones de los sistemas de gases secundarios se distribuyen en las fuentes unitarias donde se originan las emisiones. Este supuesto se realiza en vista de que no se cuenta con información suficiente para todas las fundiciones respecto de la fracción efectivamente capturada y abatidas por los sistemas de captura y mitigación.

Las emisiones de la planta de tostación son emitidas en la chimenea de su planta de ácido, se reportan como planta de tostación para reforzar el hecho de que la planta de tostación corresponde a un proceso independiente de las fundiciones.

Fuente: Elaboración propia

La relación entre el nivel de procesamiento y las emisiones guarda relación con una multiplicidad cómo la tecnología de cada una de las etapas, el encadenamiento de ellas, la composición química de los concentrados, calcinas y carga fría, los sistemas de captura y abatimiento, entre otros. Dado la complejidad anterior, se propone que la mejor aproximación corresponde a la condición media durante el año 2020, entendida como el promedio de emisiones por unidad de actividad<sup>88</sup>. Las emisiones estimadas por proceso unitario son las que se presentaron en las tablas anteriores, mientras que la mejor aproximación del nivel de actividad se considera que es la cantidad de concentrado de cobre procesado en cada una de las fundiciones. Si bien una alternativa era considerar la cantidad de cobre producido, la posible variación de la ley de cobre y el aumento de la proporción de azufre en los concentrados resultan en que las estimaciones sean menos robustas que considerar el nivel de concentrado procesado. También se consideró como opción considerar el material procesado en cada una de las etapas, es decir, la cantidad de concentrado en el caso del secador, concentrado seco en el caso de los hornos de fusión, el metal blanco o eje en el caso de los CPS, entre otros, sin embargo, más allá de la complejidad de estimar la cantidad para cada uno de ellos, este enfoque dificulta la comparación entre las diferentes etapas.

En base a lo anterior se estima la relación para cada una de las fuentes unitarias, estimación que puede ser revisada con detalle en los anexos digitales<sup>89</sup>. A modo de resumen en la Tabla 5-11 y Tabla 5-12 se presentan las relaciones agregadas por etapa para cada una de las etapas para SO<sub>2</sub> y As, respectivamente.

Se observa que para el SO<sub>2</sub>, todas las fundiciones tienen la misma relación para la etapa de secado lo cual responde a que esta estimación proviene del factor de emisión recomendado en el AP42 (US-EPA, 1995). Asimismo, se observa que amplia diferencia en las emisiones en la etapa de fusión, lo cual responde a las diferencias entre las emisiones de los Hornos Flash los cuales, al ser herméticos en la captura de sus gases primarios, tienen significativamente menos emisiones de SO<sub>2</sub> en comparación con los Convertidores Tenientes.

---

<sup>88</sup> Cabe destacar que tal como se mencionó previamente, algunas de las fundiciones no operaron en una condición de *régimen* durante el 2020, debido al proceso de instalación y puesta en marcha de algunos de las intervenciones más complejas. Sin perjuicio de lo anterior, se considera que esta información era la información más confiable disponible para el equipo consultor al momento. El modelo con que se realizaron las estimaciones fue diseñado de forma de facilitar su actualización en la medida que se cuenten con nuevos antecedentes que permitan una mejor descripción de la operación típica futura.

<sup>89</sup> "NormaAs-EmisionPorFuente.xlsx"

**Tabla 5-11 Relación emisión SO<sub>2</sub>- nivel de procesamiento [g/t Concentrado] por etapa y fundición**

Etapa	DCH	ALN	POT	HVL	DVE	CHG	CAL	DMH
Preparación de concentrados	500	500	500	500	500	500	500	2.376
Fusión	1.482	5.180	2.097	11.475	15.564	1.553	11.685	-
CPS	10.293	4.921	2.736	9.537	10.160	12.678	8.639	-
Limpieza de escorias	45	26	11	1.051	1.275	1.008	34	-
Refinación	542	264	107	426	600	546	338	-
Tratamiento de gases	874	1.314	1.593	1.129	792	1.310	1.542	-

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las relaciones de Arsénico se observa que la fundición Chuquicamata consistentemente tiene mayores emisiones. Al respecto es relevante destacar que los concentrados procesados en esta fundición cuentan con un alto nivel de arsénico lo cual se refleja en relaciones mayores. La excepción ocurre en la etapa de limpieza de escoria, donde al no contar con HE/HLE, tienen emisiones significativamente menores que las fundiciones donde sí se encuentran esta tecnología.

**Tabla 5-12 Relación emisión As- nivel de procesamiento [g/t Concentrado] por etapa y fundición**

Etapa	DCH	ALN	POT	HVL	DVE	CHG	CAL	DMH
Preparación de concentrados	-	-	-	-	-	-	-	0,2
Fusión	85,1	71,2	71,1	18,7	19,3	3,2	43,0	-
CPS	11,0	2,5	4,4	0,9	0,7	0,8	1,5	-
Limpieza de escorias	2,8	2,0	1,3	32,2	49,0	9,3	0,4	-
Refinación	167,6	35,9	22,9	4,3	9,3	3,5	7,7	-
Tratamiento de gases	0,9	0,1	1,1	0,1	0,6	0,1	0,6	-

Fuente: Elaboración propia

Si bien el foco de la relación emisión –nivel de procesamiento se ha enfocado en las emisiones de arsénico y de SO<sub>2</sub>, en la operación de la fundición se emiten otros contaminantes, tales como material particulado en sus diferentes fracciones y metales contenidos en el material particulado. Si bien se cuentan con antecedentes para la estimación de estos contaminantes basados en estudios internacionales que permiten la derivación de factores de emisión genéricos (ver Sección 3.2.4.3), a nivel nacional no se cuenta con información suficiente para realizar una estimación más detallada. La excepción de esto proviene de la información que se ha entregado en vista de los requerimientos de reporte establecidos en la Norma de Emisión, así como antecedentes específicos como los derivados del DS165/2018 del MMA para la fundición Ventanas.

En particular se cuenta con información de Material Particulado tanto en el proceso unitario de secado, como del emitido por las chimeneas de los HLE/HE. De la misma forma se cuenta con mediciones de mercurio para las chimeneas de las plantas de ácido. Las relaciones emisión concentración que se desprenden de dicha información se presentan en las siguientes tablas.

**Tabla 5-13 Relación emisión MP- nivel de procesamiento [g/t Concentrado] por etapa y fundición**

Fundición	Secado	Chimenea HLE/HE
Fundición Chuquicamata	8,3	-
Fundición Altonorte	1,7	-
Fundición Potrerillos	33,7	-
Fundición HVL	19,9	35,6
Fundición Ventanas	13,2	7,7
Fundición Chagres	1,6	7,1
Fundición Caletones	22,6	-

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-14 Relación emisión Hg- nivel de procesamiento [mg/t Concentrado] por etapa y fundición**

Fundición	Gas de Cola Planta de Ácido
Fundición Chuquicamata	2,0
Fundición Altonorte	12,9
Fundición Potrerillos	2,7
Fundición HVL	19,5
Fundición Ventanas	2,5
Fundición Chagres	55,8
Fundición Caletones	0,6

Nota: Notar que, a diferencia de otros contaminantes, se presenta la relación en miligramos de contaminante emitido por tonelada de concentrado procesada

Fuente: Elaboración propia

La estimación del material particulado fugitivo que se produce en los distintos procesos *batch* de la operación normal de las fundiciones, es especialmente complejo de estimar por la falta de metodologías que permitan una estimación certera. Aun así la estimación de la US-EPA presentada en el AP-42 (1995) sirve de referencia para tener un orden de magnitud de las emisiones fugitivas.

Al comparar los valores de las emisiones de los secadores y HLE/HE entre la Tabla 5-13 y Tabla 5-15, se observa que aun considerando una eficiencia de 99% en el filtrado<sup>90</sup>, los valores de la EPA están por sobre los medidos a nivel local. Lo anterior, remarca la relevancia de tomar con precaución los resultados que puedan obtenerse de utilizar los factores de emisión.

<sup>90</sup> En cuyo caso los valores serían de 50 gr de MP/t Concentrado para el MP y de 100 gr de MP/t concentrado para el caso de los hornos de escoria.

**Tabla 5-15 Relación emisión MP- nivel de procesamiento [mg/t Concentrado] por etapa**

Proceso unitario	Factor de emisión [kg MP/t Concentrado]
Tostación	22
Secador	5
Fusión	70
Convertidor	18
HLE/HE	10
Fugitivas tostador	2,6
Fugitivas fusión	0,2
Fugitivas convertidor	2,2
Fugitivas HLE/HE	4
Fugitivas Hornos Anódicos	0,25

Fuente: AP-42 (US-EPA, 1995)

## 5.2 Estimación de potencial de reducción

El potencial de reducción se define como la diferencia de emisiones entre el escenario contrafactual (o línea base), que en este caso se considera la operación 2020, con un escenario de implementación de una medida o un paquete de medidas de control de emisiones. En la presente sección se presenta la estimación del potencial de reducciones para medidas implementadas de forma independiente<sup>91</sup>, con el objetivo de dimensionar la magnitud de las reducciones potenciales.

Dado lo recién expuesto, los resultados del potencial de reducción van a ser sensibles a los supuestos que caracterizan tanto la situación base como los supuestos de la situación con cada una de las medidas implementadas. Respecto al primer conjunto de supuestos, en la Sección 5.1 se presenta una estimación de las emisiones para cada una de las fuentes unitarias de cada una de las fundiciones, a la cual se llega a partir de una distribución que considera la composición tecnológica, las tecnologías de abatimiento y características de los concentrados de las fundiciones chilenas<sup>92</sup>. Por otro lado, el principal supuesto respecto a la situación con la medida de implementación corresponde a la eficiencia esperada de la aplicación de cada una de las medidas. Esta eficiencia se estima a partir de lo presentado en Sección 4.3 donde se recopila información desde diferentes fuentes. Cabe destacar, que la configuración y características propias de cada uno de los procesos unitarios de las fundiciones pueden hacer que en el caso de implementarse las medidas su eficiencia real sea diferente, pudiendo ser menor o incluso mayor. Ante esto se privilegió el uso de estimaciones de eficiencias basadas en experiencias reales y, en su defecto, eficiencias teóricas.

Otro aspecto a considerar es que los resultados del ejercicio de estimación del potencial de reducción no son necesariamente aditivos, en la medida en que pueden existir sinergias entre las

<sup>91</sup> Considerando, cuando sea necesario sistemas de capturas para las medidas que lo requieran.

<sup>92</sup> Es posible que esta estimación mejoré en la medida que se recojan nuevos antecedentes desde las fundiciones, por ende, los resultados de esa Sección también pueden cambiar.

diferentes medidas. Por ejemplo, la implementación de una planta de tostación, resulta en una reducción del arsénico que entra en el sistema, por lo tanto, medidas que se modelen en etapas posteriores tendrán menores reducciones potenciales en caso de implementarse. De la misma forma hay medidas que no son complementarias, sino que son excluyentes en la medida que son o una o la otra. El caso más ilustrativo corresponde a las tecnologías de planta de ácido de contacto simple o de doble contacto, donde se instala una de las dos tecnologías.

A nivel de modelación, se utilizaron las medidas presentadas y descritas en la Sección 4.3: planta de tostación, captura secundaria en boca del reactor, captura y fijación de sangrado del reactor, captura en techo del reactor, captura en techo del reactor y filtro de mangas, campana y tratamiento de gases secundarios CPS, captura terciaria en CPS, sistema de alimentación carga fría en CPS, precipitador electrostático húmedo en hornos anódicos, captura y tratamiento en hornos de escorias, flotación de escorias y Planta de Tratamiento de Gases de Cola (PTGC). Otras alternativas fueron descartadas pues tienen menores niveles de eficiencia teórica, como nuevos *scrubbers* y precipitadores electrostáticos en comparación con filtros de mangas, o la tecnología ya está implementada en las fundiciones, como las plantas de ácido de doble contacto<sup>93</sup>.

Una vez seleccionadas las medidas se realizó el análisis de cuales medidas pueden ser implementadas en cada una de las fundiciones. Para ello se consideró la configuración actual de las fundiciones (ver Sección 3.2.1), así como sus actuales sistemas de abatimiento los cuales fueron identificados durante las entrevistas con los titulares y revisión de sus RCA aprobados. Se consideró que una medida podía implementarse en una fundición si es que su eficiencia teórica era superior que la estimación de su actual eficiencia de captura y abatimiento.

---

<sup>93</sup> Si bien HVL no cuenta con esta tecnología, la concentración promedio de SO<sub>2</sub> en su chimenea de salida de su PTGC durante el 2020 alcanzó poco más de 100 ppm, un nivel comparable con los obtenidos en las fundiciones que sí cuentan con esta tecnología.

Tabla 5-16 Medida de mitigación modelada en cada fundición

Medida de mitigación	DCH	ALN	POT	HVL	DVE	CHG	CAL
Planta tostación	0	1	1	1	1	1	1
Captura secundaria en boca del reactor	0	0	1	1	1	0	1
Captura y fijación sangrado del reactor	1	1	1	1	1	1	1
Captura en techo del reactor	1	1	1	1	1	1	1
Captura en techo del reactor y filtro de manga	1	1	1	1	1	1	1
Campana y tratamiento de gases secundarios CPS	0	0	1	1	1	1	1
Captura terciaria en CPS	1	1	1	1	1	1	1
Sistema alimentación carga fría CPS	1	1	1	0	1	1	1
ESP húmedo en hornos anódicos	1	1	1	1	1	1	1
Captura y tratamiento en hornos de escorias	0	0	0	1	1	1	0
Flotación de escorias	0	0	0	1	1	1	0
PTGC (1)	0	0	0	0	0	0	1

- (1) Si bien, podría implementarse en otras fundiciones, salvo Caletones todas tienen concentraciones de SO<sub>2</sub> promedio en su chimenea de salida bajo 200 ppm durante el 2020, por lo que el efecto de la PTGC sería marginal.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-17 Supuestos de eficiencias de mitigación consideradas para estimación de potencial

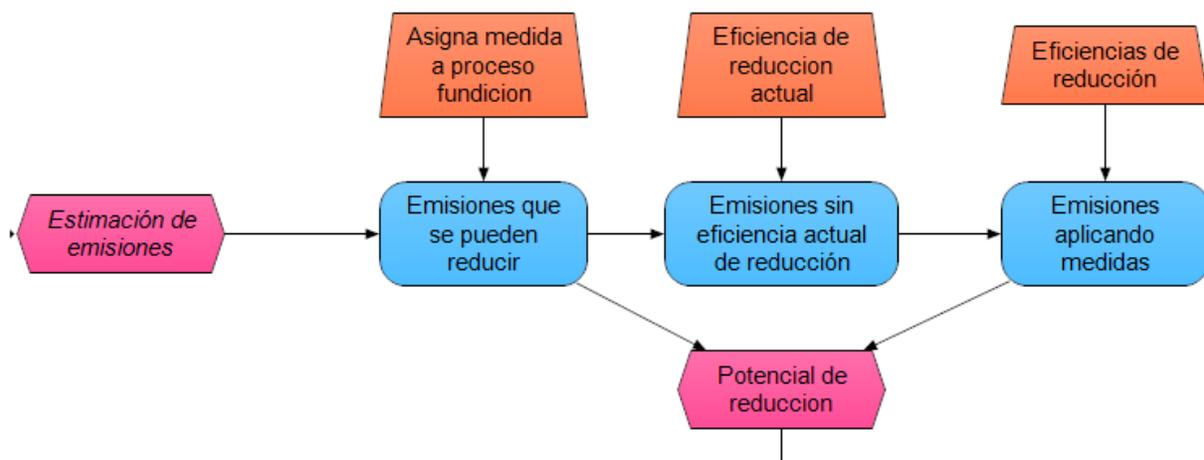
Medida de mitigación	Eficiencia mitigación As	Eficiencia mitigación SO <sub>2</sub>	Proceso unitarios afectados
Planta tostación	10,6%	1,6%	Todos menos secador
Captura secundaria en boca del reactor	CP + (1-CP)x28%	CP + (1-CP)x66,5%	Fugitivos boca reactor
Captura y fijación sangrado del reactor	28%	66,5%	Sangría MB o eje/ sangría Escoria reactor
Captura en techo del reactor	80%	0%	Fugitivos boca reactor y Sangría MB o eje/ sangría Escoria reactor
Captura en techo del reactor y filtro de manga	90%	0%	Fugitivos boca reactor y Sangría MB o eje/ sangría Escoria reactor
Campana y tratamiento de gases secundarios CPS	CP + (1-CP)x28%	CP + (1-CP)x66,5%	Fugitivos boca CPS
Captura terciaria en CPS	CP + (1-CP)x36%	CP + (1-CP)x85,5%	Fugitivos boca CPS
Sistema alimentación carga fría CPS	10% de las fugitivas	10% de las fugitivas	Fugitivos boca CPS
ESP húmedo en hornos anódicos	47,5%	0%	Hornos Refinación
Captura y tratamiento en hornos de escorias	47,%	20%	HLE/HE
Flotación de escorias	95%	90%	HLE/HE
PTGC (1)	0%	45%	Chimenea Planta ácido

Fuente: Elaboración propia

Una vez identificado qué medidas pueden implementarse en cada fundición, se identifica cuales procesos unitarios se verían afectados por ellas, identificando si dichos procesos ya cuentan con algún sistema de abatimiento. En el caso de que cuenten con algún sistema con una eficiencia

estimada menor a la eficiencia de abatimiento teórica, la modelación asume que se reemplaza la medida actualmente instalada por una nueva medida de abatimiento con una eficiencia de abatimiento teórica mayor. Esto ocurre, por ejemplo, en la medida de renovación de campana principal de reactor, donde se observa que las fundiciones con Convertidores Teniente de mayor edad, en general tienen una eficiencia de captura y abatimiento menor que si se instalara una nueva campana principal de captura. Para evitar doble contar reducciones, la eficiencia de reducción se aplica sobre una situación teórica en que las etapas no cuentan con eficiencia de reducción.

Por transparencia y para facilitar su revisión, la modelación de cada una de las medidas es entregada en los anexos digitales del presente informe en un modelo en Analytica (ver Figura 5-3), mientras que los resultados se entregan en formato de BD en los anexos digitales<sup>94</sup>, los cuales presentan el detalle de las reducciones, por contaminante, fundición, medida de mitigación, fuente unitaria, tipo de fuente y etapa.



**Figura 5-3 Modulo de estimación de potencial de reducción en Analytica**

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5-18 se presentan la estimación del potencial de reducción para cada medida, observándose que las principales reducciones ocurren en medidas de mitigación que capturan o abaten emisiones fugitivas, en particular en las etapas de fundición y convertidores. Cabe destacar de que, las reducciones potenciales no son necesariamente aditivas entre todas las medidas, sino que hay algunas que compiten entre ellas, otras que requieren de la aplicación de otras medidas, entre otros. Las celdas en blanco corresponden a medidas que no son aplicables a la fundición correspondiente o que ya tienen una medida aplicada con mayor eficiencia.

<sup>94</sup> "NormaAs-ResultadosEstimacionPotencial.xlsx"

**Tabla 5-18 Potencial de reducción As [kg/año] según medida y fundición, proyectado para año 2035**

Medida de mitigación	DCH	ALN	POT	HVL	DVE	CHG	CAL	Total
<b>Planta tostación</b>		12.882	6.654	2.219	3.119	1.047	7.352	<b>33.273</b>
<b>Captura secundaria en boca del reactor</b>			16.002	3.293	347		28.217	<b>47.860</b>
<b>Captura y tratamiento sangrado reactor</b>	54.705	38.202	13.961	1.437		1.228	9.847	<b>119.381</b>
<b>Captura techo en reactor (1)</b>	70.187	61.992	35.457	5.569	5.763	1.477	44.752	<b>225.197</b>
<b>Captura techo y filtro de manga reactor(1)</b>	78.961	69.741	39.889	6.265	6.483	1.662	50.346	<b>253.347</b>
<b>Captura y tratamiento gases secundarios CPS</b>			1.600	201		266	1.129	<b>3.196</b>
<b>Captura terciaria en CPS (2)</b>	6.323	719	1.994	251	128	332	1.407	<b>11.154</b>
<b>Alimentación carga fría CPS</b>			233			39	165	<b>437</b>
<b>Captura y tratamiento hornos escoria</b>				5.663		-		<b>5.663</b>
<b>ESP húmedo en horno anódico</b>	82.126			72				<b>82.198</b>
<b>Flotación de escorias</b>				11.325	16.780	4.551		<b>32.656</b>

(3) Potencial incluye la instalación de captura secundario en boca del reactor y captura y tratamiento del sangrado del reactor

(4) Potencial incluye la captura y tratamiento de gases secundarios en CPS.

Nota: Las celdas en blanco significan que las medidas no son aplicables a la fundición correspondiente o que ya tienen una medida aplicada con mayor eficiencia

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-19 Potencial de reducción SO2 [kg/año] según medida y fundición, proyectado para año 2035**

Medida de mitigación	DCH	ALN	POT	HVL	DVE	CHG	CAL	Total
<b>Planta tostación</b>		203.942	65.247	140.946	169.334	160.456	463.009	<b>1.202.935</b>
<b>Captura secundaria en boca del reactor</b>		805.756	190.989	792.286			3.076.344	<b>4.865.375</b>
<b>Captura y tratamiento sangrado reactor</b>	287.110	773.526	183.350	380.297		255.134	1.181.316	<b>3.060.733</b>
<b>Captura y tratamiento gases secundarios CPS</b>			398.785	806.151		1.641.134	2.569.362	<b>5.415.432</b>
<b>Captura terciaria en CPS (1)</b>	959.767	1.442.073	512.724	1.036.479	331.271	2.110.029	3.303.466	<b>9.695.810</b>
<b>Alimentación carga fría CPS</b>		400.576	142.423			586.119	917.629	<b>2.046.748</b>
<b>Captura y tratamiento hornos escoria</b>				40.180		59.597		<b>99.777</b>
<b>Flotación de escorias</b>				180.811	260.052	268.187		<b>709.049</b>
<b>Planta de tratamiento de gases de cola</b>							903.099	<b>903.099</b>

Nota: Las celdas en blanco significan que las medidas no son aplicables a la fundición correspondiente o que ya tienen una medida aplicada con mayor eficiencia

Fuente: Elaboración propia

## 6. Estimación de evolución y cambios en calidad del aire, desde dictación del D.S. 28/2013 del MMA

En la presente sección se presenta la evolución de la calidad del aire en las comunas aledañas a fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico, desde el momento de dictación de la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico D.S. 28/2013 del MMA hasta la actualidad.

### 6.1 Instrumentos de gestión ambiental en comunas con fuentes emisoras de arsénico

A continuación, se presentan otros instrumentos de gestión ambiental cuyo alcance incluye las comunas con fuentes emisoras de arsénico.

En primer lugar, se identifican normas primarias de calidad ambiental (en adelante NPCA), y las normas secundarias de calidad ambiental (en adelante NSCA), en este caso con enfoque en calidad del aire. Estas normas se presentan en la siguiente Tabla 6-1. Como se aprecia, y por definición, las normas primarias de calidad ambiental tienen alcance nacional. En el periodo desde la dictación del D.S. 28/2013 del MMA, la única norma primaria de calidad del aire publicada es la NPCA para SO<sub>2</sub>, dictada en el D.S. 104/2018 del MMA y publicada el 16 de mayo de 2019<sup>95</sup>.

A diferencia de las normas de calidad primaria, la norma secundaria identificada tiene una aplicación más acotada, siendo efectiva sobre estaciones de monitoreo de calidad del aire con representatividad de recursos naturales (EMRRN)<sup>96</sup>. Se identifican resoluciones exentas en las que se declaran ciertas estaciones de monitoreo como EMRRN por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) de las regiones con fuentes emisoras de arsénico, las que se resumen en la Tabla 6-2. En estas se observa que hay estaciones cercanas a las fundiciones Ventanas, Chagres, Hernán Videla Lira, y Caletones. Sin embargo, a la fecha no se ha declarado latencia ni saturación por esta

---

<sup>95</sup> En este periodo también cambió la NPCA vigente para MP10, dado que el 16 de diciembre de 2013 se publicó una en el D.S. 20/2013 MMA, pero este fue derogado el 17 de octubre de 2015, fecha desde la que volvió a estar vigente el D.S. 59/1998 del MINSEGPRES y CONAMA. Sin embargo, estos cambios regulatorios no tuvieron incidencia en el valor de las normas primarias en sí. Una nueva norma para su reemplazo se encuentra actualmente en elaboración.

<sup>96</sup> Este término se define en la misma normativa, el D.S. 22/2010, y corresponde a una estación monitorea que a través de la medición de la concentración ambiental de SO<sub>2</sub>, representa la exposición a este contaminante de: las explotaciones silvoagropecuarias ubicadas fuera de los límites urbanos establecidos por los instrumentos de planificación territorial; los ecosistemas pertenecientes a áreas silvestres protegidas; y las especies de flora y fauna silvestre puestas bajo protección oficial mediante decreto respectivo, o clasificadas oficialmente en las categorías "insuficientemente conocidas", "en peligro de extinción", "vulnerables" o "raras", según el procedimiento establecido en el D.S. 75/2004 del MINSEGPRES; y antes de ser sometidas a este procedimiento de clasificación, especies de fauna silvestre identificadas en alguna de las categorías de conservación señaladas anteriormente, según lo establecido en el D.S. 5/1998 del MINAGRI, Reglamento de la Ley N° 19.473, sobre caza.

NSCA en el territorio nacional, de modo que no estaría asociada a planes que puedan requerir medidas por parte de las fundiciones ni otras fuentes emisoras de arsénico.

**Tabla 6-1 Normas primarias y secundarias de calidad del aire**

Tipo de instrumento	ID normativa	Fecha de publicación	Contaminante	Alcance	Estado
<b>NPCA</b>	D.S. 136/2000 del MINSEGPRES	06-ene-01	Pb	Nacional	Vigente
	D.S. 114/2002 del MINSEGPRES	06-mar-02	NO <sub>2</sub>	Nacional	Vigente
	D.S. 115/2002 del MINSEGPRES	10-sept-02	CO	Nacional	Vigente
	D.S. 112/2002 del MINSEGPRES	06-mar-03	O <sub>3</sub>	Nacional	Vigente
	D.S. 12/2010 del MMA	09-may-11	MP2,5	Nacional	Vigente
	D.S. 59/1998 del MINSEGPRES y CONAMA	25-may-98	MP10	Nacional	Vigente desde 17-oct-2015 <sup>(*)</sup>
	D.S. 104/2018 del MMA	16-may-19	SO <sub>2</sub>	Nacional	Vigente
<b>NSCA</b>	D.S. 22/2010 del MINSEGPRES	16-abr-10	SO <sub>2</sub>	Estaciones monitoras con representatividad de recursos naturales (EMRRN)	Vigente

(\*) También estuvo vigente desde 25-may-98 hasta el 16-dic-13, fecha en que se publicó el D.S. 20/2013 del MMA, que posteriormente fue derogado.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-2 Estaciones declaradas EMRRN en comunas con fuentes emisoras de As**

ID normativa	Fecha de publicación	Estaciones declaradas EMRRN cercanas a fundición	Fundición cercana
RE 2030/2011 del SAG de la región de Valparaíso	03-mar-11	Quintero Centro	Ventanas
RE 2031/2011 del SAG de la región de Valparaíso	03-mar-11	Lo Campo	Chagres
RE 2033/2011 del SAG de la región de Valparaíso	03-mar-11	Colmo, Concón, Junta de Vecinos, Las Gaviotas	Ventanas
RE 2040/2011 del SAG de la región de Valparaíso	03-mar-11	Puchuncaví, La Greda, Sur, Quintero, Los Maitenes, Valle Alegre	Ventanas
RE 523/2011 del SAG de la región de Atacama	12-may-11	Tierra Amarilla	Hernán Videla Lira
RE 986/2011 del SAG de la región de Antofagasta	29-dic-2011	Oasis, Chiu-Chiu <sup>1</sup>	Chuquicamata
RE 2170/2013 del SAG de la región de Valparaíso	19-mar-13	Quintero	Ventanas
S/I	S/I	Cauquenes, Cipreses	Caletones

S/I: no se identifica la RE asociada, sin embargo, en los informes de monitoreo se indica que ambas estaciones se enmarcan al cumplimiento de esta NSCA.

1. Esta estación dejó de estar activa en el año 2019

Fuente: Elaboración propia

En el caso de las normas primarias identificadas, hay múltiples localidades a lo largo del país que se han declarado latentes o saturadas en uno o varios de los contaminantes normados, lo que da origen a Planes de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica. Es por medio de estos planes que se toman medidas concretas para abordar la contaminación en las zonas declaradas latentes o saturadas según las normas primarias y secundarias de calidad del aire. En la siguiente Tabla 6-3 se presentan las zonas declaradas latentes o saturadas en comunas con fuentes emisoras de arsénico. Se destaca que en el periodo de 1992 a 1994, las zonas que incluyen la fundición Chuquicamata, Ventanas y Caletones ya se habían declarado saturadas por MP10 y SO<sub>2</sub>, y también la fundición Hernán Videla Lira por SO<sub>2</sub>. Mientras que en 1992 se declara latente por SO<sub>2</sub> la localidad de Chagres. Posteriormente, en 1997 se une a este listado la fundición Potrerillos, también declarada zona saturada por MP10 y SO<sub>2</sub>.

En 2005 se declara zona latente por SO<sub>2</sub> a Chuquicamata y deja sin efecto la zona saturada por dicho contaminante, lo que ocurre posteriormente a la implementación de su Plan de Descontaminación Atmosférica de 1993 y su actualización de 2001 (ver Tabla 6-4). Luego, en 2009, se declara zona saturada por MP10 la ciudad de Calama y su área circundante. El mismo año también se declara saturado por MP10 el valle central de la región de O'Higgins, que incluye parcialmente la comuna de Machalí, sin embargo, la fundición Caletones se encuentra fuera del área saturada.

En 2015, se declara zona saturada por MP2,5 anual y latencia por MP2,5 diario y además por MP10 anual las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví. En 2018 se declara zona saturada el

valle central de la región de O'Higgins por MP2,5 diario y anual, pero en este caso nuevamente la fundición Caletones se encuentra fuera del área declarada saturada.

En 2019 por primera vez se declara saturada la zona de la fundición Chagres, por MP10 anual, y también se declara latente por MP10 en su nivel diario. Lo que se complementa en 2021 con la declaración de latencia por el contaminante SO<sub>2</sub> en los niveles diario y anual. El mismo año 2021 también es declarada saturada por material particulado respirable MP10, en su nivel diario y anual, la zona de Copiapó y Tierra Amarilla.

Cabe destacar que no se identifican declaraciones de latencia ni saturación para la fundición Altonorte ni su zona circundante.

**Tabla 6-3 Zonas declaradas saturada o latentes por contaminación atmosférica en zonas con fuentes emisoras de As**

ID normativa	Fecha publicación	Estado de declaración (Saturado y/o Latente) y su contaminante.	Alcance declaración	Región	Fundición en comuna declarada
<b>D.S. 181/1991 de Minería</b>	16-ene-92	Saturada (MP10 y SO <sub>2</sub> en campamento de la División Chuquicamata de Codelco Chile <sup>(1)</sup> y Latente (SO <sub>2</sub> en localidad de Chagres)	Campamento de la División Chuquicamata de Codelco Chile; localidad de Chagres (y región Metropolitana)	Antofagasta (y Metropolitana)	Chuquicamata y Chagres
<b>D.S. 255/1993 del MINSAGRI</b>	18-dic-93	Saturada (SO <sub>2</sub> )	Zona circundante a la Fundición Hernán Videla Lira	Atacama	Hernán Videla Lira
<b>D.S. 346/1994 del MINSAGRI</b>	03-feb-94	Saturada (MP10 y SO <sub>2</sub> )	Área circundante al Complejo Industrial Ventanas	Valparaíso	Ventanas
<b>D.S. 179/1994 del MINSEGPRES</b>	16-nov-94	Saturada (MP10 y SO <sub>2</sub> )	Zona circundante a la Fundición de Caletones, de la División El Teniente, de Codelco Chile	O'Higgins	Caletones
<b>D.S. 18/1997 del MINSEGPRES y la CONAMA</b>	16-abr-97	Saturada (MP10 y SO <sub>2</sub> )	Zona circundante a la Fundición de Potrerillos, de la División El Salvador de Codelco Chile	Atacama	Potrerillos
<b>D.S. 55/2005 del MINSEGPRES</b>	25-ago-05	Latente (SO <sub>2</sub> diario)	Zona circundante a la Fundición Chuquicamata de la División Chuquicamata de Codelco Chile	Antofagasta	Chuquicamata
<b>D.S. 07/2009 del MINSEGPRES</b>	27-mar-09	Saturada (MP10 diario y anual)	Valle Central de la región de O'Higgins	O'Higgins	Caletones <sup>(3)</sup>
<b>D.S. 57/2009 del MINSEGPRES</b>	30-may-09	Saturada (MP10 anual)	Ciudad de Calama y su área circundante	Antofagasta	Chuquicamata
<b>D.S. 10/2015 del MMA</b>	09-jun-15	Saturada (MP2,5 anual) y Latente (MP2,5 diario, MP10 anual)	Comunas Concón, Quintero y Puchuncaví	Valparaíso	Ventanas
<b>D.S. 42/2017 del MMA</b>	30-may-18	Saturada (MP2,5 diario y anual)	Valle Central de la región de O'Higgins	O'Higgins	Caletones <sup>(3)</sup>
<b>D.S. 107/2018 del MMA</b>	11-jun-19	Saturada (MP10 anual) y Latente (MP10 diario)	Provincia de Quillota y las comunas de Catemu, Panquehue y Llaylay	Valparaíso	Chagres
<b>D.S. 11/2021 del MMA</b>	22-sept-21	Latente (SO <sub>2</sub> diario y anual)	Comuna de Catemu	Valparaíso	Chagres
<b>D.S. 15/2021 del MMA</b>	18-oct-21	Saturada (MP10 diario y anual)	Zona de Copiapó y Tierra Amarilla	Atacama	Hernán Videla Lira

(1) Declaración de saturación por SO<sub>2</sub> en la División Chuquicamata de Codelco Chile se deroga con el D.S. 55/2005 del MINSEGPRES, en que se declara latencia por SO<sub>2</sub> diario.

(2) En el mismo decreto también se declara saturación por MP en la región Metropolitana.

(3) Si bien Caletones se encuentra en una comuna afecta a la declaración, la delimitación de la zona saturada no incluye la ubicación de la fundición.

Fuente: Elaboración propia

Las declaraciones de latencia y saturación por calidad del aire dan origen a la elaboración de planes de prevención y de descontaminación, cuyo objetivo es recuperar los niveles de calidad ambiental. En la siguiente Tabla 6-4 se resumen los planes vigentes en las comunas con fuentes emisoras de arsénico. En esta se destacan tres planes específicos para fundiciones, que no han sido actualizados a la fecha: para Hernán Videla Lira desde 1995, para Caletones desde 1998 y para Potrerillos desde 1999. En estos planes se establecen límites de emisión anuales para MP10 y SO<sub>2</sub>, y en Hernán Videla Lira se regula también la emisión de As.

Adicionalmente, se identifica el PDA (D.S. 15/2013 del MMA) para el valle central de la región del Libertador General Bernardo O'Higgins, que abarca parcialmente la comuna de Machalí en la que se encuentra la función Caletones, sin embargo, su alcance no incluye dicha fundición.

Junto con lo anterior se cuenta con dos planes asociados a la división Chuquicamata de Codelco Chile, y su actualización específica para la zona circundante a la Fundición Chuquicamata. En el PDA de 1993 se regula la emisión de MP10, SO<sub>2</sub> y As, mientras que en su actualización del 2001 solo se norma la emisión de MP10 y SO<sub>2</sub>.

También se identifican planes que incluyen a la fundición Ventanas en su alcance, a saber, el PDA del Complejo Industrial Ventanas, de 1993, y el PPDA para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví, que deroga al indicado previamente desde el 30 de marzo de 2019. En ambos planes se establecen límites de emisión anuales para MP10 y azufre, los que, en el caso del plan de Concón, Quintero y Puchuncaví corresponden a límites establecidos específicamente para la División Ventanas de Codelco Chile, que deberán cumplirse desde el 30 de marzo de 2022, es decir, al cumplirse tres años desde su publicación.

Para la fundición Chagres, no se identifican planes de prevención y/o descontaminación, pero sí cabe mencionar que en el D.S. 4/1985 del MINAGRI se determina que la Compañía Minera La Disputada de Las Condes S.A. deberá adoptar todas las medidas operacionales necesarias para limitar la concentración de SO<sub>2</sub> en el área circundante a la fundición. Este decreto se deroga el 5 de junio de 1991, con el D.S. 28/1991 del MINAGRI, que a su vez se deroga en 1992 con el D.S. 185/1991 del Ministerio de Minería, que reglamenta el funcionamiento de establecimientos emisores de SO<sub>2</sub>, MP10 y As en todo el territorio de la república.

Mientras que en el caso de la fundición Altonorte, no se identifican planes de prevención y/o descontaminación para su zona específica.

De esta revisión se concluye que los planes prevención y descontaminación atmosférica identificados en las zonas circundantes a fundiciones no se han visto modificados desde la implementación del D.S. 28/2013 del MMA, siendo la excepción el PPDA para las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví, cuyas medidas deberán cumplirse desde el 30 de marzo de 2022. De este modo, en el periodo de análisis hasta el año 2021 inclusive no se han incorporado nuevos PPDA o actualizado los planes existentes por las fundiciones en estudio.

**Tabla 6-4 Planes de prevención y descontaminación atmosférica aprobados en comunas con fuentes emisoras de arsénico**

Nombre	ID normativa	Fecha de publicación	Contaminantes	Alcance	Detalle	Contaminantes específicos fundición	Fundición afectada
<b>PDA del Complejo Industrial Las Ventanas</b>	D.S. 252/1992 de Minería (derogado) <sup>97</sup>	02-mar-93	MP10, SO <sub>2</sub>	Complejo Industrial Las Ventanas	(Artículo 2 y 3) La Fundición y Refinería Las Ventanas de ENAMI deberá cumplir las normas de calidad de aire de SO <sub>2</sub> , a más tardar el 30 de junio de 1999, y la norma de MP10 respirable vigente en la zona circundante al Complejo Industrial Ventanas, a más tardar, el 1° de enero de 1995. Define normas de emisión anuales de MP10 y SO <sub>2</sub> desde 1993 a 1999. (Artículo 9) La Fundición y Refinería Las Ventanas de ENAMI deberá limitar el contenido de As en el concentrado que procesa con el objeto de cumplir con lo establecido en el Artículo 5°, y en el Artículo 8° transitorio del Decreto Supremo N° 185, de 1991, del Ministerio de Minería, y en el Artículo 7° del mismo Decreto Supremo, si corresponde.	MP10, SO <sub>2</sub>	Ventanas
<b>PDA de la División Chuquicamata de Codelco Chile</b>	D.S. 132/1993 de Minería (actualizado) <sup>98</sup>	09-jul-1993	MP10, SO <sub>2</sub> , As	División Chuquicamata de Codelco	(Artículo 5) Límites de emisión anuales y mensuales, por año desde 1993 hasta 1998. En el caso de la emisión mensual de arsénico, se considerará aceptable que la emisión de un mes cualquiera exceda hasta un 40% los límites mensuales indicados en el cronograma. No define meta de arsénico desde 1996 a 1998.	MP10, SO <sub>2</sub> , As	Chuquicamata
<b>PDA de la Fundición Hernán Videla Lira de ENAMI</b>	D.S. 180/1995 del MINSEGPRES	09-ene-95	MP10, SO <sub>2</sub> , As	Zona circundante a la Fundición Hernán Videla Lira de ENAMI	(Artículos 3 y 4) Límites de emisión anuales para MP10 y As, y mensuales SO <sub>2</sub> y As, desde 1995 a 2000. Como medidas a implementar se encuentran: a) Elaboración de un Plan de Acción Operacional, incluyendo un sistema de control de eventos críticos (Art. 5) b) Elaboración de informes sobre las emisiones de azufre, arsénico y MP (Art. 6) c) Instalación de un sistema de medición de MPS (Art. 7)	MP10, SO <sub>2</sub> , As	Hernán Videla Lira

<sup>97</sup> Derogado el 31 de octubre de 2018, con la aprobación del anteproyecto del PPDA para las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví.

<sup>98</sup> El 4 de octubre de 2001 se deja sin efecto lo que se oponga a lo indicado en el D.S. 206/2000 del MINSEGPRES, en el que se establece un nuevo PDA para la zona circundante a la Fundición Chuquicamata de la División Chuquicamata de Codelco Chile.

Nombre	ID normativa	Fecha de publicación	Contaminantes	Alcance	Detalle	Contaminantes específicos fundición	Fundición afecta
<b>PDA para el área circundante a la Fundición de Caletones de la División El Teniente de Codelco Chile</b>	D.S. 81/1998 del MINSEGPRES y la CONAMA	03-jun-98	MP10, SO <sub>2</sub>	Zona circundante a la Fundición Caletones de Codelco	(Sexto) La Fundición de Caletones de la División El Teniente de Codelco Chile deberá cumplir con la reducción de emisiones según los plazos señalados en el cronograma entre los años 1998 y 2003. (Séptimo) Límites de emisión anuales desde 1998, y también mensuales para SO <sub>2</sub> . Desde 2002 para MP10, y desde 2003 para SO <sub>2</sub> , el límite de emisión es equivalente al Cumplimiento de Norma de Calidad Ambiental según corresponda. Se aceptará una <b>excedencia máxima de un 10%</b> del valor mensual establecido en este cronograma sólo para los meses comprendidos <b>entre julio y febrero, inclusive</b> . En los meses de marzo, abril, mayo y junio, la Fundición de Caletones no podrá exceder, en ninguna circunstancia, los valores límites mensuales establecidos en dicho cronograma. Si dentro de un año calendario no se produjeren episodios críticos de aquellos definidos en el artículo siguiente, durante el año posterior se aceptar una excedencia máxima del 10% del valor mensual establecido en el cronograma.	MP10, SO <sub>2</sub>	Caletones
<b>PDA para la zona Circundante a la Fundición de Potrerillos de la División Salvador Codelco Chile</b>	D.S. 179/1999 del MINSEGPRES y la CONAMA	14-jun-99	MP10, SO <sub>2</sub>	Zona circundante a la Fundición Potrerillos de Codelco	(Sexto) Límites de emisión anuales para 1999, desde 2000 y desde 2003. Desde 2003 deberá dar cumplimiento de las normas primarias de calidad de aire. Sin perjuicio de lo anterior, la División Salvador de CODELCO Chile no podrá emitir una cantidad superior a <b>100.000 t/año de anhídrido sulfuroso y 5.500 t/año de material particulado total</b> .	MP10, SO <sub>2</sub>	Potrerillos
<b>PDA para la zona circundante a la Fundición Chuquicamata de la División Chuquicamata de Codelco Chile</b>	D.S. 206/2000 del MINSEGPRES	04-ene-2001	MP10, SO <sub>2</sub>	Zona circundante a la Fundición Chuquicamata de la División Chuquicamata de Codelco Chile	(Artículo 7) Límites de emisión anual de SO <sub>2</sub> para 2001, 2002 y desde 2003, y fijo para MP10. (Artículo 8) Medidas mínimas para reducir emisiones de MP: a) Operar en forma restringida, según régimen de vientos, botaderos b) Mantener uso de carpetas o asperjado en caminos del área de mina y en caminos secundarios de tierra. c) Implementar la captación de gases fugitivos provenientes de las placas de sangría, canaletas, de las ollas receptoras de eje y las ollas receptoras de escoria del horno Flash. Todas las medidas exigidas en el artículo 8 fueron adoptadas de acuerdo a visitas de inspección realizadas por el Servicio de Salud de Antofagasta	MP10, SO <sub>2</sub>	Chuquicamata

Nombre	ID normativa	Fecha de publicación	Contaminantes	Alcance	Detalle	Contaminantes específicos fundición	Fundición afecta
<b>PDA valle central de la región del Libertador General Bernardo O'Higgins</b>	D.S. 15/2013 del MMA	05-ago-13	MP10	Valle central de la región del Libertador General Bernardo O'Higgins	No aplica a la fundición Caletones.	Ninguno	Ninguna
<b>PPDA para las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví</b>	D.S. 105/2019 del MMA	30-mar-19	MP, MP10, MP2,5, SO, NOx	Comunas Concón, Quintero y Puchuncaví	(Artículo 10) En el plazo de <b>3 años</b> contado desde la publicación del presente decreto, el <b>límite de emisión de MP10 para Codelco División Ventanas será de 89 t/año</b> y para <b>SO<sub>2</sub> será de 9.523 t/año</b> . Las emisiones máximas permitidas de MP10 son aquellas establecidas en el D.S. 252/1992, del Ministerio de Minería, que aprueba el Plan de Descontaminación del Complejo Industrial Las Ventanas. Por su parte, las emisiones máximas permitidas de SO <sub>2</sub> son aquellas establecidas en el D.S. 28/2013 del MMA. (Artículo 11) Para verificar el cumplimiento, Codelco División Ventanas deberá elaborar un informe anual sobre el cumplimiento de los límites de emisión de MP. A partir de la revisión de fiscalizaciones, se observa que la fundición ha implementado las medidas para reducir las emisiones en forma inmediata en períodos de mala ventilación o derivados de otros eventos de emanaciones de contaminantes (definidas en el Artículo 46)	MP10, SO (*)	Ventanas

(\*) Contaminantes específicos para Codelco División Ventanas

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente Tabla 6-5 se resumen los principales hitos regulatorios identificados en las zonas circundantes de las fuentes emisoras de arsénico en estudio.

**Tabla 6-5 Resumen principales hitos regulatorios con efectos en fuentes emisoras de arsénico, cronológicamente**

Chuquicamata, fundición y planta de tostación	Altonorte, fundición	Potrerillos, fundición	Hernán Videla Lira, fundición	Ventanas, fundición	Chagres, fundición	Caletones, fundición
Ene, 1992 – Declara zona <b>saturada</b> por <b>MP10</b> y <b>SO<sub>2</sub></b>	Dic, 2016 - Inicio requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para <b>MP10, SO<sub>2</sub> y As</b>	Abr, 1997 – Declara zona <b>saturada</b> por <b>MP10</b> y <b>SO<sub>2</sub></b>	Dic, 1993 – Declara zona <b>saturada</b> por <b>SO<sub>2</sub></b>	Mar, 1993 – PDA para <b>MP10</b> y <b>SO<sub>2</sub></b>	Ene, 1992 – Declara <b>latente</b> por <b>SO<sub>2</sub></b>	Nov, 1994 – Declara <b>saturada</b> por <b>MP10</b> y <b>SO<sub>2</sub></b>
Jul, 1993 – PDA para <b>MP10, SO<sub>2</sub> y As</b>	-	Jun, 1999 – PDA para <b>MP10</b> y <b>SO<sub>2</sub></b>	Ene, 1995 – PDA para <b>MP10, SO<sub>2</sub> y As</b>	Feb, 1994 – Declara zona <b>saturada</b> por <b>MP10</b> y <b>SO<sub>2</sub></b>	Dic, 2016 - Inicio requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para <b>MP10, SO<sub>2</sub> y As</b>	Ju, 1998 – PDA para <b>MP10</b> y <b>SO<sub>2</sub></b>
Ene, 2001 – PDA para <b>MP10</b> y <b>SO<sub>2</sub></b>	-	Dic, 2018 - Inicio requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para <b>MP10, SO<sub>2</sub> y As</b>	Dic, 2018 - Inicio requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para <b>MP10, SO<sub>2</sub> y As</b>	Jun, 2015 – Declara zona <b>saturada</b> por <b>MP2,5</b> anual, y <b>latente</b> por <b>MP2,5</b> diario y <b>MP10</b> anual	Jun, 2019 – Declara saturada por <b>MP10</b> anual y <b>latente</b> por <b>MP10</b> diario	Dic, 2018 - Inicio requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para <b>MP10, SO<sub>2</sub> y As</b>
Ago, 2005 – Declara zona <b>latente</b> por <b>SO<sub>2</sub></b> diario ( <b>deroga</b> declaración de saturada)	-	-	Oct, 2021 – Declara zona <b>saturada</b> por <b>MP10</b> diario y anual	Dic, 2016 - Inicio requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para <b>MP10, SO<sub>2</sub> y As</b>	Sept, 2021 – Declara <b>latente</b> por <b>SO<sub>2</sub></b> diario y anual	-
May, 2009 – Declara zona <b>saturada</b> por <b>MP10</b> anual	-	-	-	Mar, 2019 – PPDA con límites para <b>MP10</b> y <b>SO</b> específicamente para Codelco División Ventanas	-	-
Dic, 2018 - Inicio requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para <b>MP10, SO<sub>2</sub> y As</b>	-	-	-	-	-	-

Notar que la fundición Altonorte no tiene asociado ningún hito regulatorio específico a la zona.

Fuente: Elaboración propia

## 6.2 Evaluación de calidad del aire en comunas con fuentes emisoras de arsénico

En la presente sección se presenta la evolución de la calidad del aire en comunas con fuentes emisoras de arsénico. Dado que en el Informe “Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico” de la presente consultoría (en adelante “Informe NC”) se realizó una descripción exhaustiva de la evolución de las concentraciones de As en aire a nivel nacional (ver Sección 2.3. del Informe NC), esta sección se enfoca en los contaminantes MP10, MP2,5 y SO<sub>2</sub><sup>99</sup>.

### 6.2.1 Estaciones cercanas a fundición Chuquicamata

Si bien en el Informe NC ya se presenta el mapa de la fundición junto con las estaciones de monitoreo cercanas que realizan mediciones de arsénico, en la Figura 6-1 se incorpora la ubicación de la estación Oasis, la cual mide únicamente SO<sub>2</sub>. Esta estación se ubica a 16,9 km de la fundición.

---

<sup>99</sup> Para verificar la información presentada a continuación respecto de los contaminantes MP10, MP2,5 y SO<sub>2</sub> según corresponda por plan, se puede revisar la información disponible por región en la página del SNIFA: <https://snifa.sma.gob.cl/Fiscalizacion>. Para buscar la información se debe indicar la región de interés y en el campo “Número de expediente” escribir “NC”.



**Figura 6-1 Mapa fundición Chuquicamata, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas**

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

De forma de facilitar el análisis de las concentraciones a continuación, se presenta un resumen de las características de las diferentes estaciones cercanas a la fundición.

**Tabla 6-6 Resumen estaciones fundición Chuquicamata**

Estación	Distancia [km]	Dirección desde fundición	Representatividad	Características
Aukahuasi <sup>1</sup>	5,4	O	N/A	En zona no poblada, ubicada en la fundición
CD 23 de Marzo	16,9	S	MP10, MP2.5	Presencia de población
Centro	16,8	S	MP10, MP2.5	Presencia de población
Chiu-Chiu	24,4	E	N/A	Presencia de población
Nueva Chiu-Chiu	24,6	E	MP10	Presencia de población
C.P.V.K.	14,9	S	MP10, MP2.5	Presencia de población
Hospital El Cobre	15,6	S	MP10, MP2.5, SO <sub>2</sub>	Presencia de población
Oasis	16,9	S	SO <sub>2</sub>	Presencia de población
Servicio Médico Legal	17,3	S	SO <sub>2</sub>	Presencia de población

Nota: N/A indica que la estación no tiene representatividad poblacional para ningún contaminante.

1. Aukahuasi se considera estación de alto impacto debido a su cercanía a la fundición y a su baja población.

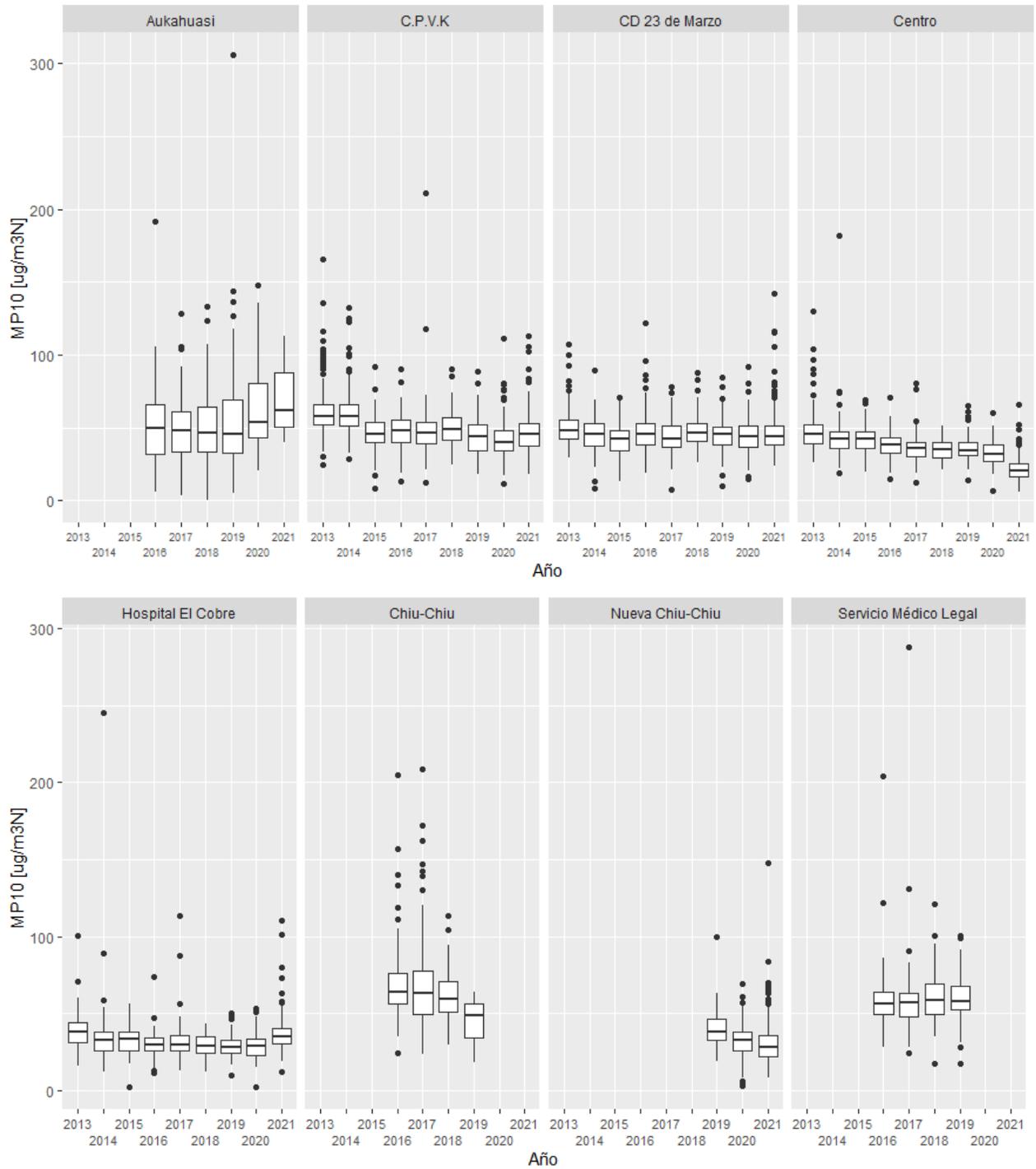
Fuente: Elaboración propia

### 6.2.1.1 MP10

En la Figura 6-2 se presenta la evolución de la concentración de MP10 medida en las estaciones Aukahuasi, C.P.V.K, CD 23 de Marzo, Centro, Hospital El Cobre, Chiu-Chiu, Nueva Chiu-Chiu y Servicio Médico Legal, ubicadas en las cercanías de Chuquicamata, cuyos estadígrafos se presentan en la Tabla 6-7, Tabla 6-8, Tabla 6-9, Tabla 6-10, Tabla 6-13, Tabla 6-11 y Tabla 6-14, respectivamente.

De las siete estaciones, se observa que los valores de la estación Aukahuasi son los mayores, lo que está dentro de lo esperado considerando que es la estación más cercana a la fundición. También es la estación que muestra una mayor dispersión según el rango entre el primer y tercer cuartil. Las medianas medidas en esta estación se encuentran en el orden de aquellas medidas en las estaciones C.P.V.K y CD 23 de Marzo en el periodo de 2016 a 2019, sin embargo, estas se diferencian en los años 2020 y 2021, donde las concentraciones de MP10 medidas en Aukahuasi aumenta. En otras estaciones, como Nueva Chiu-Chiu y Centro, se observa una tendencia a la disminución de las concentraciones en los últimos años.

Si bien la norma de emisión para MP, SO<sub>2</sub> y As (D.S. 28/2013 del MMA) aplica a partir de diciembre del año 2018 en esta fundición, solo se observa una disminución de las concentraciones de MP10 en las estaciones Nueva Chiu-Chiu y Centro a partir del año 2019.



Nota: No se muestra valor 1.140 µg/m3N en estación Chiu-Chiu, correspondiente a dato de la fecha 29-12-2016.

**Figura 6-2 Concentraciones de MP10 [µg/m3N] en cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la estación Aukahuasi (ver Tabla 6-7) se observa una concentración mediana estable en el periodo 2016-2019, entre 46  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  y 50  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$ . El año 2020 se identifica un aumento en todos los estadígrafos, alcanzando una concentración mediana de 54  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$ , y en 2021 también se observa un aumento respecto al año previo, pero la cantidad de datos es muy limitada.

**Tabla 6-7 Estadígrafos concentraciones de MP10  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  en cercanías fundición Chuquicamata, estación Aukahuasi<sup>100</sup>**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	119	110	120	109	95	10
<b>Max.</b>	S/I	S/I	S/I	192	129	133	306	148	113
<b>3rd Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	66	61	64	69	80	88
<b>Mediana</b>	S/I	S/I	S/I	50	48	46	46	54	62
<b>1st Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	32	34	33	33	43	51
<b>Min.</b>	S/I	S/I	S/I	6	4	-	5	21	40

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En las estaciones C.P.V.K (ver Tabla 6-8), se observa una tendencia estable de las medianas de las concentraciones de MP10 lo largo del periodo desde 2015 hasta el año 2021, en el rango de 40  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  a 50  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$ , y se observa un leve aumento en los años 2020 y 2021 en el estadígrafo de máxima, alcanzando 111  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  y 113  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$ .

**Tabla 6-8 Estadígrafos concentraciones de MP10  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  en cercanías fundición Chuquicamata, estación C.P.V.K**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	340	325	112	110	112	117	104	135	303
<b>Max.</b>	166	132	92	90	211	90	89	111	113
<b>3rd Qu.</b>	66	66	54	55	54	57	52	48	53
<b>Mediana</b>	58	57	46	48	46	49	44	40	46
<b>1st Qu.</b>	52	51	40	40	39	41	34	35	38
<b>Min.</b>	25	28	8	13	12	25	18	12	18

Fuente: Elaboración propia

En la estación CD 23 de marzo (ver Tabla 6-9) también se observan concentraciones estables, con medianas en el rango de 41  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  a 47  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$ .

<sup>100</sup> En todas las tablas de estadígrafos de la Sección 6.2 se presenta: la cantidad de datos por año (N); el valor máximo medido (Máx.); la mediana (Mediana.); el valor mínimo (Min.); y los valores de primer cuartil (el 25% de los datos es menor a este valor) y el tercer cuartil (el 75% de los datos es menor a este valor).

**Tabla 6-9 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación CD 23 de Marzo**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	256	115	175	117	110	119	117	141	303
<b>Max.</b>	107	89	71	122	78	88	85	92	142
<b>3rd Qu.</b>	55	53	48	53	51	53	50	51	51
<b>Mediana</b>	48	46	42	46	42	47	45	44	44
<b>1st Qu.</b>	42	38	34	38	37	40	38	37	38
<b>Min.</b>	29	8	13	19	7	26	10	15	24

Fuente: Elaboración propia

En la estación Centro (ver Tabla 6-10) se observa una leve disminución en las concentraciones, pasando de medianas entre 38 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] y 46 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] desde 2013 a 2016, a medianas de 32 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] a 35 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] desde 2016 a 2020, y luego en 2021 una mediana de 21 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. La estación Centro de este modo alcanza las menores concentraciones de MP10 observadas en 2020, con valores cercanos a los medidos en Nueva Chiu-Chiu (ver Tabla 6-13).

**Tabla 6-10 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Centro**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	219	115	87	120	117	121	116	137	298
<b>Max.</b>	130	182	69	71	81	52	65	60	66
<b>3rd Qu.</b>	52	47	48	43	40	40	40	38	25
<b>Mediana</b>	46	42	42	38	35	35	35	32	21
<b>1st Qu.</b>	39	36	36	33	30	30	31	27	16
<b>Min.</b>	26	19	20	15	12	21	14	7	6

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la estación Hospital El Cobre (ver Tabla 6-11), las concentraciones se mantienen estables desde 2016, en rangos de 28 a 30 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en la mediana, mientras que se observa un aumento en 2021, en que alcanza 35 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], lo que se acompaña con varias mediciones sobre 50 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en el mismo año, lo que contrasta con lo observado desde 2018.

**Tabla 6-11 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	122	121	91	122	119	122	117	116	292
<b>Max.</b>	100	245	56	74	113	43	50	53	110
<b>3rd Qu.</b>	44	38	38	34	36	35	33	34	40
<b>Mediana</b>	38	33	33	30	30	29	28	28	35
<b>1st Qu.</b>	31	26	26	26	26	24	24	22	30
<b>Min.</b>	16	12	2	11	12	12	10	2	12

Fuente: Elaboración propia

En la estación Nueva Chiu-Chiu (ver Tabla 6-13) se observa una clara disminución de las concentraciones a partir de 2019, con medianas entre 28  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  y 38  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  en los últimos tres años, comparado con desde 59  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  a 64  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  entre 2016 y 2018. Esta disminución también se observa en los valores máximos, donde desde 2019 casi no se observan mediciones sobre 100  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$ . Cabe recordar que la estación Chiu-Chiu cambió de lugar a donde se encuentra actualmente desde marzo 2019 —momento en que deja de reportar Chiu-Chiu y comienza el monitoreo en Nueva Chiu-Chiu—.

**Tabla 6-12 Estadígrafos concentraciones de MP10  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  en cercanías fundición Chuquicamata, estación Chiu-Chiu**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
<b>N</b>	0	0	0	121	122	121	14
<b>Max.</b>	S/I	S/I	S/I	1.140	208	113	64
<b>3rd Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	77	78	71	56
<b>Mediana</b>	S/I	S/I	S/I	64	63	59	48
<b>1st Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	56	49	51	34
<b>Min.</b>	S/I	S/I	S/I	24	24	29	18

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-13 Estadígrafos concentraciones de MP10  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  en cercanías fundición Chuquicamata, estación Nueva Chiu-Chiu**

Año	2019	2020	2021
<b>N</b>	79	135	283
<b>Max.</b>	99	69	148
<b>3rd Qu.</b>	46	38	36
<b>Mediana</b>	38	32	28
<b>1st Qu.</b>	32	26	22
<b>Min.</b>	19	3	8

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la estación Servicio Médico Legal (ver Tabla 6-14), las concentraciones medianas se mantienen estables entre 56 y 58  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$ , mientras que se observa una disminución en las máximas para los años 2018 y 2019, con concentraciones de 121 y 100  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$ , comparado con 2014 y 288 en los años previos.

**Tabla 6-14 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Servicio Médico Legal**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	118	119	119	115	0	0
<b>Max.</b>	S/I	S/I	S/I	204	288	121	100	S/I	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	64	63	69	68	S/I	S/I
<b>Mediana</b>	S/I	S/I	S/I	56	57	58	58	S/I	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	49	48	49	52	S/I	S/I
<b>Min.</b>	S/I	S/I	S/I	28	24	18	17	S/I	S/I

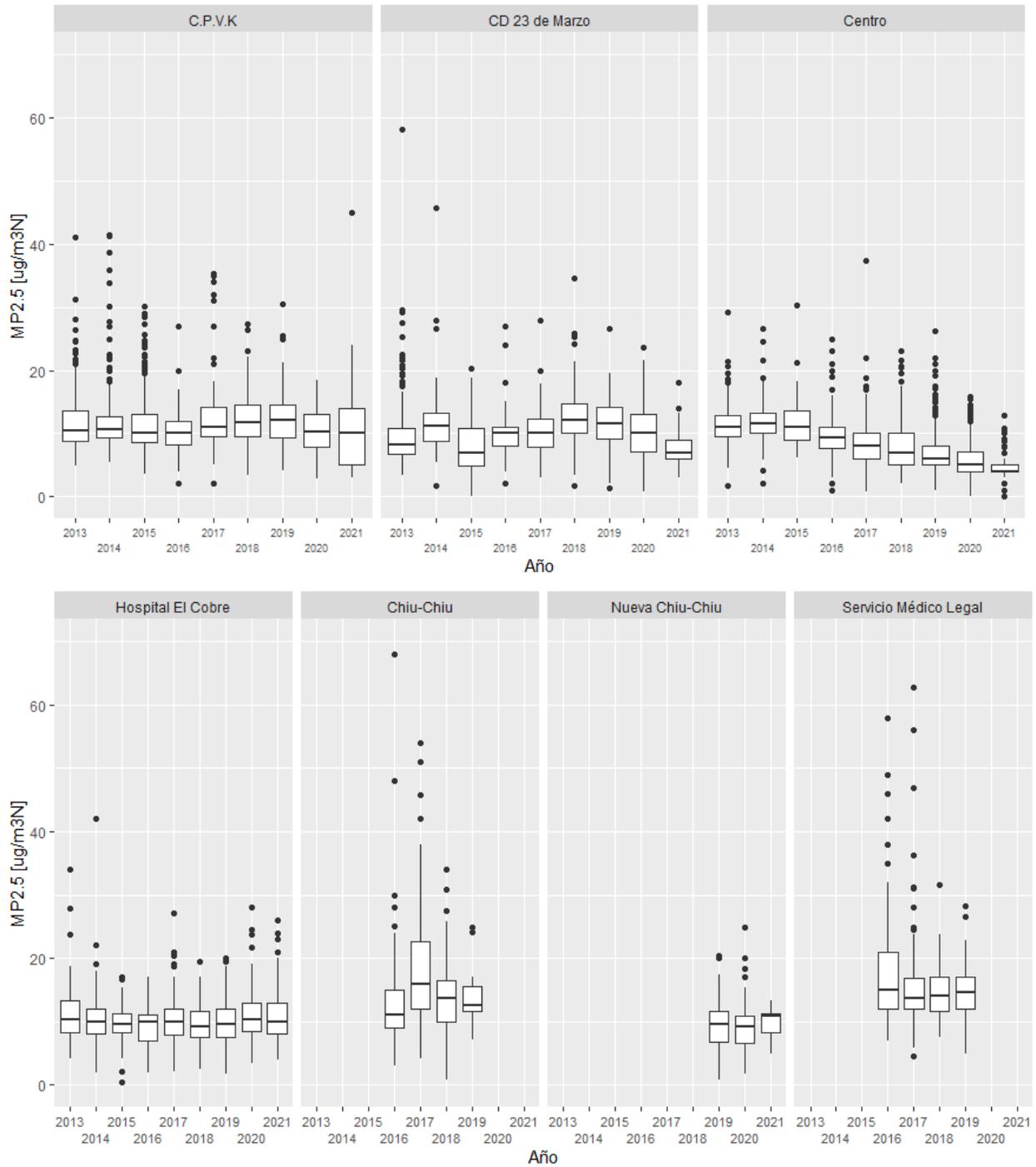
S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.1.2 MP2,5

En la Figura 6-3 se presenta la evolución de la concentración de MP2,5 medida en las estaciones C.P.V.K, CD 23 de Marzo, Centro, Hospital El Cobre, Chiu-Chiu, Nueva Chiu-Chiu y Servicio Médico Legal, ubicadas en las cercanías de Chuquicamata, cuyos estadígrafos se presentan en la Tabla 6-15, Tabla 6-16, Tabla 6-17, Tabla 6-18, Tabla 6-20, y Tabla 6-21, respectivamente.

Las concentraciones medidas se mantienen dentro del mismo orden entre estaciones, siendo levemente mayores en el caso de la estación Servicio Médico Legal. En las estaciones Centro y Nueva Chiu-Chiu se observa una tendencia a la disminución de los valores de las concentraciones medianas, particularmente desde 2019, año en que la fundición ya debía cumplir con la norma de emisión, con disminuciones también en los valores máximos de la estación Servicio Médico Legal, mientras que en las otras estaciones las concentraciones se mantienen bastante estables.



Nota: No se muestra valor 126,83  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  en estación C.P.V.K, correspondiente a dato de la fecha 10-09-2017.

**Figura 6-3 Concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la estación C.P.V.K (ver Tabla 6-15) se observa una tendencia estable, con concentraciones medianas en el orden de 10 a 12  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  en todos los años con datos, mientras que las máximas presentan un rango mayor, entre 19 y 45  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$ , a excepción de 2017 en que se observan una máxima de 127  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$ .

**Tabla 6-15 Estadígrafos concentraciones de MP2,5  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  en cercanías fundición Chuquicamata, estación C.P.V.K**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	337	325	311	110	112	117	104	129	304
<b>Max.</b>	41	42	30	27	127	27	31	19	45
<b>3rd Qu.</b>	14	13	13	12	14	15	14	13	14
<b>Mediana</b>	10	11	10	10	11	12	12	10	10
<b>1st Qu.</b>	9	9	9	8	10	10	9	8	5
<b>Min.</b>	5	5	4	2	2	3	4	3	3

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación CD 23 de Marzo (ver Tabla 6-16) se observa un leve aumento en la concentración en el año 2018 comparado a años previos, en que alcanza una máxima de 35  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$ , mientras que se empieza a observar una disminución en 2019 y 2020 en que las concentraciones vuelven al orden observado en 2016 y 2017, mientras que en 2021 se observa la menor concentración mediana del periodo, 7  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$ , y también la menor máxima, con 18  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$ .

**Tabla 6-16 Estadígrafos concentraciones de MP2,5  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  en cercanías fundición Chuquicamata, estación CD 23 de Marzo**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	256	117	179	117	114	119	117	140	302
<b>Max.</b>	58	46	20	27	28	35	27	24	18
<b>3rd Qu.</b>	11	13	11	11	12	15	14	13	9
<b>Mediana</b>	8	11	7	10	10	12	12	10	7
<b>1st Qu.</b>	7	9	5	8	8	10	9	7	6
<b>Min.</b>	3	2	0	2	3	2	1	1	3

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Centro (ver Tabla 6-17) las concentraciones medianas se mantienen bastante estables en el periodo desde 2013 a 2016, y desde 2017 se empieza a observar una disminución en las medianas de las concentraciones, desde 7  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  en 2018 a 4  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  en 2021, mientras que también se observa una disminución en las máximas en 2020 y 2021, con 16 y 13  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  respectivamente, si se compara con los años previos.

**Tabla 6-17 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Centro**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	219	115	170	475	474	450	456	448	327
<b>Max.</b>	29	27	30	25	37	23	26	16	13
<b>3rd Qu.</b>	13	13	14	11	10	10	8	7	5
<b>Mediana</b>	11	12	11	9	8	7	6	5	4
<b>1st Qu.</b>	9	10	9	8	6	5	5	4	4
<b>Min.</b>	2	2	6	1	1	2	1	0	0

Fuente: Elaboración propia

En la estación Hospital El Cobre (ver Tabla 6-18) las concentraciones se mantienen estables desde 2016, con medianas de 9 y 10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], y máximas entre 17 y 28 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ].

**Tabla 6-18 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	121	121	91	121	120	118	116	115	310
<b>Max.</b>	34	42	17	17	27	20	20	28	26
<b>3rd Qu.</b>	13	12	11	11	12	12	12	13	13
<b>Mediana</b>	10	10	10	10	10	9	10	10	10
<b>1st Qu.</b>	8	8	8	7	8	7	7	9	8
<b>Min.</b>	4	2	0	2	2	2	2	3	4

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la estación Nueva Chiu-Chiu (ver Tabla 6-20), desde 2016 a 2018 la mediana alcanza valores de 16 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], con máximas de entre 34 y 68 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], mientras que desde 2019 la mediana se mantiene en 9 y 11 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], con una máxima de 25 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ].

**Tabla 6-19 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Chiu-Chiu**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
<b>N</b>	0	0	0	122	122	118	19
<b>Max.</b>	S/I	S/I	S/I	68	54	34	25
<b>3rd Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	15	23	17	16
<b>Mediana</b>	S/I	S/I	S/I	11	16	14	12
<b>1st Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	9	12	10	12
<b>Min.</b>	S/I	S/I	S/I	3	4	1	7

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-20 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Nueva Chiu-Chiu**

Año	2019	2020	2021
<b>N</b>	86	109	11
<b>Max.</b>	20	25	13
<b>3rd Qu.</b>	12	11	11
<b>Mediana</b>	10	9	11
<b>1st Qu.</b>	7	7	8
<b>Min.</b>	1	2	5

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Servicio Médico Legal (ver Tabla 6-21), las medianas de las concentraciones se mantienen estables en el rango de 14 y 15 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], pero sí se observa una clara disminución en las concentraciones máximas medidas, que disminuyen de hasta 58 y 63 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], a máximo 28 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en el año 2019.

**Tabla 6-21 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Servicio Médico Legal**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	119	122	121	116	0	0
<b>Max.</b>	S/I	S/I	S/I	58	63	32	28	S/I	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	21	17	17	17	S/I	S/I
<b>Mediana</b>	S/I	S/I	S/I	15	14	14	15	S/I	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	12	12	12	12	S/I	S/I
<b>Min.</b>	S/I	S/I	S/I	7	5	7	5	S/I	S/I

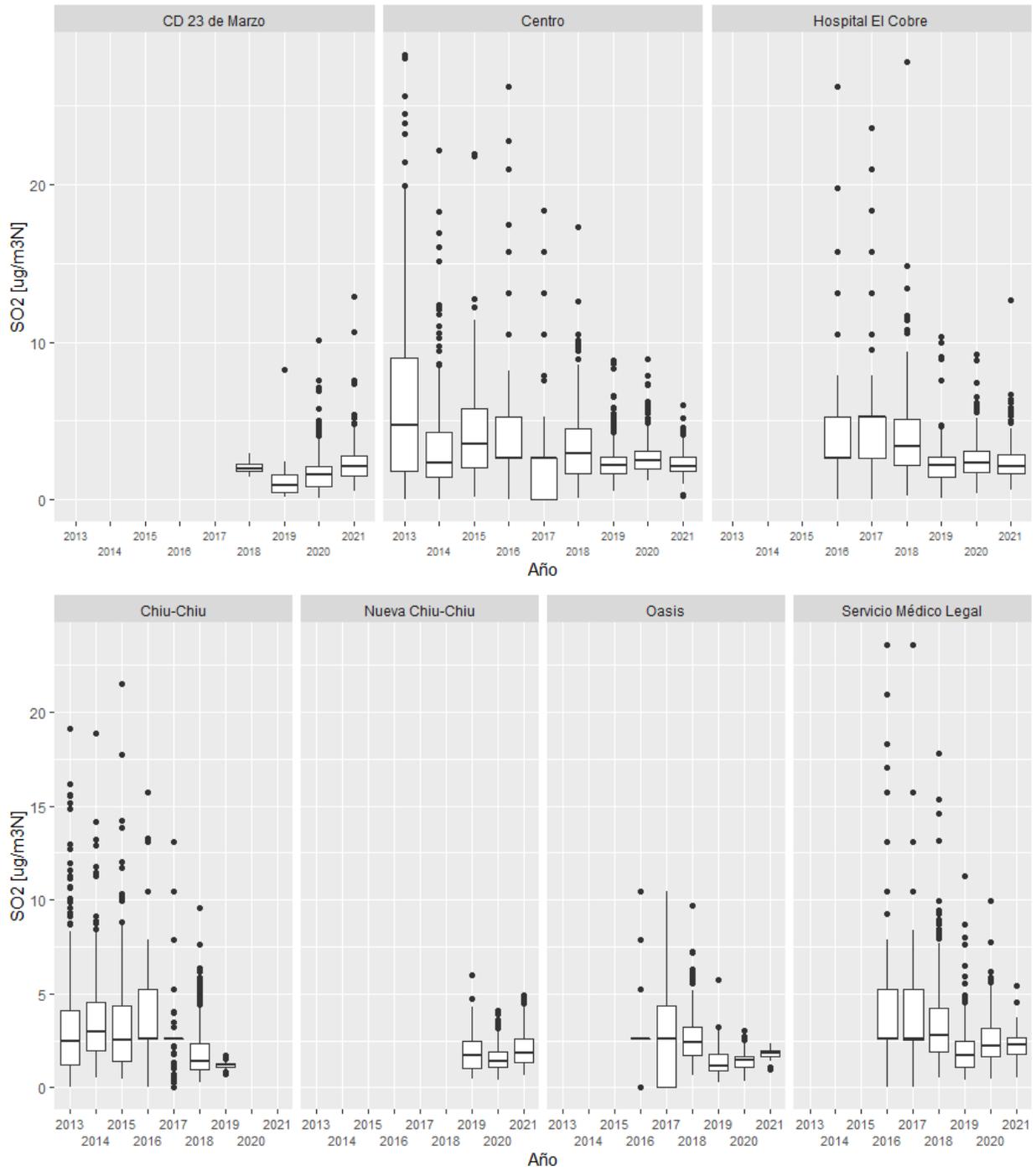
S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

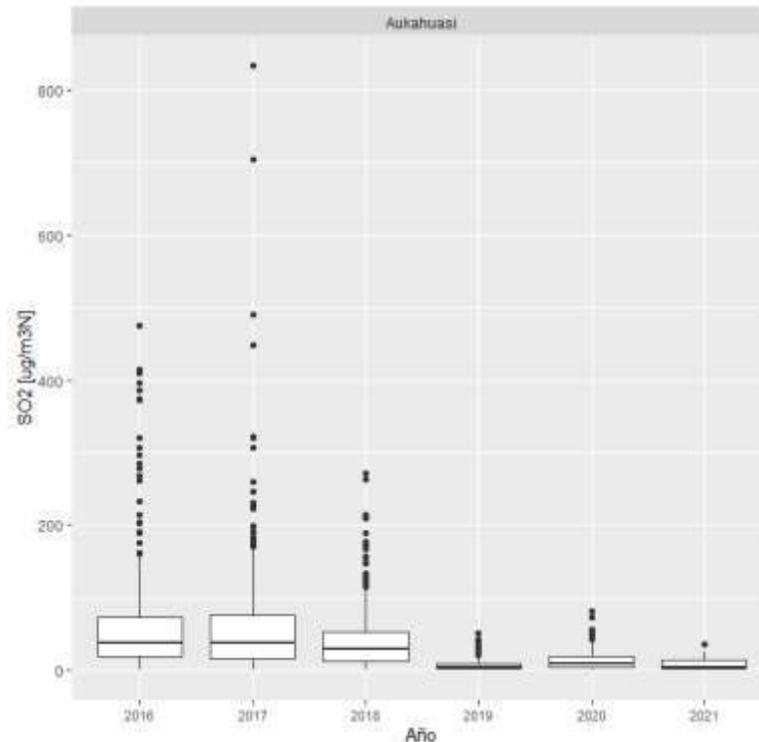
Fuente: Elaboración propia

### 6.2.1.3 SO<sub>2</sub>

En la Figura 6-4 se presenta la evolución de la concentración de SO<sub>2</sub> medida en las estaciones CD 23 de Marzo, Centro, Hospital El Cobre, Nueva Chiu-Chiu, Oasis, Servicio Médico Legal y Aukahuasi ubicadas en las cercanías de Chuquicamata. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 6-22, Tabla 6-23, Tabla 6-24, Tabla 6-26, Tabla 6-27, Tabla 6-28 y Tabla 6-29, respectivamente.

En las estaciones Centro y Nueva Chiu-Chiu se puede observar una tendencia a la disminución de las concentraciones desde 2015-2016, con una clara reducción desde 2019, año en que la fundición ya debía cumplir con la norma de emisión. Para las otras estaciones se cuenta con menos antecedentes, pero de todas formas se observa una disminución en las concentraciones a partir del año 2019. La estación Aukahuasi indica concentraciones en un orden de magnitud mayor, lo que se podría deber a la proximidad de la estación a la fundición.





Nota: La gráfica de la estación Aukahuasi tiene una escala de concentración diferente a las gráficas de las demás estaciones.

Nota 2: No se muestra valor 81,27 µg/m<sup>3</sup>N en estación Centro, correspondiente a dato de la fecha 12-08-2013. Tampoco se muestra valor 50,72 µg/m<sup>3</sup>N en estación Nueva Chiu-Chiu, correspondiente a dato de la fecha 01-05-2013.

**Figura 6-4 Concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chuquicamata, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la estación CD 23 de marzo (ver Tabla 6-22) y en la estación Hospital El Cobre (Tabla 6-24) la concentración mediana se mantiene entre 1,6 y 2,3 [µg/m<sup>3</sup>N] en 2020 y 2021, con máximas menores a 12,9 [µg/m<sup>3</sup>N].

**Tabla 6-22 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación CD 23 de marzo**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	0	0	4	20	342	332
<b>Max.</b>	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	2,9	8,2	10,1	12,9
<b>3rd Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	2,3	1,6	2,1	2,8
<b>Mediana</b>	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	2,0	0,9	1,6	2,1
<b>1st Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	1,8	0,5	0,9	1,5
<b>Min.</b>	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	1,5	0,2	0,1	0,6

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Centro (ver Tabla 6-23) y en Nueva Chiu-Chiu (Tabla 6-26) se observan tendencias similares de disminución de las concentraciones. En el caso de la estación Centro, alcanza

concentraciones medianas entre 2,1 y 2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] desde 2019, con máximas menores a 8,9 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], mientras que en Chiu-Chiu disminuyen a 1,4 y 1,9 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] las medianas en los mismos años, con máximas menores a 6,0 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ].

**Tabla 6-23 Estadígrafos concentraciones de  $\text{SO}_2$  [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Centro**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	271	347	359	362	364	363	361	363	332
<b>Max.</b>	81,3	22,2	21,9	26,2	18,3	17,3	8,9	8,9	6,0
<b>3rd Qu.</b>	9,1	4,3	5,8	5,2	2,6	4,5	2,7	3,1	2,7
<b>Mediana</b>	4,8	2,3	3,5	2,6	2,6	2,9	2,2	2,5	2,1
<b>1st Qu.</b>	1,8	1,4	2,1	2,6	0,0	1,7	1,7	2,0	1,8
<b>Min.</b>	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,1	0,5	1,2	0,2

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-24 Estadígrafos concentraciones de  $\text{SO}_2$  [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Hospital El Cobre**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	365	346	365	360	343	333
<b>Max.</b>	S/I	S/I	S/I	26,2	23,6	27,8	10,3	9,2	12,7
<b>3rd Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	5,2	5,2	5,1	2,7	3,1	2,8
<b>Mediana</b>	S/I	S/I	S/I	2,6	5,2	3,4	2,2	2,3	2,1
<b>1st Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	2,6	2,6	2,2	1,4	1,7	1,6
<b>Min.</b>	S/I	S/I	S/I	-	-	0,2	0,1	0,4	0,6

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-25 Estadígrafos concentraciones de  $\text{SO}_2$  [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Chiu-Chiu**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
<b>N</b>	359	359	361	362	362	364	59
<b>Max.</b>	50,7	18,9	21,6	15,7	13,1	9,6	1,7
<b>3rd Qu.</b>	4,1	4,6	4,3	5,2	2,6	2,3	1,3
<b>Mediana</b>	2,5	3,0	2,5	2,6	2,6	1,4	1,2
<b>1st Qu.</b>	1,2	2,0	1,4	2,6	2,6	1,0	1,1
<b>Min.</b>	0,0	0,5	0,4	-	-	0,3	0,7

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-26 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Nueva Chiu-Chiu**

Año	2019	2020	2021
<b>N</b>	207	357	328
<b>Max.</b>	6,0	4,1	4,9
<b>3rd Qu.</b>	2,5	1,9	2,6
<b>Mediana</b>	1,7	1,4	1,9
<b>1st Qu.</b>	1,0	1,1	1,3
<b>Min.</b>	0,5	0,4	0,7

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

Las concentraciones de las estaciones Oasis y Servicio Médico Legal (ver Tabla 6-27 y Tabla 6-28) se comportan de forma similar a las de la estación Hospital El Cobre. En general, han tendido a disminuir en el tiempo tanto las medianas como las concentraciones máximas. Las medianas en 2016 son 2,6 [µg/m<sup>3</sup>N] en ambas estaciones, disminuyendo a 1,8 y 2,3 [µg/m<sup>3</sup>N] respectivamente. Por otra parte, las concentraciones máximas disminuyen de 10,5 [µg/m<sup>3</sup>N] en 2016 a 2,3 [µg/m<sup>3</sup>N] en 2021 en la estación Oasis y de 23,6 en 2016 a 5,4 [µg/m<sup>3</sup>N] en 2021 en la estación Servicio Médico Legal. Se observa una disminución marcada en el año 2019, lo que se podría deber a que para esa fecha la fundición ya debía cumplir con la norma de emisión.

**Tabla 6-27 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Oasis**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	305	365	365	364	333	31
<b>Max.</b>	S/I	S/I	S/I	10,5	10,5	9,7	5,7	3,1	2,3
<b>3rd Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	2,6	4,3	3,2	1,8	1,7	1,9
<b>Mediana</b>	S/I	S/I	S/I	2,6	2,6	2,4	1,1	1,5	1,8
<b>1st Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	2,6	0,0	1,7	0,9	1,1	1,7
<b>Min.</b>	S/I	S/I	S/I	0,0	0,0	0,6	0,3	0,3	0,9

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-28 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Servicio Médico Legal**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	363	358	364	360	334	31
<b>Max.</b>	S/I	S/I	S/I	23,6	23,6	17,8	11,3	10,0	5,4
<b>3rd Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	5,2	5,2	4,2	2,4	3,2	2,7
<b>Mediana</b>	S/I	S/I	S/I	2,6	2,6	2,8	1,7	2,2	2,3
<b>1st Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	2,6	2,5	1,9	1,1	1,7	1,8
<b>Min.</b>	S/I	S/I	S/I	0,0	0,0	0,5	0,4	0,4	0,5

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

La estación Aukahuasi es la que presenta las concentraciones más altas de SO<sub>2</sub>, probablemente debido a la mayor cercanía a la fundición. Se observa claramente la disminución de las

concentraciones a partir del año 2019, disminuyendo la mediana de 28,4 a 4,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] entre 2018 y 2019. Lo mismo sucede con las concentraciones máximas, disminuyendo de 270,8 a 50,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] entre 2018 y 2019.

**Tabla 6-29 Estadígrafos concentraciones de  $\text{SO}_2$  [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chuquicamata, estación Aukahuasi**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	365	365	365	358	332	31
<b>Max.</b>	S/I	S/I	S/I	474,3	833,3	270,8	50,5	81,5	36,2
<b>3rd Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	73,4	76,0	52,4	9,3	19,6	13,6
<b>Mediana</b>	S/I	S/I	S/I	37,7	36,7	28,4	4,5	9,3	3,7
<b>1st Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	18,3	15,7	11,8	2,4	4,3	2,8
<b>Min.</b>	S/I	S/I	S/I	0,0	0,0	0,6	0,1	0,7	1,9

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

## 6.2.2 Estaciones cercanas a fundición Altonorte

De forma de facilitar el análisis de las concentraciones a continuación, se presenta un resumen de las características de las diferentes estaciones cercanas a la fundición.

**Tabla 6-30 Resumen estaciones fundición Altonorte**

Estación	Distancia [km]	Dirección desde fundición	Representatividad	Características
<b>Coviefi</b>	17,5	NO	MP10, $\text{SO}_2$	Ubicada en un área habitada
<b>La Negra-Altonorte<sup>2</sup></b>	3,5	N	MP10, $\text{SO}_2$	Ubicada en barrio industrial <sup>1</sup>
<b>La Negra-Inacal<sup>2</sup></b>	4,5	N	MP10, $\text{SO}_2$	Ubicada en barrio industrial <sup>1</sup>
<b>Sur<sup>2</sup></b>	1,4	SE	N/A	Ubicada en barrio industrial

Nota: N/A indica que la estación no tiene representatividad poblacional para ningún contaminante.

1. Si bien está ubicada en un barrio industrial, existe un campamento en la zona.

2. La estaciones La Negra-Altonorte, La Negra-Inacal y Sur se consideran de alto impacto debido a su cercanía a la fundición y a su baja población.

Fuente: Elaboración propia

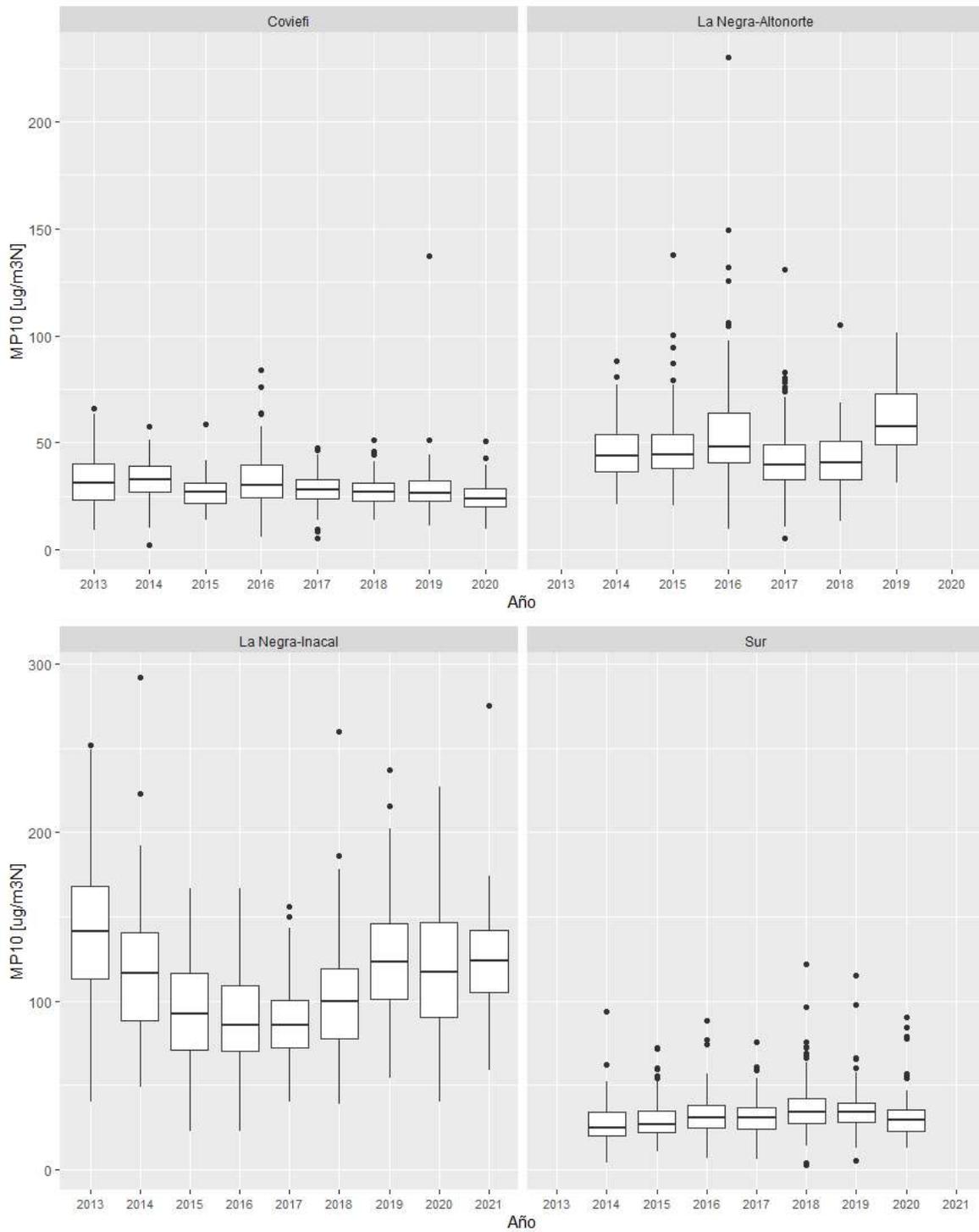
### 6.2.2.1 MP10

En la Figura 6-5 se presenta la evolución de la concentración de MP10 medida en las estaciones Coviefi, La Negra-Altonorte, La Negra-Inacal y Sur, ubicadas en las cercanías de Altonorte. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 6-31, la Tabla 6-32, Tabla 6-33 y la Tabla 6-34, respectivamente.

De las cuatro estaciones, se observa que las concentraciones de la estación La Negra-Inacal son las más altas y los de la estación La Negra-Altonorte son sistemáticamente mayores que los valores de la estación de Coviefi. Lo anterior está dentro de lo esperado considerando la distancia

de las estaciones respecto de la fundición Altonorte. Si bien la estación Sur se encuentra aún más cerca de la fundición, su bajo nivel de concentración se podría explicar porque el viento con dirección de norte a sur es poco común en la zona. Se observa también que las concentraciones se han mantenido relativamente estables en el tiempo, con la excepción de la estación La Negra-Incal.

Si bien la norma de emisión para MP, SO<sub>2</sub> y As (D.S. 28/2013 del MMA) aplica a partir de diciembre del año 2016 en esta fundición, solo se observa una disminución de las concentraciones de MP10 en la estación La Negra-Altonorte a partir del año 2017



Nota: Estaciones La Negra-Inacal y Sur se muestran es escala diferente.

**Figura 6-5 Concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Altonorte, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la estación Coviefi (ver Tabla 6-31) se observa que la concentración mediana se ha mantenido en el rango de 24 a 33 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], observándose que en el último año de la serie los estadígrafos se han mantenido con desviaciones menores y una concentración mediana de 24 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ].

**Tabla 6-31 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Altonorte, estación Coviefi**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	119	119	118	122	117	116	116	102	0
<b>Max.</b>	66	58	59	84	48	51	137	51	S/I
<b>3rd Qu.</b>	40	39	31	40	33	31	32	29	S/I
<b>Mediana</b>	31	33	27	30	28	27	27	24	S/I
<b>1st Qu.</b>	23	27	22	24	24	23	23	20	S/I
<b>Min.</b>	9	2	14	6	5	14	11	9	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación La Negra-Altonorte (ver Tabla 6-32) se observa que la concentración mediana se ha mantenido relativamente estable durante todo el periodo entre 39 y 57 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. Respecto a los valores máximos, se observa una dispersión relevante desde los 88 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] del año 2014, a valores muy superiores como los 230 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] del año 2016. El año de menor concentración es el 2017, lo que coincide con el inicio del requisito de cumplimiento de la Norma de emisión (ver Tabla 6-5).

**Tabla 6-32 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Altonorte**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	58	119	118	115	45	31	0	0
<b>Max.</b>	S/I	88	138	230	131	105	101	S/I	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/I	54	54	64	49	51	73	S/I	S/I
<b>Mediana</b>	S/I	44	44	48	39	41	57	S/I	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/I	36	38	41	33	33	49	S/I	S/I
<b>Min.</b>	S/I	21	21	10	5	13	31	S/I	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación La Negra-Inacal (ver Tabla 6-33) no se observa una estabilidad muy marcada en la concentración mediana oscilando entre 86 y 168 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. Esta presenta un comportamiento anómalo, con una disminución en el periodo 2013-2017 seguido por un leve repunte en los últimos años. Respecto a los valores máximos, sí se observa una relativa estabilidad en el tiempo, con excepciones en los años 2015, 2016 y 2017.

**Tabla 6-33 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Inacal**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	119	122	110	111	122	119	101	116	51
<b>Max.</b>	252	292	167	167	156	260	237	227	275
<b>3rd Qu.</b>	168	141	117	110	101	119	146	147	142
<b>Mediana</b>	141	117	93	86	86	100	123	118	124
<b>1st Qu.</b>	114	88	71	70	72	78	101	91	105
<b>Min.</b>	40	49	23	23	40	39	54	40	59

Fuente: Elaboración propia

En la estación Sur (ver Tabla 6-34) se observa que la concentración mediana se ubica en el rango de 25 a 34 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. En general, tampoco se observa una tendencia clara al alza o a la baja de los estadígrafos, manteniéndose relativamente estables.

**Tabla 6-34 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Altonorte, estación Sur**

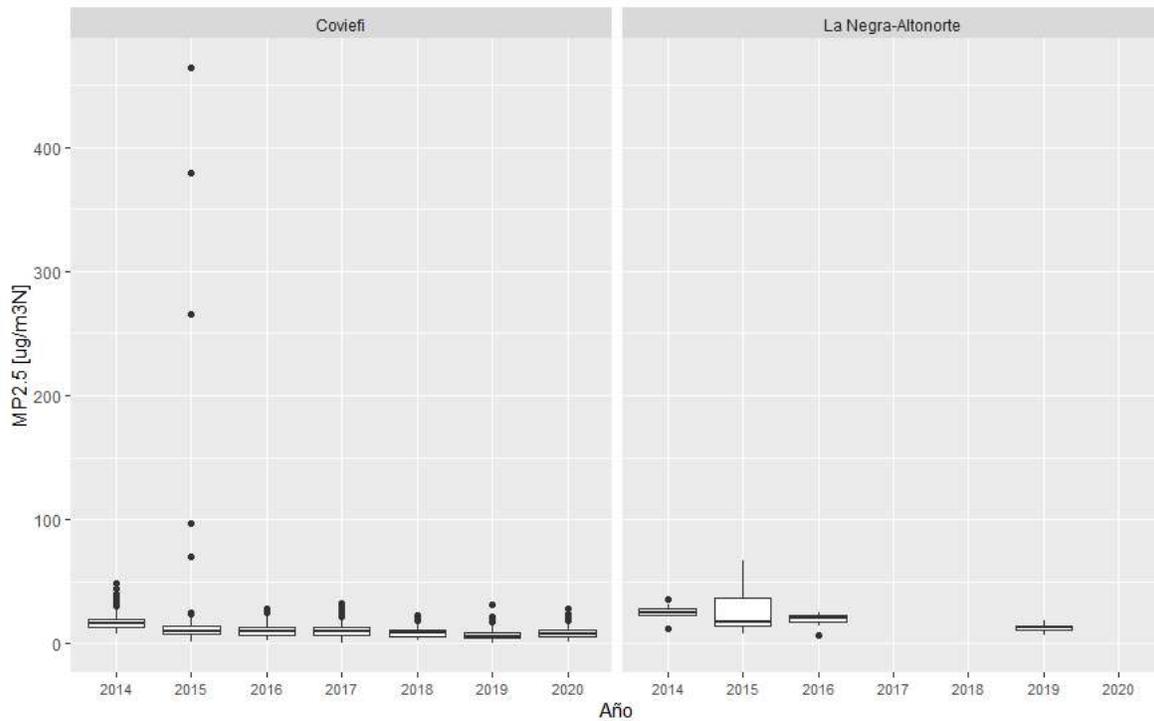
Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	59	120	118	117	117	116	96	0
<b>Max.</b>	S/I	94	72	88	76	122	115	91	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/I	34	35	38	37	42	40	35	S/I
<b>Mediana</b>	S/I	25	27	31	31	34	34	30	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/I	20	22	24	24	27	28	23	S/I
<b>Min.</b>	S/I	4	11	7	6	2	5	13	S/I

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.2.2 MP2,5

En la Figura 6-6 se presenta la evolución de la concentración de MP2,5 medida en las estaciones Coviefi, y La Negra-Altonorte, ubicadas en las cercanías de Altonorte. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 6-35, y la Tabla 6-36, respectivamente.

Para los años que se cuenta con observaciones en ambas estaciones, se observa que la estación La Negra-Altonorte presenta concentraciones altas. Lo anterior está dentro de lo esperado considerando la distancia de las estaciones respecto de la fundición Altonorte. También se observa que la estación Coviefi posee mayor cantidad de valores extremos, en especial para 2015, pero esto podría deberse a otras fuentes emisoras de la ciudad de Antofagasta. No es posible identificar una tendencia asociada al inicio de la aplicación de la norma de emisión en diciembre de 2016.



**Figura 6-6 Concentraciones de MP2,5 [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Altonorte, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la estación Coviefi (ver Tabla 6-35) se observa que la concentración mediana de las concentraciones, desde el 2014, se ha mantenido muy estable en el rango de 6 a 10 [µg/m<sup>3</sup>N]. En los valores máximos llama la atención el alto valor de 464 [µg/m<sup>3</sup>N] en el año 2015, sin embargo, no se condice con la tendencia del tercer cuartil donde se observa una disminución con el tiempo.

**Tabla 6-35 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Altonorte, estación Coviefi**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	166	321	393	538	326	310	336	0
<b>Max.</b>	S/I	48	464	28	33	23	32	28	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/I	20	14	14	13	11	10	11	S/I
<b>Mediana</b>	S/I	16	10	10	10	9	6	8	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/I	14	7	7	7	6	5	6	S/I
<b>Min.</b>	S/I	8	1	3	0	2	1	1	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación La Negra-Altonorte (ver Tabla 6-36) para los pocos años con los que se cuenta con datos se observa que la concentración mediana se ha mantenido medianamente estable con

concentraciones entre 13 y 25 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. Respecto a los valores máximos, se observa una dispersión relevante desde los 18 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] del año 2019, a valores casi 4 veces superiores, alcanzando los 67 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] el año 2015. Si bien la baja cantidad de datos no permite tomar conclusiones muy robustas, se observa que el 2019 la concentración es menor al periodo anterior al inicio del requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para MP, SO<sub>2</sub> y As (ver Tabla 6-5).

**Tabla 6-36 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Altonorte**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	10	57	10	0	0	31	0	0
<b>Max.</b>	S/I	36	67	25	S/I	S/I	18	S/I	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/I	28	37	23	S/I	S/I	14	S/I	S/I
<b>Mediana</b>	S/I	25	18	21	S/I	S/I	13	S/I	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/I	23	14	18	S/I	S/I	11	S/I	S/I
<b>Min.</b>	S/I	12	8	7	S/I	S/I	7	S/I	S/I

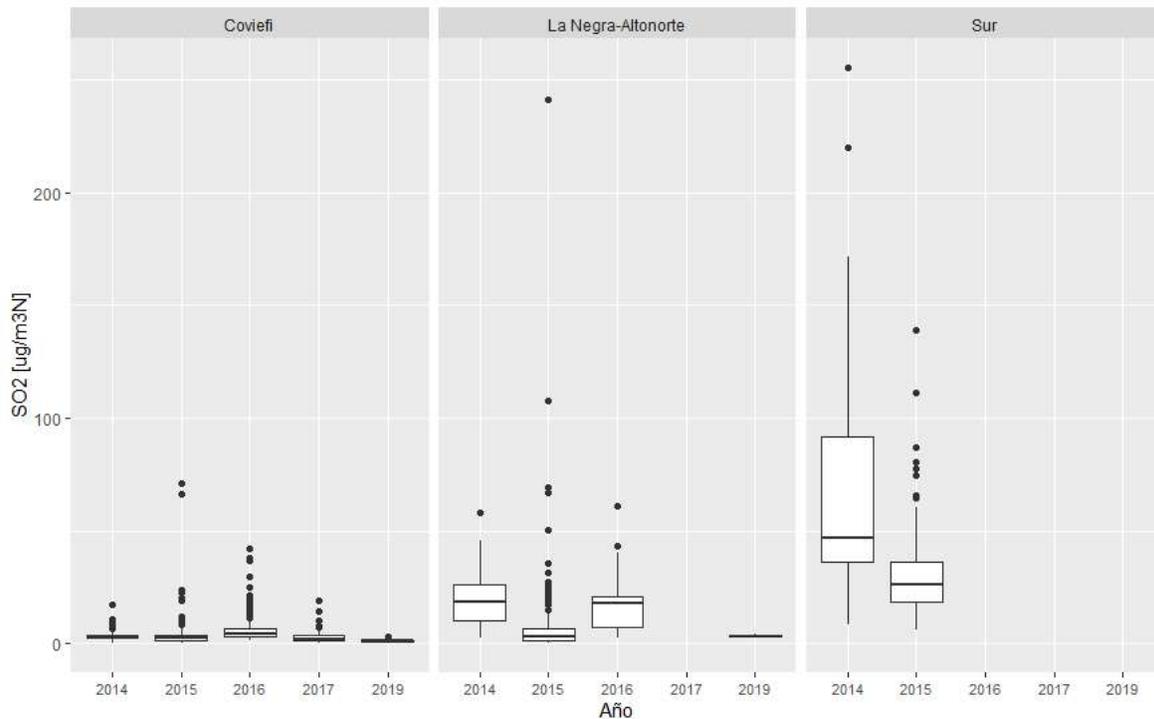
S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.2.3 SO<sub>2</sub>

En la Figura 6-7 se presenta la evolución de la concentración de SO<sub>2</sub> medida en las estaciones Coviefi, La Negra-Altonorte, y Sur, ubicadas en las cercanías de Altonorte, cuyos estadígrafos se presentan en la Tabla 6-37, la Tabla 6-38, y la Tabla 6-39, respectivamente.

De las tres estaciones, se observa que las concentraciones de la estación Sur son las más altas y los de la estación La Negra-Altonorte son sistemáticamente mayores que los valores de la estación de Coviefi. Lo anterior está dentro de lo esperado considerando la distancia de las estaciones respecto de la fundición Altonorte, aunque es importante resaltar que la estación Sur posee menor cantidad de observaciones. Se observa gran dispersión en las concentraciones, a diferentes niveles dependiendo de la estación. En las estaciones Coviefi y La Negra-Altonorte es posible observar una tendencia a la disminución de las concentraciones a partir del inicio de la norma de emisión en diciembre de 2016.



**Figura 6-7 Concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Altonorte, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la estación Coviefi (ver Tabla 6-37) se observa que la concentración mediana de las concentraciones ha oscilado entre 1,1 y 4,4 [µg/m<sup>3</sup>N], observándose que en los últimos dos años con observaciones se han mantenido con desviaciones menores y una concentración mediana entre 1,1 y 1,8 [µg/m<sup>3</sup>N].

**Tabla 6-37 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Altonorte, estación Coviefi**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	179	361	303	89	0	30	0	0
<b>Max.</b>	S/I	17,6	71,4	41,9	19,0	S/I	2,9	S/I	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/I	4,0	3,7	6,5	3,5	S/I	1,4	S/I	S/I
<b>Mediana</b>	S/I	3,1	2,3	4,4	1,8	S/I	1,1	S/I	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/I	2,3	1,1	3,4	1,2	S/I	0,9	S/I	S/I
<b>Min.</b>	S/I	0,1	0,2	1,5	0,3	S/I	0,8	S/I	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación La Negra-Altonorte (ver Tabla 6-38) se observa gran dispersión en la concentración mediana, la cual oscila entre 3,2 y 18,3 [µg/m<sup>3</sup>N]. Respecto a los valores máximos, se observa una dispersión relevante desde los 4,1 [µg/m<sup>3</sup>N] del año 2019, a valores casi 60 veces superiores,

alcanzando los 241,3 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] el año 2015. Si bien la alta dispersión dificulta ver tendencias claras, si se puede decir que todos los estadígrafos bajaron posterior al Inicio del requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para MP, SO<sub>2</sub> y As (diciembre 2016).

**Tabla 6-38 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Altonorte, estación La Negra-Altonorte**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	28	172	30	0	0	31	0	0
<b>Max.</b>	S/I	58,2	241,5	61,3	S/I	S/I	4,1	S/I	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/I	26,5	6,7	21,1	S/I	S/I	3,7	S/I	S/I
<b>Mediana</b>	S/I	18,3	3,2	18,0	S/I	S/I	3,2	S/I	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/I	10,5	1,4	7,2	S/I	S/I	3,0	S/I	S/I
<b>Min.</b>	S/I	2,5	-	2,7	S/I	S/I	2,8	S/I	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Sur (ver Tabla 6-39) solo se observan dos medianas con concentraciones de 47,1 y 26,0 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. Sí se puede observar que todos los estadígrafos disminuyen desde 2014 a 2015, incluso teniendo en cuenta que la cantidad de observaciones aumentó.

**Tabla 6-39 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Altonorte, estación Sur**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	31	68	0	0	0	0	0	0
<b>Max.</b>	S/I	255,4	139,3	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/I	91,7	36,2	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
<b>Mediana</b>	S/I	47,1	26,0	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/I	36,5	18,4	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
<b>Min.</b>	S/I	8,3	6,2	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.3 Estaciones cercanas a fundición Potrerillos

De forma de facilitar el análisis de las concentraciones a continuación, se presenta un resumen de las características de las diferentes estaciones cercanas a la fundición.

**Tabla 6-40 Resumen estaciones fundición Potrerillos**

Estación	Distancia [km]	Dirección desde fundición	Representatividad	Características
CAP <sup>2</sup>	2,7	NO	N/A	En zona no habitada
Cine Inca <sup>1</sup>	25,5	NO	N/A	Presencia de población
Doña Inés <sup>2</sup>	0,4	SE	N/A	Ubicada en la misma fundición
Intelec <sup>1</sup>	21,4	NO	N/A	En zona no habitada

Nota: N/A indica que la estación no tiene representatividad poblacional para ningún contaminante.

1. Estas estaciones utilizan la representatividad indicada en el SINCA, ya que no se encontró información de otra fuente.

2. CAP y Doña Inés se consideran estaciones de alto impacto debido a su cercanía a la estación y a su baja población

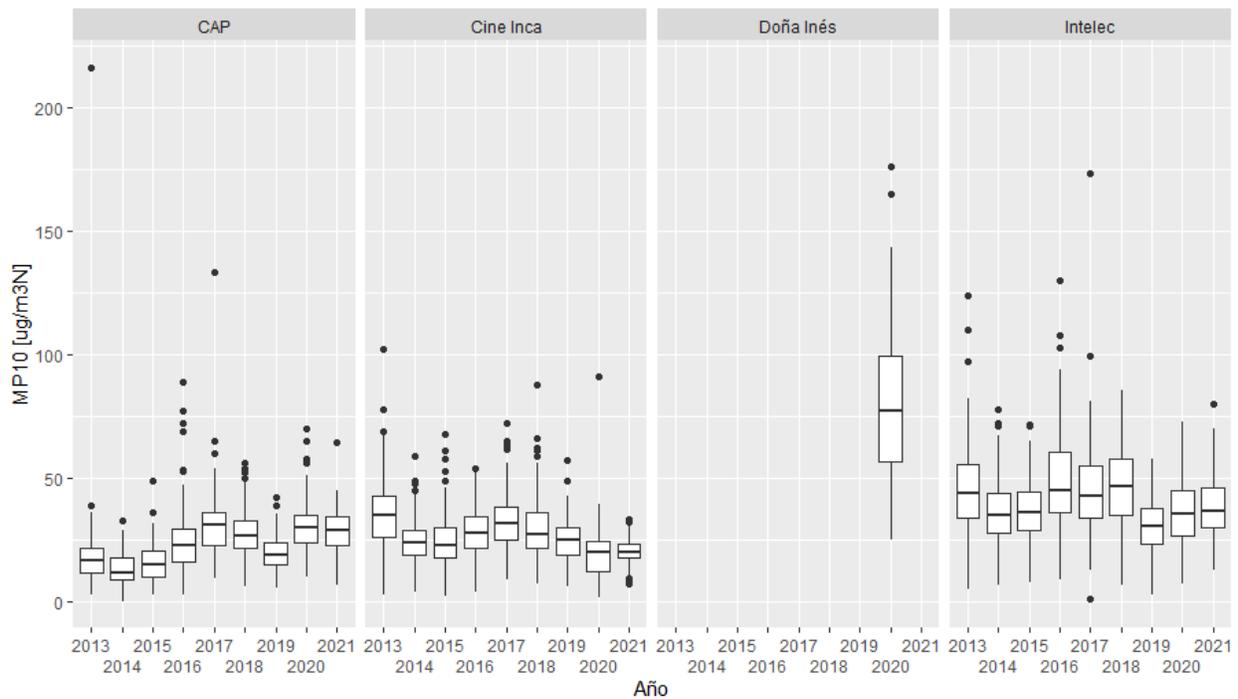
Fuente: Elaboración propia

### 6.2.3.1 MP10

En la Figura 6-8 se presenta la evolución de la concentración de MP10 medida en todas las estaciones ubicadas en las cercanías de Potrerillos, esta son CAP, Cine Inca, y Intelec. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 6-41, Tabla 6-42, y Tabla 6-44, respectivamente.

La estación Intelec presenta mayor concentración que Cine Inca, lo que es esperable según su cercanía a la fundición. Sin embargo, que la estación CAP presente menor concentración a pesar de estar más cerca de la fundición, sumado a una dirección dominante del viento desde el noreste, hace pensar que las altas concentraciones de las primeras dos estaciones podrían estar asociadas a las emisiones provenientes de la División Salvador de CODELCO Chile. En esta División se desarrollan proyectos mineros explotados de forma subterránea y a cielo abierto, y además cuenta con una planta de tratamiento de minerales. Por lo tanto, las estaciones Intelec y Cine Inca tienen más cerca otras fuentes de emisión que la Fundición Potrerillos.

La norma de emisión para MP, SO<sub>2</sub> y As (D.S. 28/2013 del MMA) aplica a partir de diciembre del año 2018 en esta fundición. Esto coincide con una disminución en las concentraciones de MP10 en las estaciones CAP, Cine Inca e Intelec en el año 2019. Sin embargo, la única estación que mantiene esta disminución en el tiempo es Cine Inca. Las demás estaciones vuelven a medir concentraciones más altas en los años siguientes.



**Figura 6-8 Concentraciones de MP10 [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Potrerillos, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

Para la estación CAP (ver Tabla 6-41) se observan concentraciones medianas en el rango de 12 a 31 [µg/m<sup>3</sup>N] y concentraciones máximas entre 33 y 216 [µg/m<sup>3</sup>N]. Se observa que el año 2019 se revierte la tendencia al alza de los años anteriores. Esto coincide con el inicio del requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para MP, SO<sub>2</sub> y As (diciembre 2018).

**Tabla 6-41 Estadígrafos concentraciones de MP10 [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Potrerillos, estación CAP**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	118	121	98	116	118	121	119	122	59
<b>Max.</b>	216	33	49	89	133	56	42	70	64
<b>3rd Qu.</b>	22	18	20	29	36	33	24	35	34
<b>Mediana</b>	17	12	15	23	31	27	19	30	29
<b>1st Qu.</b>	12	9	10	16	23	22	15	24	23
<b>Min.</b>	3	0	3	3	10	6	5	10	7

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Cine Inca (Tabla 6-42), las concentraciones medianas se mantienen en el rango de 20 a 35 [µg/m<sup>3</sup>N], con valores máximos medidos en el orden de 33 a 72 [µg/m<sup>3</sup>N], exceptuando

los años 2013, 2018 y 2020 en que se observan máximas de 102, 88 y 91 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] respectivamente.

**Tabla 6-42 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Potrerillos, estación Cine Inca**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	121	120	106	122	119	120	120	120	59
<b>Max.</b>	102	59	68	54	72	88	57	91	33
<b>3rd Qu.</b>	43	29	30	34	38	36	30	25	23
<b>Mediana</b>	35	24	23	28	32	28	25	20	20
<b>1st Qu.</b>	26	19	18	22	25	22	19	12	18
<b>Min.</b>	3	4	2	4	9	7	6	2	7

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la estación Doña Inés, sólo se cuenta con datos sobre concentraciones de MP10 para el año 2020. Al comparar con las concentraciones de las demás estaciones para ese año, se observa que esta estación presenta las mayores concentraciones de MP10, con una máxima que supera alrededor de 2,5 veces la concentración máxima de CAP e Intelc y alrededor de 4,5 veces la máxima de Cine Inca.

**Tabla 6-43 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Potrerillos, estación Doña Inés**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	0	0	0	0	92	0
<b>Max.</b>	S/I	176	S/I						
<b>3rd Qu.</b>	S/I	99	S/I						
<b>Mediana</b>	S/I	78	S/I						
<b>1st Qu.</b>	S/I	57	S/I						
<b>Min.</b>	S/I	25	S/I						

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6-44 se muestran los estadígrafos para la estación Intelc. Esta es la estación que presenta las mayores concentraciones medianas, las que se mantienen relativamente estables en el rango de 31 a 47 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], así como los mayores valores máximos medidos, los que se encuentran en el orden de 58 a 173 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ].

**Tabla 6-44 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Potrerillos, estación Intelec**

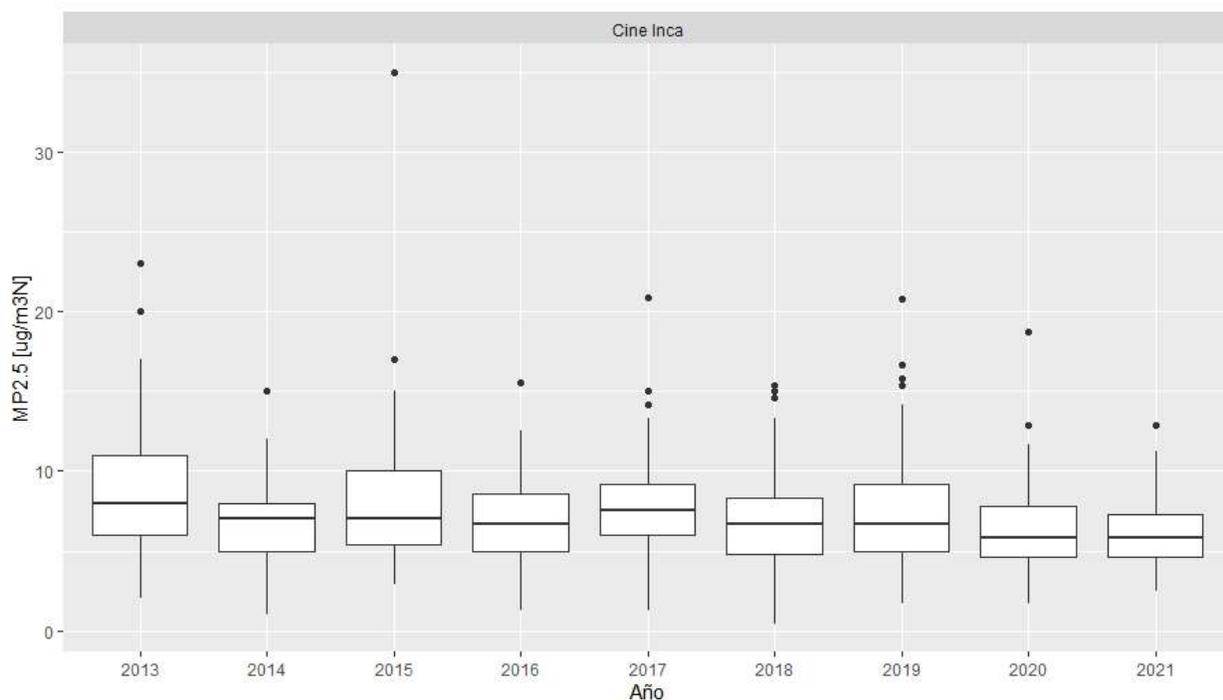
Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	122	122	108	118	122	109	118	112	59
<b>Max.</b>	124	78	72	130	173	85	58	73	80
<b>3rd Qu.</b>	56	44	44	61	55	58	38	45	46
<b>Mediana</b>	44	35	36	45	43	47	31	36	37
<b>1st Qu.</b>	34	28	29	36	34	35	23	27	30
<b>Min.</b>	5	7	8	9	1	7	3	8	13

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.3.2 MP2,5

En la Figura 6-9 se presenta la evolución de la concentración de MP2,5 medida en la estación Cine Inca, ubicada en las cercanías de Potrerillos. Sus estadígrafos se resumen también en la Tabla 6-45. Se observa un comportamiento relativamente estable a través del tiempo, con una leve disminución de los estadígrafos entre los años 2019 a 2021.



**Figura 6-9 Concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Potrerillos estación Cine Inca**

Fuente: Elaboración propia

En la estación Cine Inca (Tabla 6-45), las concentraciones medianas se mantienen en el rango de 6 a 8 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] para los años con datos, con valores máximos medidos en el orden de entre 13 y 35 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ].

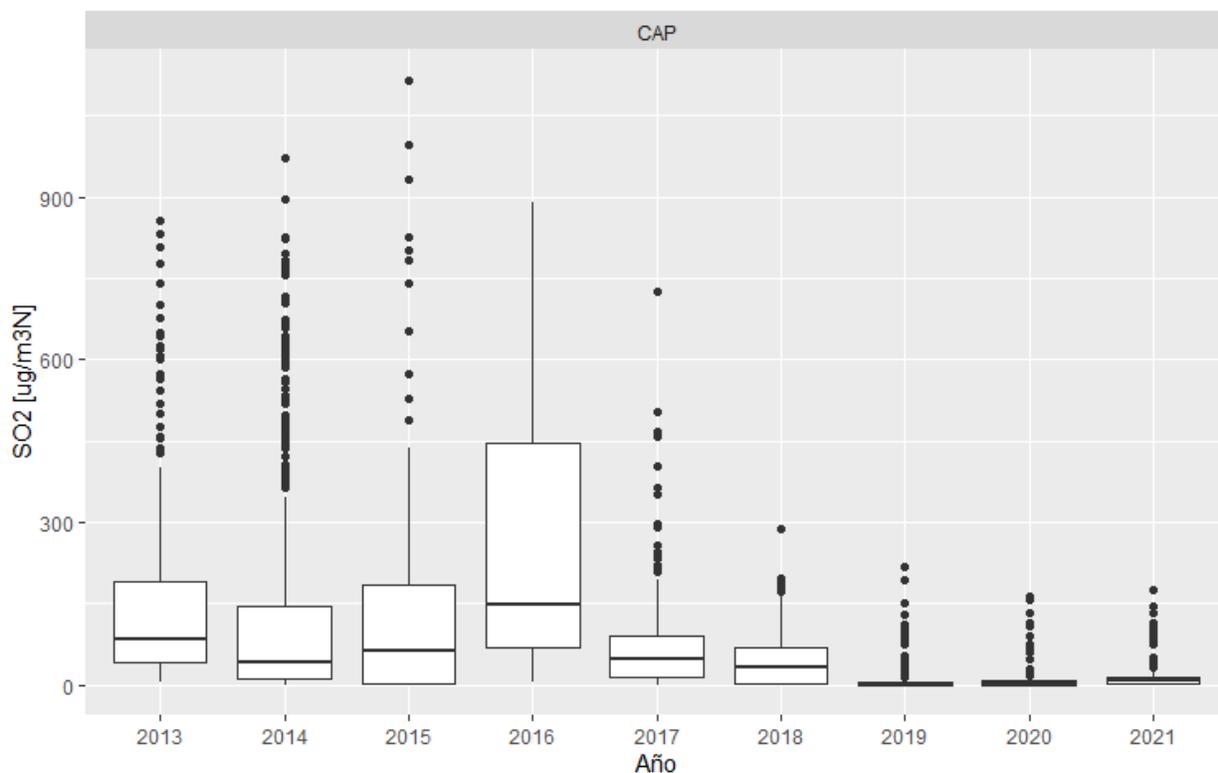
**Tabla 6-45 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Potrerillos, estación Cine Inca**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	119	122	107	119	116	107	116	122	59
<b>Max.</b>	23	15	35	16	21	15	21	19	13
<b>3rd Qu.</b>	11	8	10	9	9	8	9	8	7
<b>Mediana</b>	8	7	7	7	7	7	7	6	6
<b>1st Qu.</b>	6	5	5	5	6	5	5	5	5
<b>Min.</b>	2	1	3	1	1	0	2	2	2

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.3.3 SO<sub>2</sub>

En la Figura 6-10 se presenta la evolución de la concentración de SO<sub>2</sub> medida en la estación CAP, ubicada en las cercanías de Potrerillos, y en la Tabla 6-46 se presentan los estadígrafos asociados. Se observa que la dispersión de concentraciones dentro de un mismo año ha ido disminuyendo con el tiempo. Además, se observa una evidente disminución en las concentraciones a partir del año 2019, lo que se asocia al inicio del cumplimiento de la norma de emisión en esta fundición.



**Figura 6-10 Concentraciones de SO<sub>2</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Potrerillos, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

Para la estación CAP (ver Tabla 6-46) se observan concentraciones medianas con un amplio rango entre 33,4 y 149,2 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] entre los años 2013 y 2018. Se observa una disminución a partir del año 2019, año a partir del cual las concentraciones medianas varían entre 1,5 y 7,1 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. Respecto de valores máximos existe gran variabilidad entre los años 2013 y 2018, los que presentan un rango entre 287,1 y 1.115,2 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], mientras que entre los años 2019 y 2021 son más estables, variando entre 163,5 y 218,3 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ].

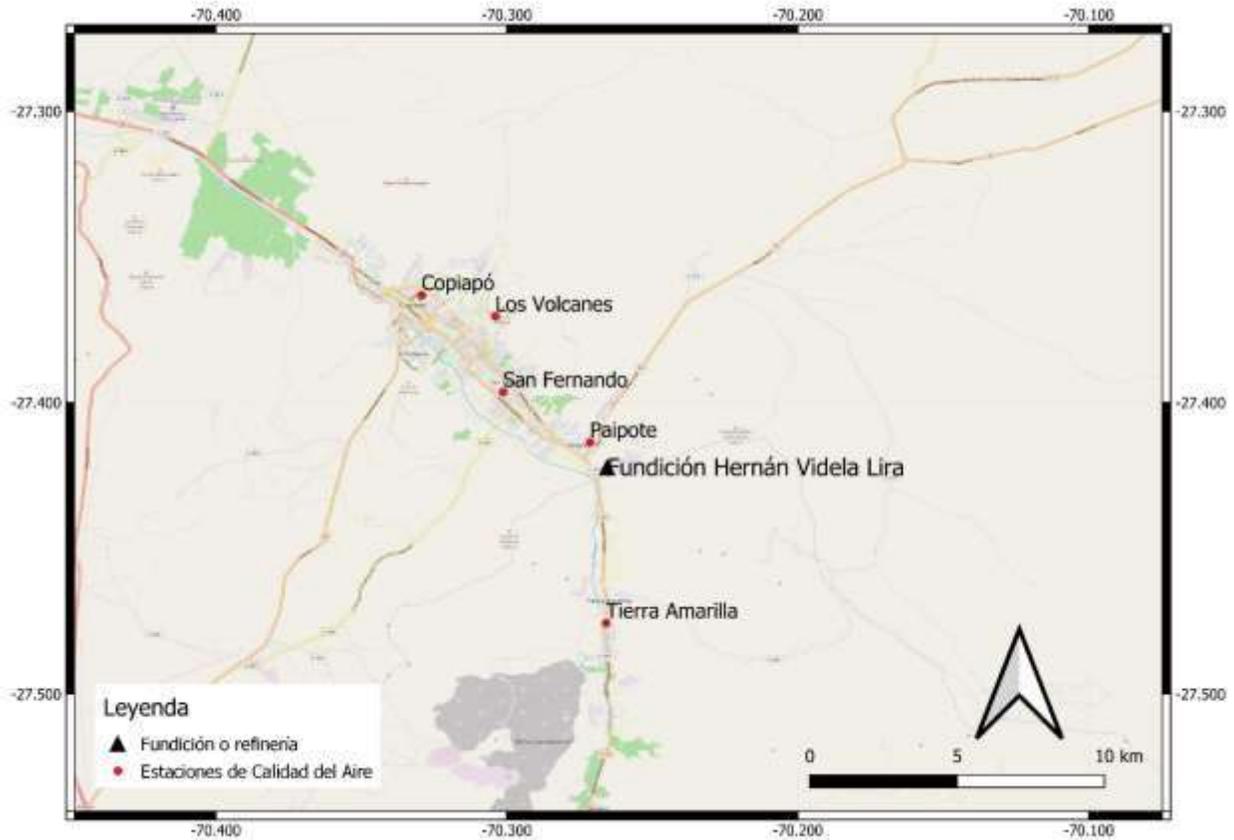
**Tabla 6-46 Estadígrafos concentraciones de  $\text{SO}_2$  [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Potrerillos, estación CAP**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	183	457	430	342	351	334	352	335	181
<b>Max.</b>	855,1	972,8	1.115,2	889,6	726,0	287,1	218,3	163,5	175,5
<b>3rd Qu.</b>	191,9	144,9	184,4	445,7	89,7	70,0	5,9	7,2	14,5
<b>Mediana</b>	82,9	40,0	61,7	149,2	48,6	33,4	1,5	2,7	7,1
<b>1st Qu.</b>	40,4	10,2	1,2	69,9	14,4	2,6	0,2	0,4	2,8
<b>Min.</b>	3,5	0,0	0,0	4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fuente: Elaboración propia

#### 6.2.4 Estaciones cercanas a fundición Hernán Videla Lira

Si bien en el Informe NC ya se presenta el mapa de la fundición junto con las estaciones de monitoreo cercanas que realizan mediciones de arsénico, en la Figura 6-11 se incorpora la ubicación de la estación Los Volcanes, la cual mide únicamente  $\text{SO}_2$ . Esta se ubica a 7,2 km de distancia de la fundición.



**Figura 6-11 Mapa fundición Hernán Videla Lira, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas**

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

De forma de facilitar el análisis de las concentraciones a continuación, se presenta un resumen de las características de las diferentes estaciones cercanas a la fundición.

**Tabla 6-47 Resumen estaciones fundición Hernán Videla Lira**

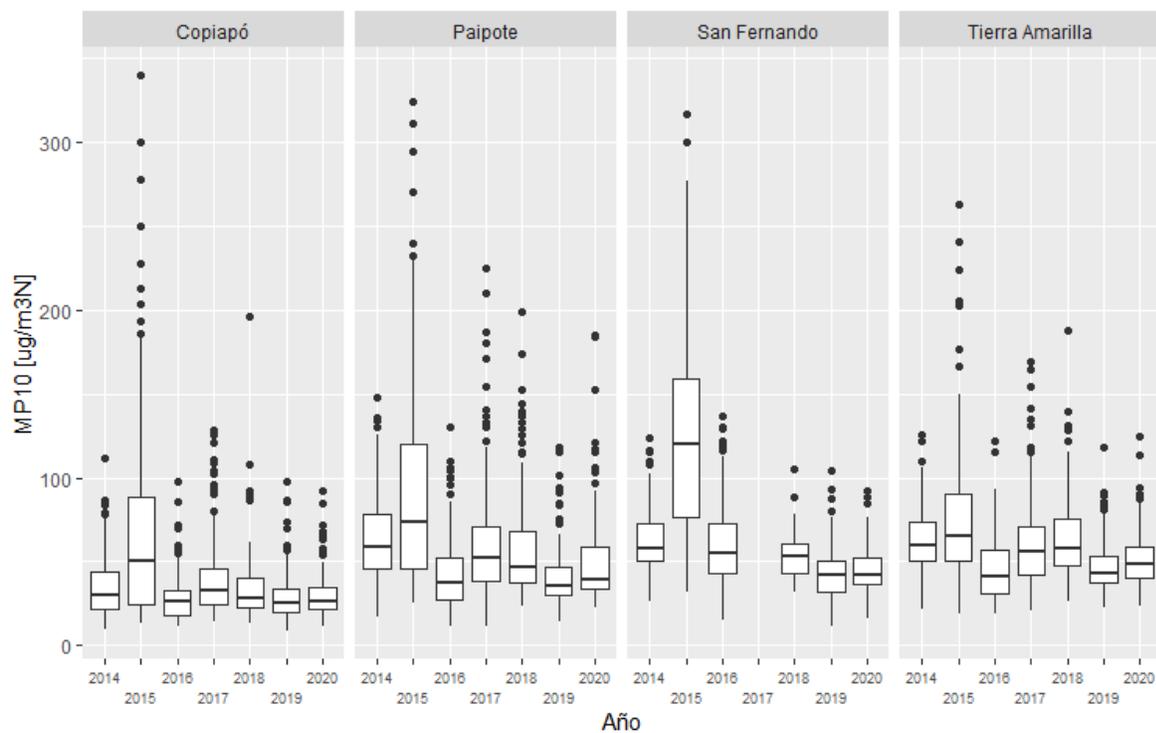
Estación	Distancia [km]	Dirección desde fundición	Representatividad	Características
Paipote	1,5	NO	MP10, SO <sub>2</sub>	Presencia de población
Copiapó	9,7	NO	MP10, MP2.5, SO <sub>2</sub>	Presencia de población
San Fernando	5	NO	MP10, SO <sub>2</sub>	Presencia de población
Tierra Amarilla	5,7	S	MP10, SO <sub>2</sub>	Presencia de población
Los Volcanes	7,2	NO	SO <sub>2</sub>	Presencia de población

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.4.1 MP10

En la Figura 6-12 se presenta la evolución de las concentraciones de MP10 medidas en las estaciones Copiapó, Paipote, San Fernando y Tierra Amarilla, ubicadas en las cercanías de la fundición Hernán Videla Lira. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 6-48, Tabla 6-49, Tabla 6-50 y Tabla 6-51, respectivamente.

De las cuatro estaciones, se observa que las concentraciones de la estación Copiapó son levemente inferiores, lo que se podría explicar por su mayor lejanía a la ubicación de la fundición. En todas las estaciones se nota una menor concentración el año 2019 con respecto a los años inmediatamente anteriores. Esto coincide con que ya se encontraba iniciado el requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para MP, SO<sub>2</sub> y As (diciembre 2018). Por otra parte, se distinguen mayores concentraciones en el año 2015 en todas las estaciones.



**Figura 6-12 Concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la estación Copiapó (ver Tabla 6-48) se observa que la concentración mediana se ha mantenido relativamente estable con un rango de 26 a 50 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. El 2019, año en que inicia el requisito de cumplimiento de la norma, presenta una reducción de todos los indicadores con respecto a los dos años anteriores. En cuanto al estadígrafo de máxima, existe mayor variación oscilando entre 93 y 340 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ].

**Tabla 6-48 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Copiapó**

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	122	145	122	172	109	121	122	0
<b>Max.</b>	112	340	98	128	196	98	93	S/I
<b>3rd Qu.</b>	44	88	33	46	40	34	34	S/I
<b>Mediana</b>	30	50	26	33	29	26	26	S/I
<b>1st Qu.</b>	22	25	18	24	23	20	21	S/I
<b>Min.</b>	10	13	11	14	14	8	12	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Paipote (ver Tabla 6-49) se observa que la concentración mediana se ha mantenido moderadamente estable en un rango de entre 36 y 74 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. Nuevamente, el 2019 presenta una reducción de todos los indicadores con respecto a los dos años anteriores. En cuanto al estadígrafo de máxima, existe una moderada variación oscilando entre 118 y 324 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ].

**Tabla 6-49 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Paipote**

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	122	138	121	171	121	121	119	0
<b>Max.</b>	148	324	130	225	199	118	185	S/I
<b>3rd Qu.</b>	78	120	52	71	68	46	59	S/I
<b>Mediana</b>	59	74	38	52	46	36	40	S/I
<b>1st Qu.</b>	46	46	27	38	38	30	33	S/I
<b>Min.</b>	17	26	11	11	23	14	23	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la estación San Fernando (ver Tabla 6-50) se observa una concentración mediana relativamente estable con un rango entre 42 y 120 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. En cuanto al estadígrafo de máxima, existe una mayor variación, oscilando entre 92 y 317 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. El 2019 presenta una menor concentración con respecto al 2018, coincidente con el inicio del requisito de cumplimiento de la norma.

**Tabla 6-50 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación San Fernando**

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	122	137	112	0	17	121	120	0
<b>Max.</b>	124	317	137	S/I	105	105	92	S/I
<b>3rd Qu.</b>	73	159	72	S/I	61	50	52	S/I
<b>Mediana</b>	58	120	56	S/I	53	42	42	S/I
<b>1st Qu.</b>	50	77	43	S/I	43	32	36	S/I
<b>Min.</b>	26	32	15	S/I	32	12	16	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Tierra Amarilla (Tabla 6-51) se observa una concentración mediana moderadamente estable, con un rango entre 41 y 65 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. Nuevamente, el 2019 presenta una reducción de todos los indicadores con respecto a los dos años anteriores. En cuanto al estadígrafo de máxima, existe una moderada variación de la concentración oscilando entre 118 y 263 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ].

**Tabla 6-51 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Tierra Amarilla**

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	122	138	122	171	121	121	122	0
<b>Max.</b>	126	263	122	169	188	118	125	S/I
<b>3rd Qu.</b>	74	90	57	71	75	54	59	S/I
<b>Mediana</b>	60	65	41	56	58	43	48	S/I
<b>1st Qu.</b>	50	50	31	43	48	37	40	S/I
<b>Min.</b>	22	19	19	21	26	22	23	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

#### 6.2.4.2 MP2,5

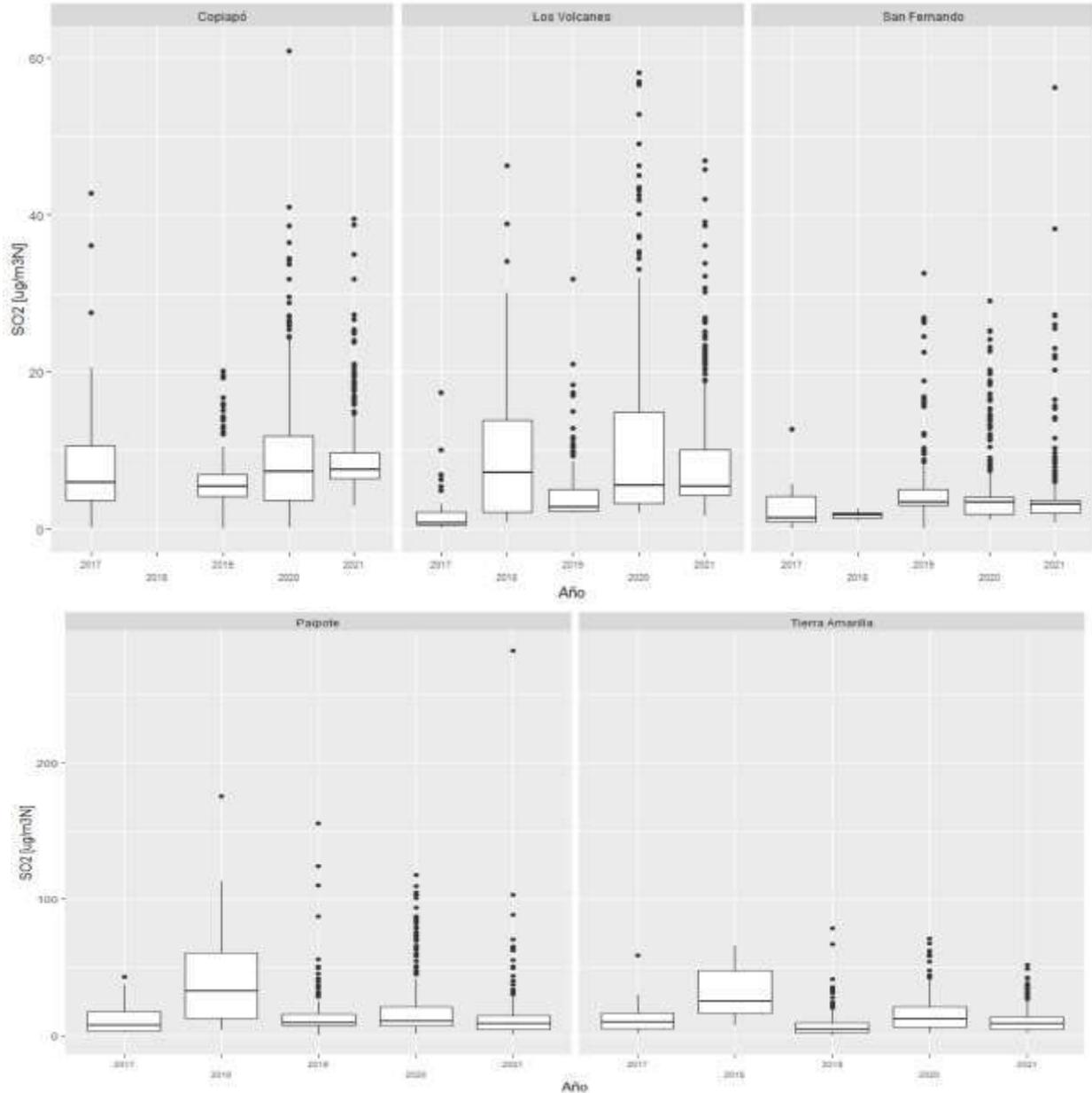
No se cuenta con antecedentes de MP2,5 para las estaciones cercanas a la fundición Hernán Videla Lira.

#### 6.2.4.3 SO<sub>2</sub>

En la Figura 6-13 se presenta la evolución de la concentración de SO<sub>2</sub> medida en las estaciones Copiapó, Los Volcanes, Paipote, San Fernando y Tierra Amarilla, ubicadas en las cercanías de la fundición Hernán Videla Lira. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 6-52, Tabla 6-53, Tabla 6-54, Tabla 6-55, y Tabla 6-56, respectivamente.

De las cinco estaciones, se observa que las concentraciones de las estaciones Paipote y Tierra Amarilla son más altos, especialmente antes del inicio del requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para MP, SO<sub>2</sub> y As (diciembre 2018), y se observa que a partir del año 2019

disminuyen. Los mayores valores de estas estaciones pueden tener relación con la cercanía de la estación Paipote a la fundición y a la dirección predominante de los vientos de norte a sur en la estación Tierra Amarilla de acuerdo con la Figura 8-22 de la Sección 8.4 del Informe NC. Por otra parte, en las estaciones Copiapó, Los Volcanes y San Fernando no se observa esta tendencia.



Nota: La gráfica del primer conjunto de estaciones (Copiapó, Los Volcanes y San Fernando) tienen escalas de concentración diferente al segundo conjunto (Paipote y Tierra Amarilla).

**Figura 6-13 Concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la estación Copiapó (ver Tabla 6-52) se observa que las concentraciones medianas se mantienen estables en un rango de 5,5 a 7,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. En cuanto al estadígrafo de máxima, los valores oscilan entre 20,1 y 61 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], sin apreciarse una tendencia clara y alcanzando el máximo el año 2020.

**Tabla 6-52 Estadígrafos concentraciones de  $\text{SO}_2$  [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Copiapó**

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	62	0	195	353	331
<b>Max.</b>	S/I	42,7	S/I	20,1	61,0	39,5
<b>3rd Qu.</b>	S/I	10,5	S/I	6,9	11,8	9,7
<b>Mediana</b>	S/I	5,9	S/I	5,5	7,3	7,5
<b>1st Qu.</b>	S/I	3,6	S/I	4,1	3,6	6,4
<b>Min.</b>	S/I	0,1	S/I	0,0	0,1	2,9

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Los Volcanes (ver Tabla 6-53) al igual que en las estaciones Paipote y Tierra Amarilla, se observa un año 2018 con concentraciones altas. Las medianas oscilan entre 0,8 y 5,6 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], exceptuando el año 2018. En cuanto al estadígrafo de máxima, no se observa una tendencia a disminuir posterior al inicio del requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión (diciembre 2018), con concentraciones que oscilan entre 31,8 y 58,2 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], mientras que en 2018 este valor es de 46,4 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ].

**Tabla 6-53 Estadígrafos concentraciones de  $\text{SO}_2$  [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Los Volcanes**

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	28	30	175	357	328
<b>Max.</b>	S/I	17,3	46,4	31,8	58,2	47,0
<b>3rd Qu.</b>	S/I	2,1	13,8	5,0	14,8	10,1
<b>Mediana</b>	S/I	0,8	7,1	2,7	5,6	5,5
<b>1st Qu.</b>	S/I	0,4	2,2	2,2	3,2	4,2
<b>Min.</b>	S/I	0,1	0,9	2,0	2,0	1,6

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Paipote (ver Tabla 6-54) se observa que a partir del 2019 las concentraciones medianas se mantienen estables en un rango de 8,7 a 10,3 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], valores bastante inferiores a la mediana de 2018 de 32,6 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. Un comportamiento temporal similar se presenta para el resto de los estadígrafos, con un cambio marcado coincidente con el inicio de la norma.

**Tabla 6-54 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Paipote**

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	32	30	195	360	329
<b>Max.</b>	S/I	43,2	175,2	155,6	117,9	282,3
<b>3rd Qu.</b>	S/I	17,5	60,5	15,6	20,9	14,8
<b>Mediana</b>	S/I	7,4	32,6	9,3	10,3	8,7
<b>1st Qu.</b>	S/I	3,3	12,5	7,4	6,9	4,6
<b>Min.</b>	S/I	2,0	3,8	0,0	1,2	0,7

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la estación San Fernando (ver Tabla 6-55) se observa que la concentración mediana aumenta y se mantiene estable entre 3,2 y 3,4 [µg/m<sup>3</sup>N] a partir del año 2019. Lo mismo sucede con las concentraciones máximas. Sin embargo, se debe tener en consideración que a partir del año 2019 hay más mediciones, lo que puede haber generado esta variación con las concentraciones de años anteriores.

**Tabla 6-55 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación San Fernando**

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	24	30	194	360	326
<b>Max.</b>	S/I	12,6	2,5	32,6	29,1	56,3
<b>3rd Qu.</b>	S/I	4,2	2,0	5,1	4,1	3,6
<b>Mediana</b>	S/I	1,3	1,8	3,3	3,4	3,2
<b>1st Qu.</b>	S/I	0,8	1,4	2,9	1,9	2,1
<b>Min.</b>	S/I	0,0	1,0	0,0	1,1	0,7

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

La estación Tierra Amarilla (Tabla 6-56) presenta un comportamiento muy similar a la estación Paipote, donde se observa que a partir del 2019 las concentraciones bajan considerablemente según todos los estadígrafos (sin considerar las máximas, que aumentan el año 2019). Las medianas a partir del 2019 (inclusive) presentan una variación entre 4,3 y 12 [µg/m<sup>3</sup>N], inferior al tramo anterior que presenta un rango de entre 10 y 24,7 [µg/m<sup>3</sup>N].

**Tabla 6-56 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Hernán Videla Lira, estación Tierra Amarilla**

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	32	30	194	359	331
<b>Max.</b>	S/I	58,6	65,6	78,8	70,8	52,0
<b>3rd Qu.</b>	S/I	16,2	48,0	9,4	20,8	13,4
<b>Mediana</b>	S/I	10,0	24,7	4,3	12,0	8,5
<b>1st Qu.</b>	S/I	5,3	16,4	2,0	6,5	4,6
<b>Min.</b>	S/I	1,4	7,7	0,0	1,5	1,5

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.5 Estaciones cercanas a fundición Ventanas

De forma de facilitar el análisis de las concentraciones a continuación, se presenta un resumen de las características de las diferentes estaciones cercanas a la fundición Ventanas.

**Tabla 6-57 Resumen estaciones fundición Ventanas**

Estación	Distancia [km]	Dirección desde fundición	Representatividad	Características
La Greda	2	NE	MP10, MP2.5, SO <sub>2</sub>	Presencia de población
Los Maitenes	2,7	E	MP10, MP2.5, SO <sub>2</sub>	Zona poco poblada
Puchuncaví	8,7	NE	MP10, MP2.5, SO <sub>2</sub>	Presencia de población
Quintero	5,0	O	MP10, MP2.5, SO <sub>2</sub>	Presencia de población
Quintero Centro*	5,3	O	MP10, SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , CO, O <sub>3</sub> , Pb	Presencia de población
Sur	4	S	N/A	En zona no poblada
Valle Alegre	6,4	SE	MP10, MP2.5, SO <sub>2</sub>	Presencia de población
Ventanas*	2,6	N	N/A	Presencia de población

Nota: N/A indica que la estación no tiene representatividad poblacional para ningún contaminante.

Nota 2: Las estaciones marcadas con \* utilizan la representatividad indicada en el SINCA, ya que no se encontró información de otra fuente.

Fuente: Elaboración propia

Además, se presentan las características de las estaciones asociadas a la refinera ENAP.

**Tabla 6-58 Resumen estaciones refinera ENAP**

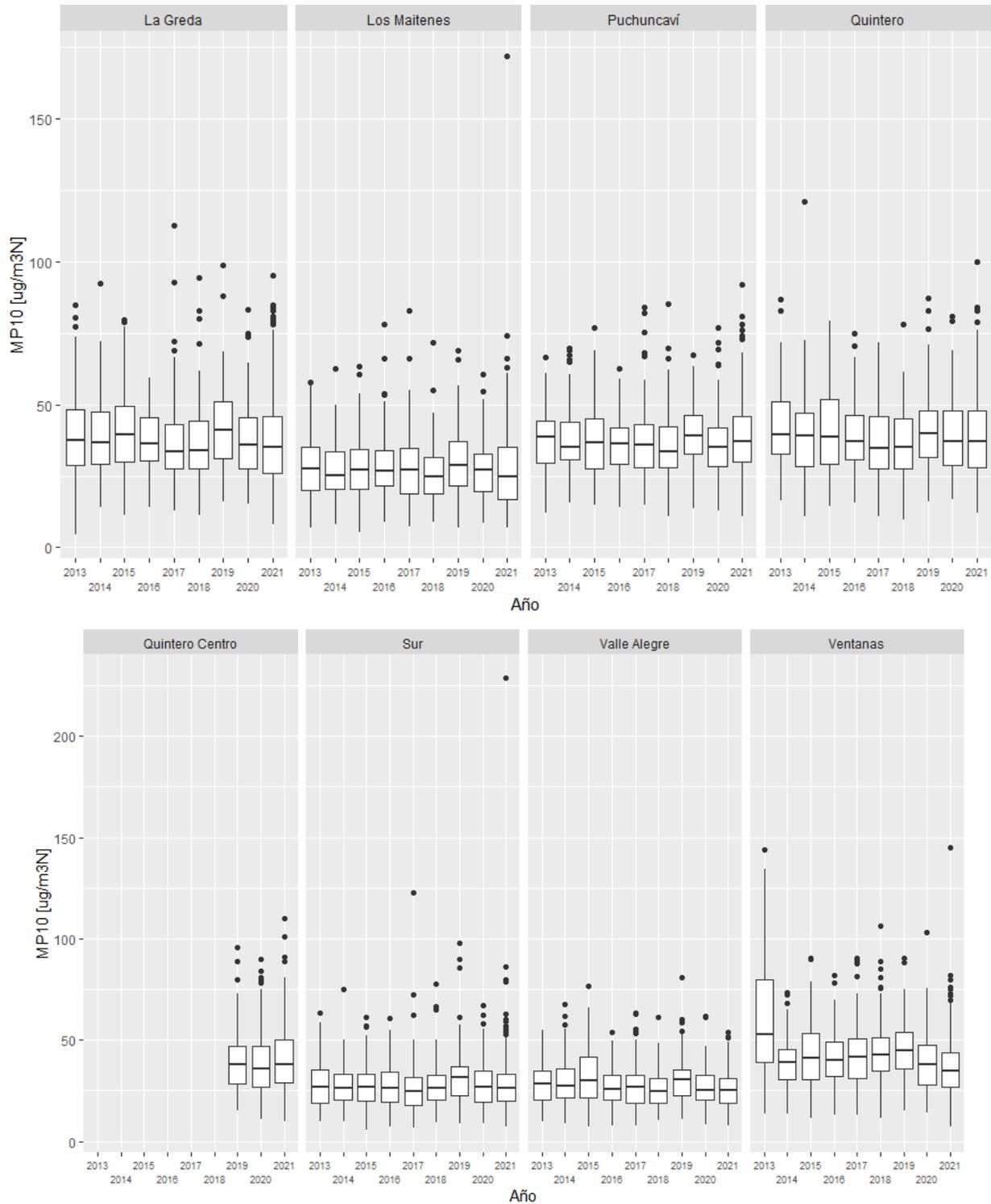
Estación	Distancia [km]	Dirección desde fundición	Representatividad	Características
Colmo	4,9	E	MP10, SO <sub>2</sub>	Zona poco poblada
Concón	2,2	SO	MP10, MP2.5, SO <sub>2</sub>	Presencia de población
Junta de Vecinos	3,2	SO	MP10, SO <sub>2</sub>	Presencia de población
Las Gaviotas	1,6	E	SO <sub>2</sub>	Zona poco poblada

Fuente: Elaboración propia

#### 6.2.5.1 MP10

En la Figura 6-14 se presenta la evolución de la concentración de MP10 medida en las estaciones La Greda, Los Maitenes, Puchuncaví, Quintero, Quintero Centro, Sur, Valle Alegre y Ventanas, ubicadas en las cercanías de la fundición Ventanas. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan a continuación, desde la Tabla 6-59 a la Tabla 6-66.

Todas las estaciones presentan concentraciones similares y relativamente estables, excepto por la estación Ventanas que presenta una concentración levemente superior, especialmente en el año 2013 que llega a una mediana de 53 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. No se observa ningún cambio perceptible para el año 2017, en el cual inicia el requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión (diciembre 2016) para la fundición de Ventanas. Sí se observa en todas las estaciones un leve aumento en las concentraciones del año 2019 en comparación a los años cercanos.

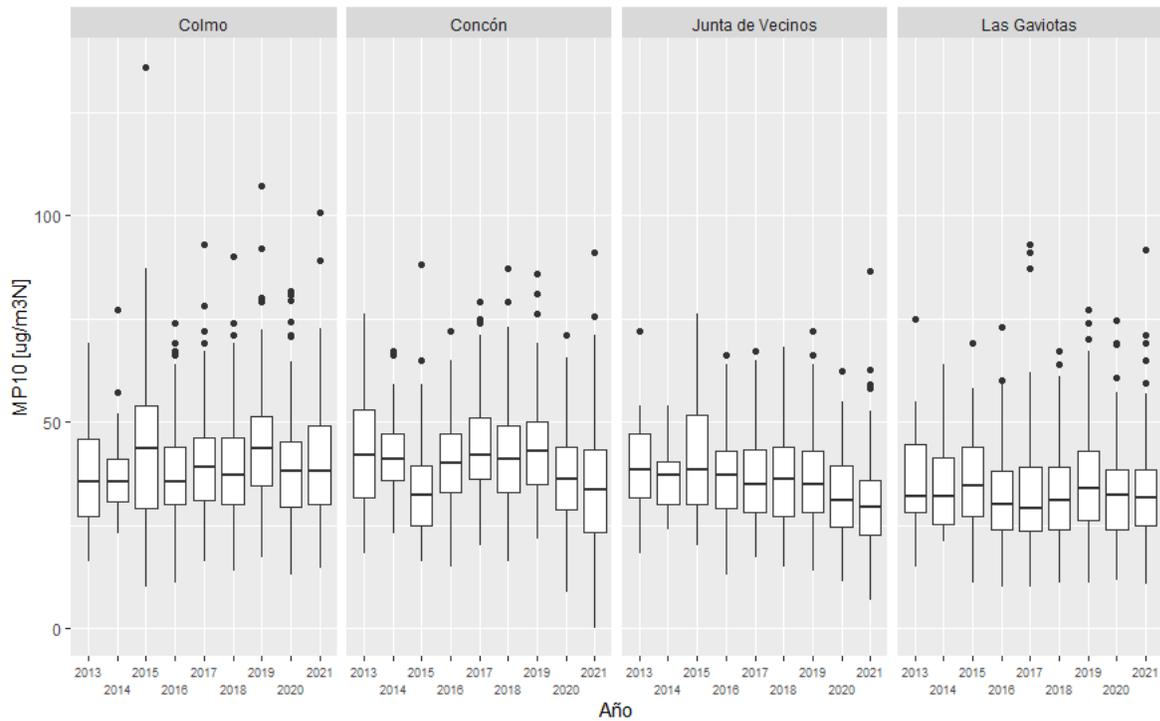


Nota: La gráfica de estaciones Quintero Centro, Sur, Valle Alegre y Ventanas tiene una escala diferente a las de las otras estaciones.

**Figura 6-14 Concentraciones de MP10 [µg/m³N] en cercanías fundición Ventanas, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6-15 se presenta la evolución de la concentración de MP10 medida en las estaciones Colmo, Concón, Junta de Vecinos y Las Gaviotas, de la Refinería ENAP. De las cuatro estaciones, se observa que los valores son similares entre ellas. Se repite entre las estaciones una leve tendencia a la baja para los últimos tres años. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 6-67, Tabla 6-68, Tabla 6-69, Tabla 6-70, respectivamente.



**Figura 6-15 Concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías refinería ENAP, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En los siguientes estadígrafos se observa que en general, en todas las estaciones hay una tendencia a la disminución de la concentración mediana para los últimos tres años. Además, se observa un pequeño aumento en el 2019 con respecto a los años cercanos. Las medianas de las estaciones La Greda, Los Maitenes, Puchuncaví, Quintero, Quintero Centro, Sur y Valle Alegre se encuentran dentro del rango entre 25 y 41 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ].

**Tabla 6-59 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación La Greda**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	142	121	120	121	120	122	121	121	309
<b>Max.</b>	85	92	80	60	113	94	99	83	95
<b>3rd Qu.</b>	48	47	49	46	43	44	51	46	46
<b>Mediana</b>	38	37	39	36	34	34	41	36	35
<b>1st Qu.</b>	29	29	30	30	28	27	31	28	26
<b>Min.</b>	5	14	11	14	13	11	16	15	8

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-60 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Los Maitenes**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	140	120	120	122	122	121	121	122	313
<b>Max.</b>	58	63	63	78	83	72	69	61	172
<b>3rd Qu.</b>	35	34	34	34	35	32	37	33	35
<b>Mediana</b>	28	25	27	27	27	25	29	27	25
<b>1st Qu.</b>	20	21	21	22	19	19	22	20	17
<b>Min.</b>	7	8	5	9	7	9	7	8	7

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-61 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Puchuncaví**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	111	122	121	122	122	122	120	121	313
<b>Max.</b>	67	70	77	63	84	85	67	77	92
<b>3rd Qu.</b>	44	44	45	42	43	42	46	42	46
<b>Mediana</b>	39	35	37	36	36	34	39	35	37
<b>1st Qu.</b>	30	31	28	29	28	28	33	28	30
<b>Min.</b>	12	16	15	14	15	11	14	13	11

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-62 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	110	122	120	121	121	119	120	122	311
<b>Max.</b>	87	121	79	75	72	78	87	81	100
<b>3rd Qu.</b>	51	47	52	46	46	45	48	48	48
<b>Mediana</b>	40	39	39	37	35	35	40	37	37
<b>1st Qu.</b>	33	28	29	31	27	27	32	29	28
<b>Min.</b>	17	11	14	15	11	10	16	17	12

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-63 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero Centro**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	0	0	0	174	365	332
<b>Max.</b>	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	96	90	110
<b>3rd Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	47	47	50
<b>Mediana</b>	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	38	36	38
<b>1st Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	28	27	29
<b>Min.</b>	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	15	11	10

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-64 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Sur**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	139	120	120	121	119	119	118	120	312
<b>Max.</b>	63	75	61	61	123	77	98	67	229
<b>3rd Qu.</b>	35	33	33	34	32	33	37	35	33
<b>Mediana</b>	27	26	27	26	25	26	32	27	27
<b>1st Qu.</b>	19	20	20	19	18	20	23	20	20
<b>Min.</b>	10	10	6	7	7	9	9	9	7

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-65 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Valle Alegre**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	110	121	119	122	119	120	120	122	311
<b>Max.</b>	55	68	77	54	63	62	81	62	54
<b>3rd Qu.</b>	35	36	42	33	33	31	35	32	31
<b>Mediana</b>	28	28	30	26	27	25	30	25	25
<b>1st Qu.</b>	21	22	22	20	19	19	23	20	19
<b>Min.</b>	10	9	7	8	8	11	11	9	8

Fuente: Elaboración propia

De las estaciones cercanas a la fundición Ventanas la única que presenta un comportamiento distinto es la estación Ventanas (ver Tabla 6-66). En esta se pueden ver concentraciones medianas que oscilan entre 53 y 35 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] para los años 2013 y 2021, respectivamente.

**Tabla 6-66 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Ventanas**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	211	120	118	122	122	119	121	121	309
<b>Max.</b>	144	73	91	82	91	106	91	103	145
<b>3rd Qu.</b>	80	45	53	49	51	51	54	48	44
<b>Mediana</b>	53	39	41	40	42	43	45	38	35
<b>1st Qu.</b>	39	31	30	32	31	35	36	28	27
<b>Min.</b>	14	14	11	13	13	12	15	14	11

Fuente: Elaboración propia

En los siguientes estadígrafos se observa que, en general, en todas las estaciones cercanas a la refinería ENAP hay una tendencia a la disminución de la concentración mediana para los últimos tres años. Las concentraciones medianas de las estaciones Colmo, Concón, Junta de Vecinos y Las Gaviotas se encuentran dentro del rango entre 29 y 44 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ].

**Tabla 6-67 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Colmo**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	24	24	22	122	122	122	112	120	101
<b>Max.</b>	69	77	136	74	93	90	107	82	101
<b>3rd Qu.</b>	46	41	54	44	46	46	51	45	49
<b>Mediana</b>	36	36	44	36	39	37	44	38	38
<b>1st Qu.</b>	27	31	29	30	31	30	34	29	30
<b>Min.</b>	16	23	10	11	16	14	17	13	14

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-68 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Concón**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	22	24	51	122	123	122	111	121	132
<b>Max.</b>	76	67	88	72	79	87	86	71	91
<b>3rd Qu.</b>	53	47	39	47	51	49	50	44	43
<b>Mediana</b>	42	41	32	40	42	41	43	36	34
<b>1st Qu.</b>	32	36	25	33	36	33	35	29	23
<b>Min.</b>	18	23	16	15	20	16	22	9	0

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-69 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías refinería ENAP  
Aconcagua, estación Junta de Vecinos**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	24	20	22	121	124	120	112	122	100
<b>Max.</b>	72	54	76	66	67	68	72	62	87
<b>3rd Qu.</b>	47	40	52	43	43	44	43	39	36
<b>Mediana</b>	39	37	39	37	35	36	35	31	29
<b>1st Qu.</b>	32	30	30	29	28	27	28	24	23
<b>Min.</b>	18	24	20	13	17	15	14	11	7

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-70 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías refinería ENAP  
Aconcagua, estación Las Gaviotas**

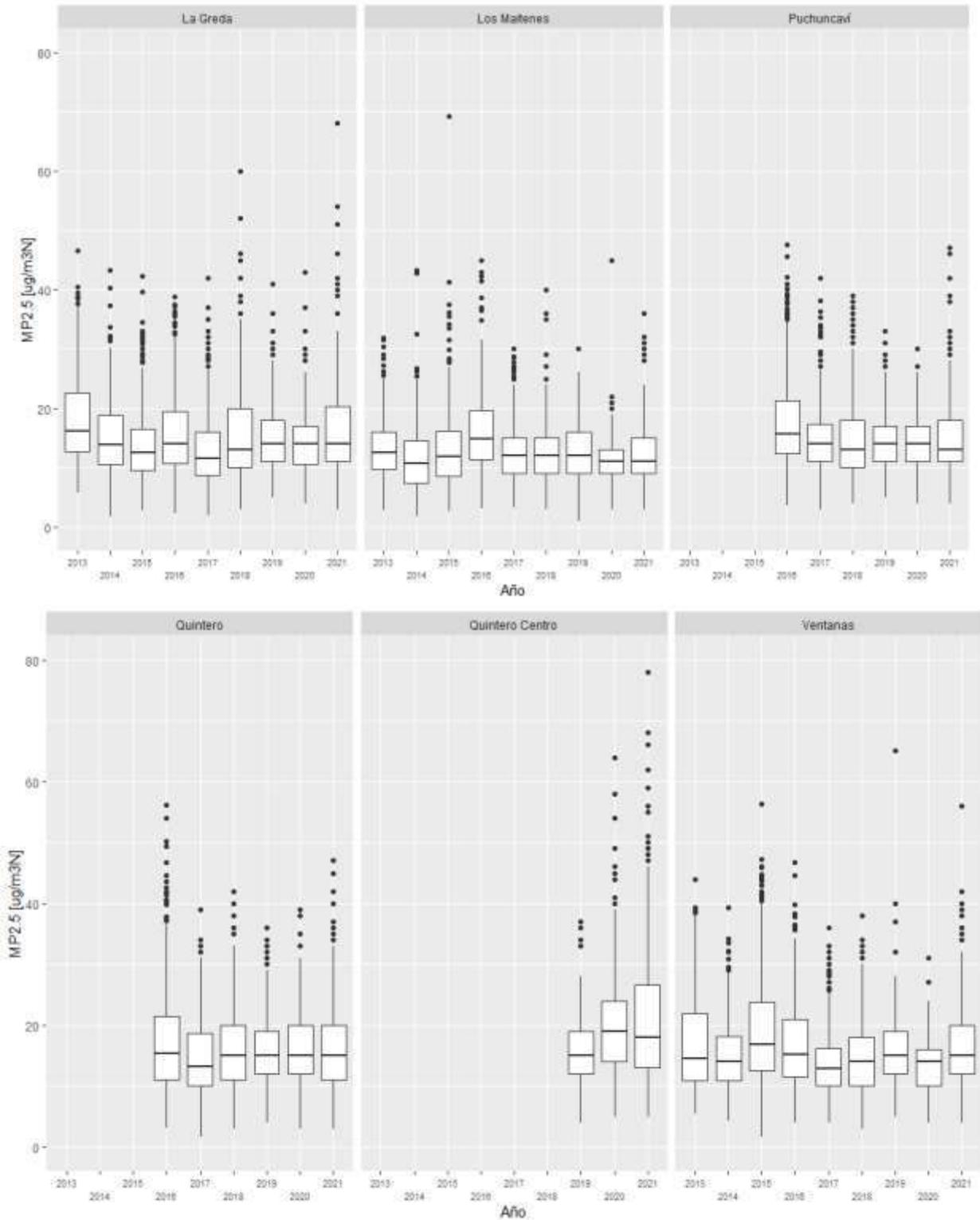
Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	24	24	22	121	123	121	111	121	100
<b>Max.</b>	75	64	69	73	93	67	77	75	92
<b>3rd Qu.</b>	45	41	44	38	39	39	43	38	38
<b>Mediana</b>	32	32	35	30	29	31	34	32	32
<b>1st Qu.</b>	28	25	27	24	24	24	26	24	25
<b>Min.</b>	15	21	11	10	10	11	11	12	11

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.5.2 MP2,5

En la Figura 6-16 se presenta la evolución de la concentración de MP2,5 medida en las estaciones La Greda, Los Maitenes, Puchuncaví, Quintero, Ventanas y Quintero Centro, ubicadas en las cercanías de la fundición Ventanas. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan a continuación, en la Tabla 6-71, la Tabla 6-72, la Tabla 6-73, la Tabla 6-74, y la Tabla 6-75 y la Tabla 6-79.

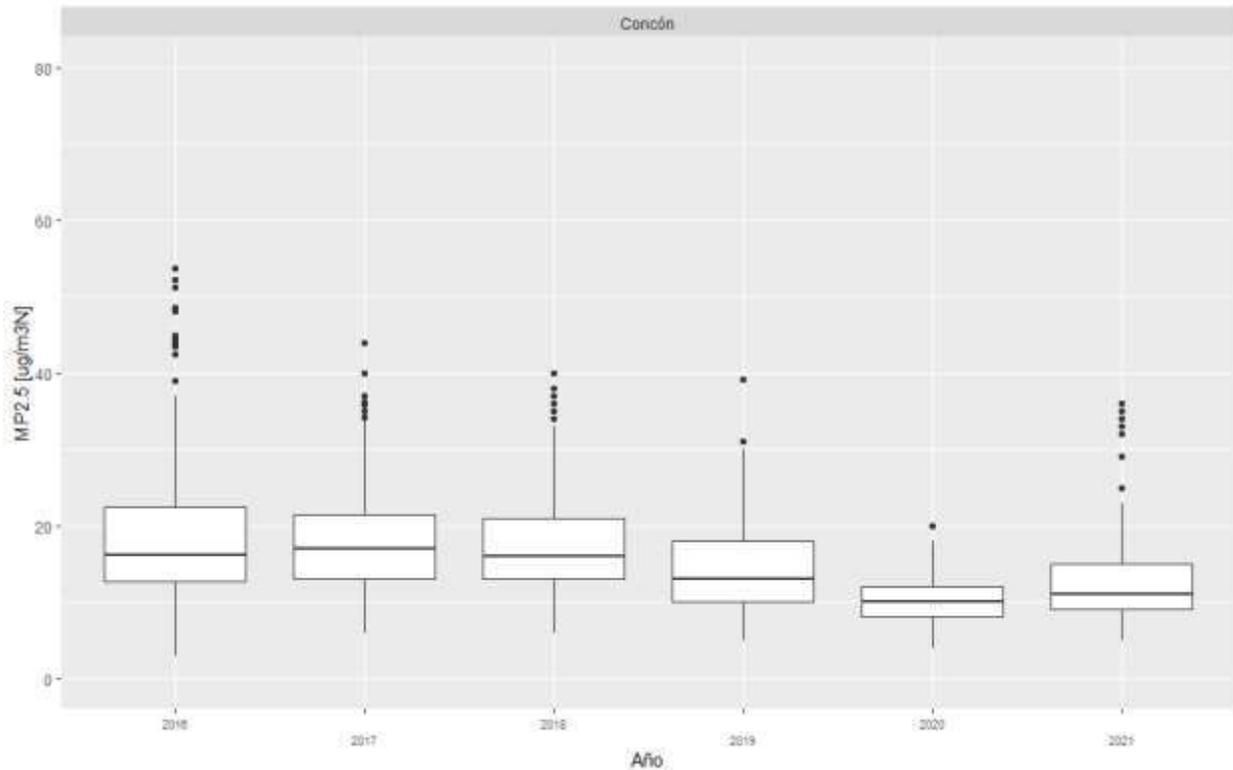
De las todas las estaciones, se observa que las concentraciones de la estación Los Maitenes son levemente inferiores. El resto de las estaciones presenta un comportamiento similar a lo largo del tiempo. Cabe resaltar que un patrón común a todas las estaciones es que, para las estaciones con datos, el año 2017 tuvo una menor concentración al año anterior. Esta disminución coincide con el inicio del requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para MP, SO<sub>2</sub> y As (diciembre 2016). Para este contaminante no se observa una tendencia general a la baja, por lo menos a partir del 2017.



**Figura 6-16 Concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6-17 se presenta la evolución de la concentración de MP2,5 medida en la estación Concón, de la Refinería ENAP, cuyos estadígrafos se presentan en la Tabla 6-77. Se observa una disminución de la concentración mediana y los cuartiles en el periodo 2018-2020, para luego observarse un leve repunte en el año 2021.



**Figura 6-17 Concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías refinería ENAP, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En los siguientes estadígrafos se observa que en general, en todas las estaciones hay un comportamiento medianamente estable de la concentración mediana. Además, se observa una pequeña disminución de la concentración mediana del año 2017 en comparación al 2016. Las concentraciones medianas de las estaciones La Greda, Los Maitenes, Puchuncaví, Quintero, Sur y Valle Alegre se encuentran dentro del rango entre 11 y 17 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. Respecto de los valores máximo hay más heterogeneidad, oscilando entre 30 y 69 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ].

**Tabla 6-71 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación La Greda**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	362	358	357	358	357	345	353	355	320
<b>Max.</b>	47	43	42	39	42	60	41	43	68
<b>3rd Qu.</b>	23	19	16	19	16	20	19	17	20
<b>Mediana</b>	16	14	12	14	11	13	14	14	14
<b>1st Qu.</b>	13	11	10	11	9	10	11	11	11
<b>Min.</b>	6	2	3	2	2	3	5	4	3

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-72 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Los Maitenes**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	355	362	352	359	361	355	354	352	309
<b>Max.</b>	32	43	69	45	30	40	30	45	36
<b>3rd Qu.</b>	16	15	16	20	15	15	16	13	15
<b>Mediana</b>	13	11	12	15	12	12	12	11	11
<b>1st Qu.</b>	10	7	9	11	9	9	9	9	9
<b>Min.</b>	3	2	3	3	3	3	1	3	3

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-73 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Puchuncaví**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	332	363	361	360	361	324
<b>Max.</b>	S/I	S/I	S/I	48	42	39	33	30	47
<b>3rd Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	21	17	18	17	17	18
<b>Mediana</b>	S/I	S/I	S/I	16	14	13	14	14	13
<b>1st Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	12	11	10	11	11	11
<b>Min.</b>	S/I	S/I	S/I	4	3	4	5	4	4

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-74 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	332	361	342	356	352	322
<b>Max.</b>	S/I	S/I	S/I	56	39	42	36	39	47
<b>3rd Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	21	18	20	19	20	20
<b>Mediana</b>	S/I	S/I	S/I	15	13	15	15	15	15
<b>1st Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	11	10	10	12	12	11
<b>Min.</b>	S/I	S/I	S/I	3	2	3	4	3	3

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-75 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Ventanas**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	345	345	353	361	360	359	358	363	331
<b>Max.</b>	44	39	56	47	36	38	65	31	56
<b>3rd Qu.</b>	22	18	24	21	16	18	19	16	20
<b>Mediana</b>	15	14	17	15	13	14	15	14	15
<b>1st Qu.</b>	11	11	13	11	10	10	12	10	12
<b>Min.</b>	5	4	2	4	4	3	5	4	4

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

La estación Quintero Centro (ver Tabla 6-76) posee un comportamiento diferente a las estaciones anteriores, al presentar concentraciones mayores al resto y una leve tendencia al alza para varios de sus estadígrafos. Las medianas de concentración oscilan entre 15 y 19 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], el percentil 75 (o tercer cuartil) ha aumentado desde 19 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] el 2019 a 27 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en el 2021.

**Tabla 6-76 Estadígrafos concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero Centro**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	0	0	0	173	366	335
<b>Max.</b>	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	37	64	78
<b>3rd Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	19	24	27
<b>Mediana</b>	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	15	19	18
<b>1st Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	12	14	13
<b>Min.</b>	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	4	5	5

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Concón (ver Tabla 6-77) se observa que la mediana de las concentraciones se ubica en el rango de 10 a 17 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. En cuanto a valores máximos, los mayores valores se observan en 2016, alcanzando 54 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ].

**Tabla 6-77 Estadígrafos concentraciones de MP<sub>2,5</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Concón**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	0	0	279	350	347	345	354	329
<b>Max.</b>	S/I	S/I	S/I	54	44	40	31	20	36
<b>3rd Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	22	22	22	17	12	15
<b>Mediana</b>	S/I	S/I	S/I	16	17	17	13	10	11
<b>1st Qu.</b>	S/I	S/I	S/I	13	13	13	10	8	9
<b>Min.</b>	S/I	S/I	S/I	3	6	6	5	4	5

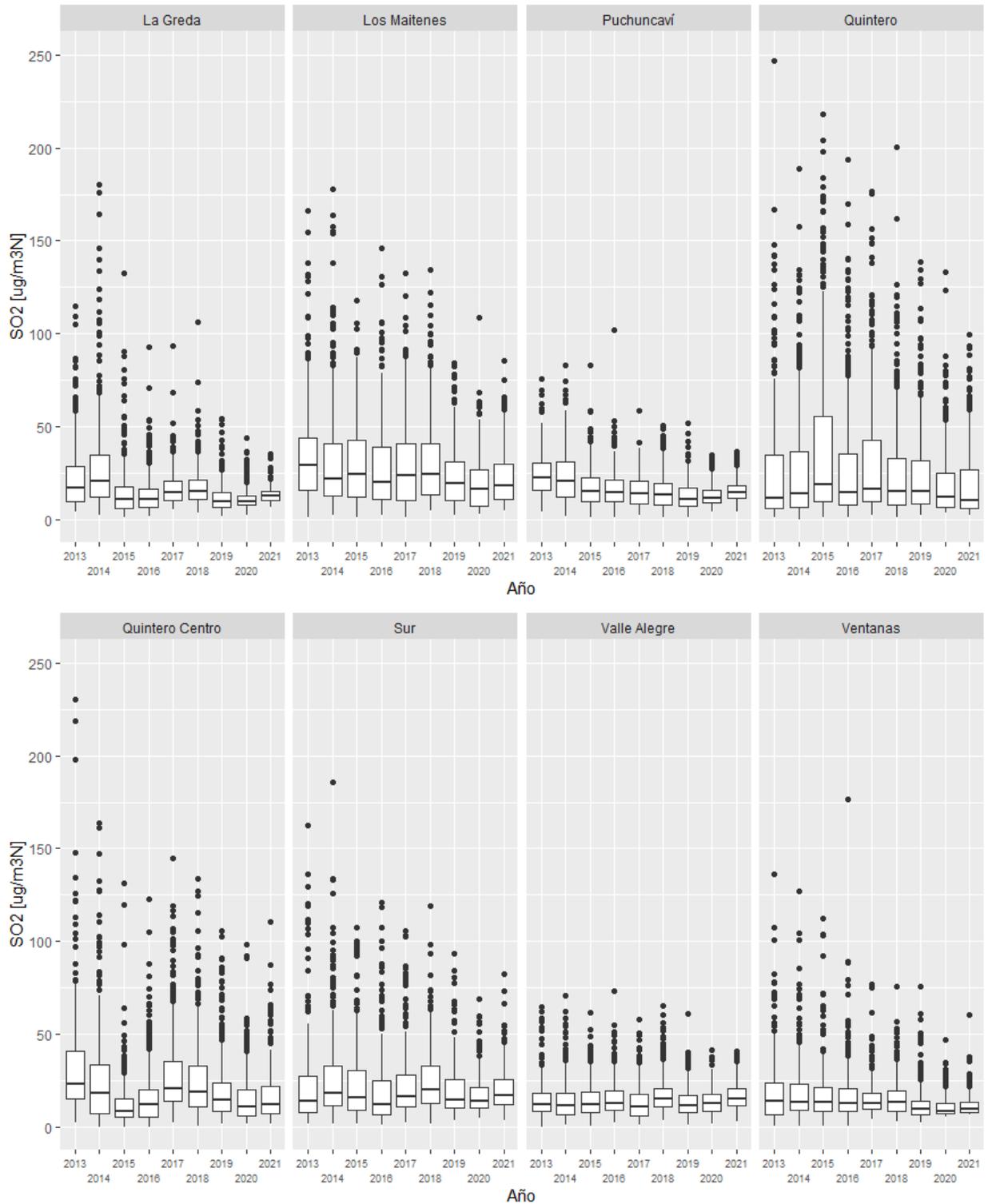
S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.5.3 SO<sub>2</sub>

En la Figura 6-18 se presenta la evolución de la concentración de SO<sub>2</sub> medida en las estaciones La Greda, Los Maitenes, Puchuncaví, Quintero, Quintero Centro, Sur, Valle Alegre y Ventanas, ubicadas en las cercanías de la fundición Ventanas. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan a continuación, desde la Tabla 6-78 a la Tabla 6-85.

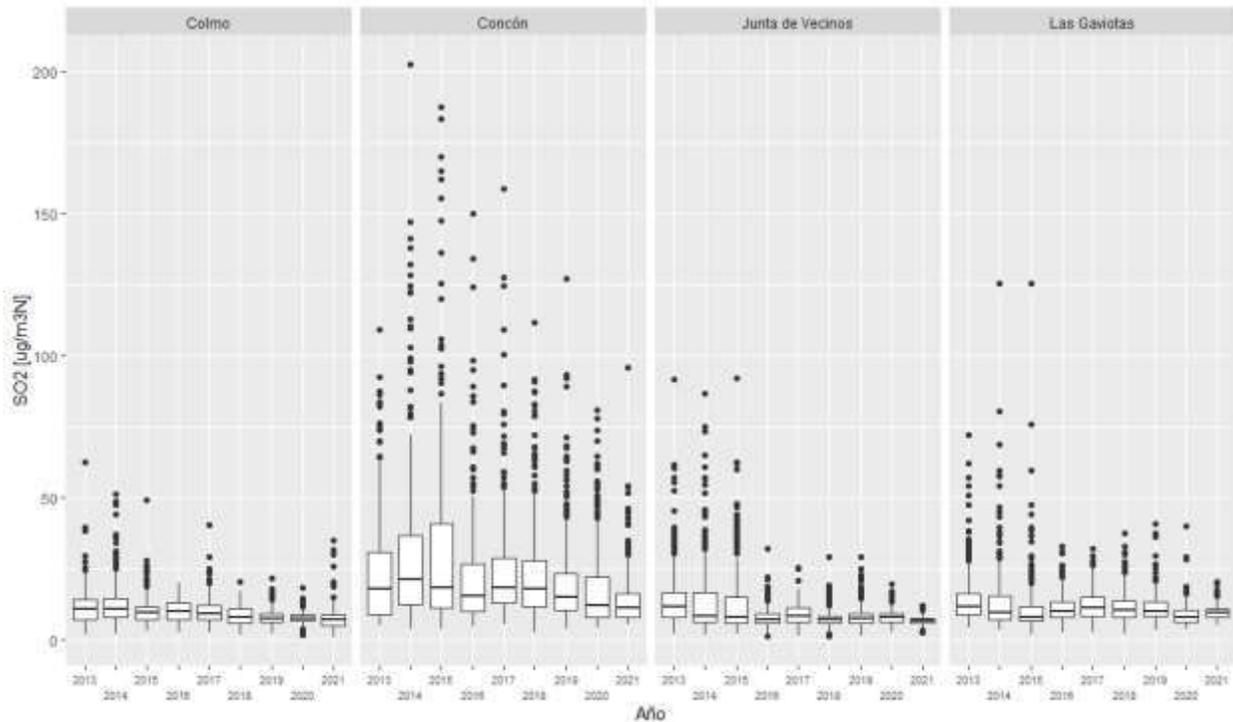
De las todas las estaciones, se observa que las concentraciones de la estación Quintero y Los Maitenes son levemente superiores. La estación Quintero presenta el mayor valor máximo registrado, en el año 2013, seguido por la estación Quintero Centro, para el mismo año. Esto es debido a que ciertas condiciones meteorológicas producen que las emisiones de la fundición se dirijan a estas estaciones. Para todas las estaciones se observa una tendencia clara a la disminución en los valores máximos a través del tiempo. No se distingue ningún cambio notorio que coincida con el inicio del requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para MP, SO<sub>2</sub> y As (diciembre 2016).



**Figura 6-18 Concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Ventanas, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6-19 se presenta la evolución de las concentraciones de SO<sub>2</sub> medida en las estaciones Colmo, Concón, Junta de Vecinos y Las Gaviotas, de la Refinería ENAP. Al igual que en las estaciones anteriores se observa una clara tendencia a la disminución en las concentraciones máximas. De las cuatro estaciones, la estación Concón presenta valores mayores, le siguen las estaciones Junta de Vecinos y Las Gaviotas con valores similares entre sí y, por último, la estación Colmo con valores notablemente menores. Las concentraciones bajas de la estación Colmo son esperables si se considera que se encuentra en una zona alejada de la refinería, con menor población y actividad industrial.



**Figura 6-19 Concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías refinería ENAP, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En los siguientes estadígrafos se observa que en general, en todas las estaciones hay un comportamiento medianamente estable de la concentración mediana, con una leve tendencia a la baja. Las medianas de las estaciones La Greda, Puchuncaví, Quintero, Quintero Centro, Sur, Valle Alegre y Ventanas se encuentran dentro del rango de 8,0 y 23,1 [µg/m<sup>3</sup>N]. La estación Los Maitenes presenta una concentración mediana levemente superior con medianas entre 16,0 y 29,0 [µg/m<sup>3</sup>N]. La disminución de la concentración máxima se puede notar en que, en el año 2013, el valor máximo de todas las estaciones está entre 64,8 y 247,1 [µg/m<sup>3</sup>N], para el 2021 en cambio las concentraciones bajan a un rango de entre 35,0 y 110,4 [µg/m<sup>3</sup>N].

**Tabla 6-78 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Ventanas, estación La Greda**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	363	363	362	365	362	364	365	366	333
<b>Max.</b>	114,9	180,1	132,4	92,8	93,4	106,0	54,0	44,0	35,0
<b>3rd Qu.</b>	28,8	34,4	17,6	16,1	20,4	21,2	14,3	12,4	14,8
<b>Mediana</b>	16,9	20,3	10,8	10,8	14,7	15,3	9,9	9,7	12,4
<b>1st Qu.</b>	9,4	12,0	6,1	6,6	10,0	10,8	6,6	7,5	10,2
<b>Min.</b>	4,1	2,3	1,0	1,5	5,3	3,2	1,5	2,0	6,5

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-79 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Ventanas, estación Los Maitenes**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	360	364	361	366	361	364	365	363	334
<b>Max.</b>	166,4	177,9	117,8	146,1	132,6	134,5	84,0	108,9	85,6
<b>3rd Qu.</b>	43,7	40,7	42,7	38,7	40,9	40,9	31,0	26,5	30,0
<b>Mediana</b>	29,0	21,6	24,4	19,8	23,8	24,4	19,2	16,0	18,3
<b>1st Qu.</b>	15,5	12,6	12,2	11,1	10,4	13,1	10,1	7,3	10,7
<b>Min.</b>	0,9	2,0	0,8	2,5	0,8	4,4	2,3	2,6	4,9

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-80 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Ventanas, estación Puchuncaví**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	362	365	364	365	365	365	365	366	334
<b>Max.</b>	75,6	83,1	82,7	102,1	58,3	50,4	51,7	34,9	36,3
<b>3rd Qu.</b>	30,4	31,0	22,1	21,3	20,6	19,6	16,7	15,9	18,0
<b>Mediana</b>	22,1	20,4	15,1	14,6	14,1	13,2	11,0	11,5	14,5
<b>1st Qu.</b>	15,4	12,2	9,3	9,8	8,4	7,9	6,9	8,8	11,3
<b>Min.</b>	4,3	1,7	1,1	1,1	2,0	0,9	1,0	3,9	4,2

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-81 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	361	365	364	363	364	363	363	366	334
<b>Max.</b>	247,1	189,0	217,9	193,8	176,5	200,2	138,6	133,0	99,5
<b>3rd Qu.</b>	34,8	36,3	55,4	35,0	42,7	33,1	31,7	25,0	26,6
<b>Mediana</b>	11,2	13,7	18,4	14,5	16,2	15,3	15,2	11,8	10,3
<b>1st Qu.</b>	5,7	6,3	9,4	7,7	9,4	7,9	8,5	6,3	5,9
<b>Min.</b>	1,2	0,1	0,7	1,2	2,2	1,1	2,3	3,3	2,1

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-82 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Ventanas, estación Quintero Centro**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	290	356	348	350	362	362	361	366	332
<b>Max.</b>	230,4	163,7	131,3	122,8	144,7	133,7	105,7	98,5	110,4
<b>3rd Qu.</b>	40,4	33,4	14,8	19,8	35,3	32,9	23,7	19,7	21,8
<b>Mediana</b>	23,1	18,0	8,0	11,8	20,8	19,0	14,6	10,7	11,8
<b>1st Qu.</b>	14,8	7,0	5,2	5,3	13,8	10,6	8,2	5,9	7,2
<b>Min.</b>	2,3	0,0	0,0	0,0	2,1	0,2	1,9	1,4	1,3

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-83 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Ventanas, estación Sur**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	360	331	242	363	360	361	364	365	334
<b>Max.</b>	162,6	185,7	107,3	121,1	105,6	118,8	93,3	68,9	82,5
<b>3rd Qu.</b>	27,4	33,1	30,3	24,6	27,8	32,6	25,5	21,4	25,3
<b>Mediana</b>	13,9	17,9	15,8	12,2	16,6	19,8	14,6	14,0	17,0
<b>1st Qu.</b>	8,0	11,6	9,2	6,6	10,9	12,4	10,3	10,2	12,0
<b>Min.</b>	1,5	1,6	1,9	1,2	2,5	1,5	3,4	4,4	3,5

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-84 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Ventanas, estación Valle Alegre**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	360	362	360	366	325	359	356	362	331
<b>Max.</b>	64,8	70,7	61,6	73,1	57,9	65,0	60,9	41,2	40,9
<b>3rd Qu.</b>	18,1	18,1	18,7	19,3	17,4	20,7	17,1	17,7	20,7
<b>Mediana</b>	12,0	11,7	11,8	12,9	10,5	14,8	11,4	12,6	15,3
<b>1st Qu.</b>	8,6	6,6	7,5	8,9	6,0	10,5	7,8	8,4	11,2
<b>Min.</b>	0,0	0,9	0,3	2,0	1,0	3,2	1,0	1,7	3,1

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-85 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Ventanas, estación Ventanas**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	351	355	357	366	362	361	363	365	334
<b>Max.</b>	136,4	126,7	112,1	176,4	76,9	75,5	75,5	46,7	60,5
<b>3rd Qu.</b>	23,8	23,1	21,0	20,4	18,0	19,4	14,0	12,8	13,4
<b>Mediana</b>	14,0	13,4	13,1	12,4	12,8	12,9	9,5	8,5	9,7
<b>1st Qu.</b>	6,3	8,8	8,3	8,6	9,4	8,3	6,6	7,1	7,7
<b>Min.</b>	0,7	0,2	0,5	0,6	4,2	2,9	2,1	5,1	6,3

Fuente: Elaboración propia

En los siguientes estadígrafos se observa que en general, en todas las estaciones hay una leve tendencia a la disminución de la concentración mediana, pero una marcada tendencia a la disminución de los valores máximos. La estación Concón (ver Tabla 6-87) presenta concentraciones altas respecto del resto de las estaciones, con una concentración mediana que oscila entre 11,3 y 21,6  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$ . En cambio, en las estaciones Colmo, Junta de Vecinos y Las Gaviotas (ver Tabla 6-86, Tabla 6-88 y Tabla 6-89) la concentración mediana se mueve en rangos menores de entre 6,8 y 12  $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$ .

**Tabla 6-86 Estadígrafos concentraciones de  $\text{SO}_2$   $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Colmo**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	349	354	362	364	356	246	363	362	328
<b>Max.</b>	62,8	51,2	49,5	20,3	40,4	20,8	21,7	18,3	35,3
<b>3rd Qu.</b>	14,4	14,7	11,9	12,9	12,3	10,8	9,3	8,7	9,1
<b>Mediana</b>	10,8	10,9	9,5	10,3	9,3	8,2	7,8	7,7	7,1
<b>1st Qu.</b>	7,5	8,0	7,3	7,4	7,1	6,0	6,3	6,7	5,1
<b>Min.</b>	2,0	2,2	3,2	2,7	2,6	1,7	2,1	1,7	1,1

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-87 Estadígrafos concentraciones de  $\text{SO}_2$   $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Concón**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	360	359	365	364	359	363	365	363	334
<b>Max.</b>	109,3	202,6	187,5	150,1	158,9	111,6	127,0	80,7	95,9
<b>3rd Qu.</b>	31,0	36,8	40,9	26,8	29,1	28,0	23,3	22,1	16,5
<b>Mediana</b>	18,0	21,6	18,6	15,6	18,7	17,9	15,1	12,3	11,3
<b>1st Qu.</b>	9,0	12,6	11,5	10,0	13,2	11,7	10,5	8,2	7,9
<b>Min.</b>	5,0	3,9	4,1	4,7	5,7	2,5	3,7	4,3	5,5

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-88 Estadígrafos concentraciones de  $\text{SO}_2$   $[\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}]$  en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Junta de Vecinos**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	347	354	358	365	363	356	357	366	334
<b>Max.</b>	91,6	86,9	92,1	32,2	25,7	29,4	29,5	19,6	12,3
<b>3rd Qu.</b>	17,0	16,8	15,3	9,3	11,3	8,5	9,5	9,2	7,8
<b>Mediana</b>	11,7	8,6	8,0	7,3	8,7	7,3	7,8	8,1	6,8
<b>1st Qu.</b>	8,2	6,4	6,2	6,2	6,5	6,1	6,1	6,5	6,1
<b>Min.</b>	2,4	2,0	2,4	1,4	1,6	1,6	1,2	2,7	2,5

Fuente: Elaboración propia

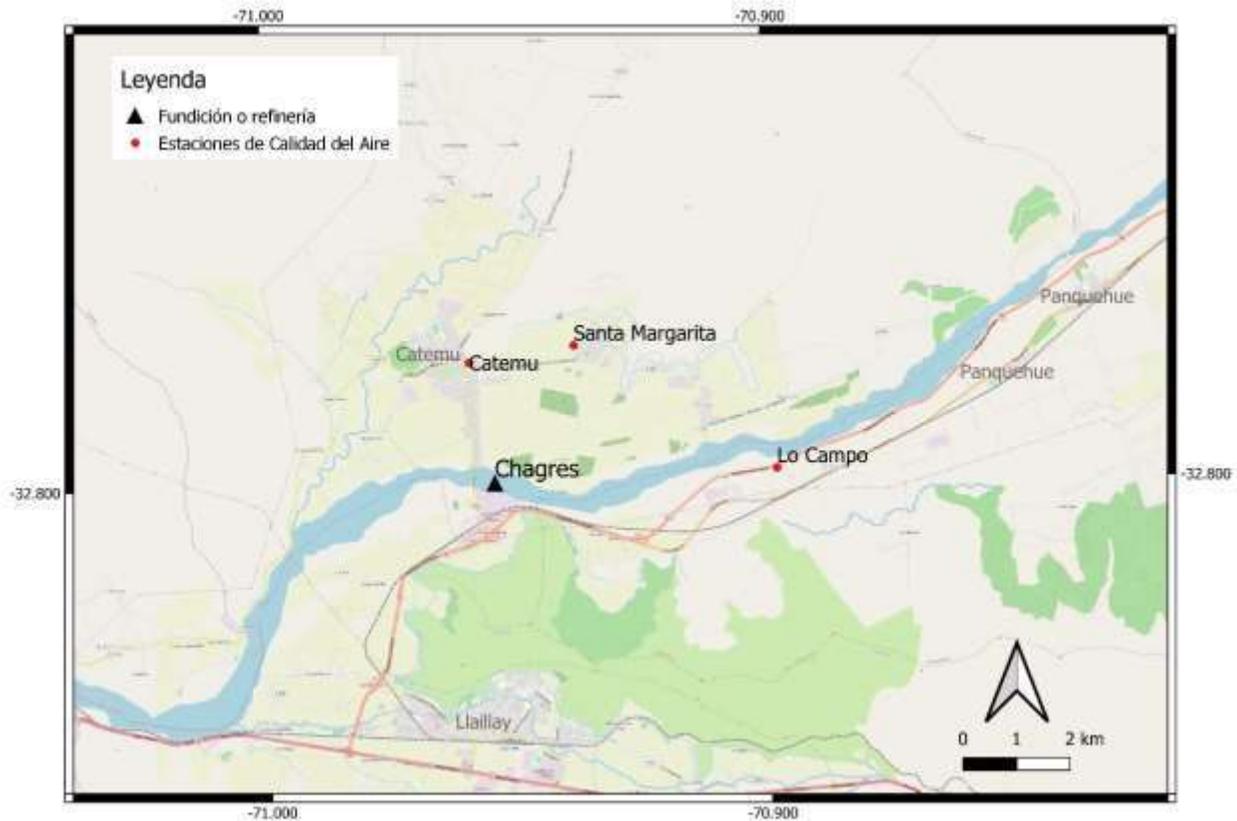
**Tabla 6-89 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías refinería ENAP Aconcagua, estación Las Gaviotas**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	363	361	355	362	358	347	359	363	331
<b>Max.</b>	72,3	125,7	125,5	33,2	32,2	37,5	41,1	40,3	20,6
<b>3rd Qu.</b>	16,5	15,7	12,0	13,6	15,3	14,1	13,4	10,4	11,1
<b>Mediana</b>	12,0	9,7	8,1	10,3	11,5	10,8	10,2	8,2	9,6
<b>1st Qu.</b>	9,0	7,4	6,8	8,0	8,4	8,0	8,5	6,3	8,1
<b>Min.</b>	4,3	3,5	2,0	2,8	2,6	2,2	3,5	3,9	5,1

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.6 Estaciones cercanas a fundición Chagres

Si bien en el Informe NC ya se presenta el mapa de la fundición junto con las estaciones de monitoreo de la calidad del aire cercanas que realizan mediciones de arsénico, en la Figura 6-20 se incorpora la ubicación de la estación Santa Margarita, la cual mide únicamente SO<sub>2</sub>. Esta se ubica a 3,6 km de la fundición Chagres.



**Figura 6-20 Mapa fundición Chagres, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas**

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

De forma de facilitar el análisis de las concentraciones a continuación, se presenta un resumen de las características de las diferentes estaciones cercanas a la fundición.

**Tabla 6-90 Resumen estaciones fundición Chagres**

Estación	Distancia [km]	Dirección desde fundición	Representatividad	Características
<b>Catemu</b>	2,9	N	MP10	Presencia de población
<b>Lo Campo</b>	5,4	E	MP10, SO <sub>2</sub>	Presencia de población
<b>Santa Margarita</b>	3,6	NE	SO <sub>2</sub>	Presencia de población

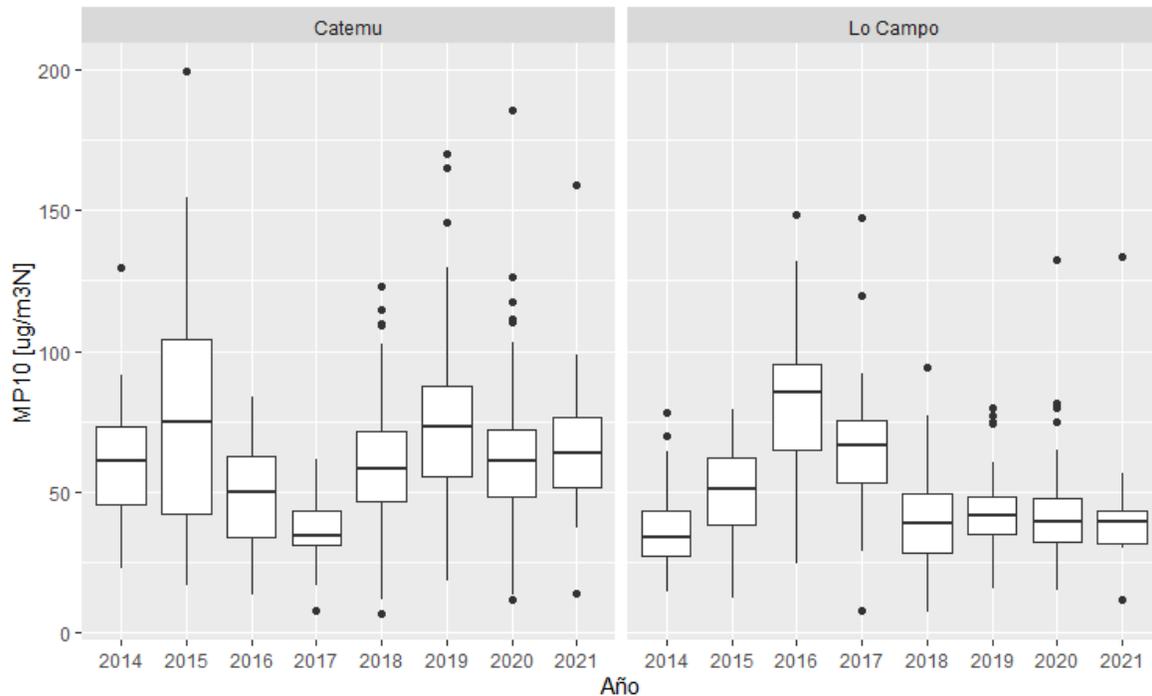
Nota: N/A indica que la estación no tiene representatividad poblacional para ningún contaminante.

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.6.1 MP10

En la Figura 6-21 se presenta la evolución de la concentración de MP10 medida en las estaciones Catemu y Lo Campo, ubicadas en las cercanías de la fundición Chagres, cuyos estadígrafos se presentan en la Tabla 6-91 y Tabla 6-92, respectivamente.

Se observan comportamiento opuestos entre las estaciones, mientras en Lo Campo se presenta una leve tendencia a la baja en las concentraciones desde el año 2016 en adelante, en la estación Catemu se observa lo contrario. Sí se observa en ambas estaciones una menor concentración en el 2017 en comparación al 2016, lo que coincide con el Inicio del requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para MP, SO<sub>2</sub> y As (diciembre 2016). Sin embargo, en el caso de la estación Catemu la concentración vuelve a subir los años siguientes. En la estación Catemu los vientos predominantes vienen del sur (ver Figura 8-10 de la Sección 8.4 del Informe NC) y en la estación Lo Campo los vientos predominantes vienen del oeste (ver Figura 8-11 de la Sección 8.4 del Informe NC), por lo que las concentraciones de ambas estaciones se ven igualmente influenciadas por las emisiones de la fundición. Sin embargo, la estación Catemu se encuentra más cerca de la fundición.



**Figura 6-21 Concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chagres, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la estación Catemu (ver Tabla 6-91) se observa que la mediana de las concentraciones se ha mantenido en el rango de 50 a 75 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], excepto por el año 2017 donde se observa una disminución de todos los estadígrafos. Cabe recordar que se cuenta con una baja cantidad de datos para algunos años, lo que les quita robustez a los estadígrafos.

**Tabla 6-91 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chagres, estación Catemu**

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	38	39	40	40	81	116	120	11
<b>Max.</b>	129	200	84	62	123	170	186	159
<b>3rd Qu.</b>	73	104	62	44	72	88	72	76
<b>Mediana</b>	61	75	50	35	58	73	61	64
<b>1st Qu.</b>	46	42	34	31	47	56	49	52
<b>Min.</b>	23	17	13	8	7	18	12	14

Fuente: Elaboración propia

En la estación Lo Campo (ver Tabla 6-92) se observa que la concentración mediana tiende a disminuir después del año 2016, donde alcanza una concentración de 85 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en ese año, para disminuir a 39 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en el año 2021. El comienzo de esta tendencia a la baja coincide con el Inicio del requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para MP,  $\text{SO}_2$  y As (diciembre 2016).

**Tabla 6-92 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chagres, estación Lo Campo**

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	41	40	40	40	81	119	114	11
<b>Max.</b>	78	79	148	147	95	80	132	133
<b>3rd Qu.</b>	43	62	96	76	49	48	48	43
<b>Mediana</b>	34	51	85	66	39	42	40	39
<b>1st Qu.</b>	27	38	65	53	28	35	32	32
<b>Min.</b>	14	12	25	8	7	16	15	12

Fuente: Elaboración propia

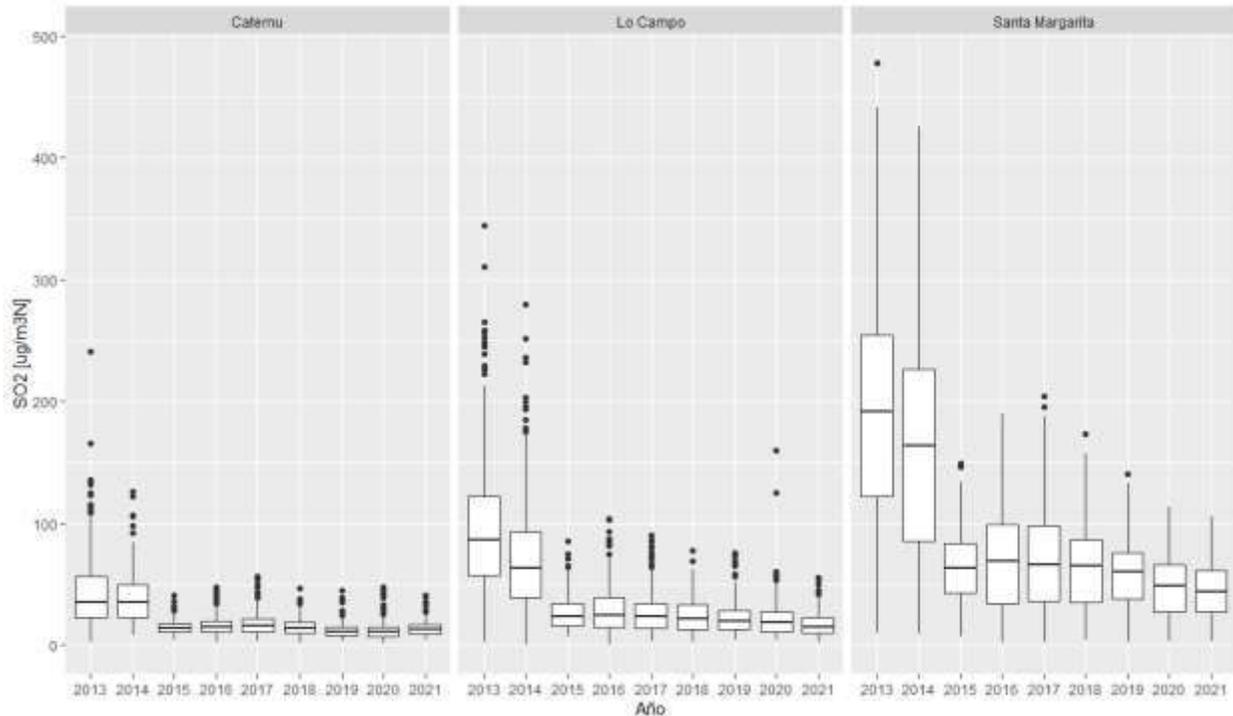
### 6.2.6.2 MP2,5

No se cuenta con antecedentes de MP2,5 para las estaciones cercanas a la fundición Chagres.

### 6.2.6.3 SO<sub>2</sub>

En la Figura 6-22 se presenta la evolución de la concentración de SO<sub>2</sub> medida en las estaciones Catemu, Lo Campo y Santa Margarita, ubicadas en las cercanías de Chagres. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 6-93, Tabla 6-94 y Tabla 6-95, respectivamente.

Se observa que los valores de la estación Santa Margarita son mayores, seguidas por las concentraciones de Lo Campo, a pesar de estar ubicadas más lejos de la fundición que la estación Catemu. Esto se podría explicar la mayor velocidad del viento predominante desde el oeste en la estación Lo Campo respecto a la velocidad del viento sur predominante de la estación Lo Campo (ver Figura 8-10 y Figura 8-11 de la Sección 8.4 del Informe NC). En todas las estaciones, todos los estadígrafos de los años 2013 y 2014 presentan valores mayores en comparación a los años siguientes. No se percibe ningún cambio notable que coincida con el inicio del requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para MP, SO<sub>2</sub> y As (diciembre 2016).



**Figura 6-22 Concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chagres, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la estación Catemu (ver Tabla 6-93) se observa que, después de las concentraciones medianas de 34,7 y 35,4 [µg/m<sup>3</sup>N] de los años 2013 y 2014 respectivamente, la concentración bajó para mantenerse en un rango inferior de entre 10,5 y 15,8 [µg/m<sup>3</sup>N]. Similar comportamiento se observa para el estadígrafo de máxima, el cual bajó de 240,9 y 125,9 [µg/m<sup>3</sup>N] en los años 2013 y 2014 respectivamente, a un rango de entre 40,4 y 56 [µg/m<sup>3</sup>N] para los años posteriores.

**Tabla 6-93 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Chagres, estación Catemu**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	365	94	351	362	342	347	327	366	332
<b>Max.</b>	240,9	125,9	40,4	47,3	56,0	46,7	44,8	47,2	41,3
<b>3rd Qu.</b>	56,3	49,3	17,3	19,7	21,7	18,6	14,5	14,6	16,3
<b>Mediana</b>	34,7	35,4	13,8	14,9	15,8	13,6	10,5	10,9	12,8
<b>1st Qu.</b>	22,5	22,7	10,4	10,5	11,0	9,6	7,9	7,4	9,3
<b>Min.</b>	2,3	8,4	3,8	2,7	2,9	1,1	3,2	1,4	4,2

Fuente: Elaboración propia

En la estación Lo Campo (ver Tabla 6-94) se observa un comportamiento similar, donde después de las concentraciones medianas de 86,5 y 63,4 [µg/m<sup>3</sup>N] de los años 2013 y 2014 respectivamente, la concentración bajó para mantenerse en un rango de entre 15,2 y 24,1

[ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. Similar comportamiento se observa para el estadígrafo de máxima, el cual bajó de 344,0 y 279,2 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en los años 2013 y 2014 respectivamente, a un rango de entre 55,3 y 159,4 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] para los años posteriores.

**Tabla 6-94 Estadígrafos concentraciones de  $\text{SO}_2$  [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chagres, estación Lo Campo**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	365	331	352	362	340	347	328	365	332
<b>Max.</b>	344,0	279,2	84,9	103,5	89,7	77,9	76,0	159,4	55,3
<b>3rd Qu.</b>	122,5	93,0	34,0	38,7	33,9	33,1	28,8	27,5	22,6
<b>Mediana</b>	86,5	63,4	23,1	24,1	23,0	21,5	19,7	18,3	15,2
<b>1st Qu.</b>	56,8	38,6	15,6	15,1	14,1	13,0	12,9	10,4	10,0
<b>Min.</b>	2,5	0,0	6,9	0,0	3,6	1,8	4,4	4,0	2,3

Fuente: Elaboración propia

Por último, lo mismo sucede en la estación Santa Margarita, pero con concentraciones más altas (ver Tabla 6-95), donde después de las concentraciones medianas de 192,0 y 163,6 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] de los años 2013 y 2014 respectivamente, la concentración bajó para mantenerse en un rango de entre 44 y 68,4 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. Similar comportamiento se observa para el estadígrafo de máxima, el cual bajó de 477,4 y 425,7 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en los años 2013 y 2014 respectivamente, a un rango de entre 105,3 y 203,9 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] para los años posteriores.

**Tabla 6-95 Estadígrafos concentraciones de  $\text{SO}_2$  [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Chagres, estación Santa Margarita**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	365	341	353	362	339	349	326	366	355
<b>Max.</b>	477,4	425,7	149,5	190,1	203,9	172,8	140,7	113,6	105,3
<b>3rd Qu.</b>	254,6	226,1	83,6	98,5	98,1	86,3	76,0	65,8	61,3
<b>Mediana</b>	192,0	163,6	62,6	68,4	66,4	64,6	60,4	48,9	44,0
<b>1st Qu.</b>	121,7	85,1	42,8	34,3	35,7	34,7	38,3	27,8	27,7
<b>Min.</b>	10,2	8,5	7,1	2,5	2,5	4,1	2,2	3,4	2,7

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.7 Estaciones cercanas a fundición Caletones

Si bien en el Informe NC ya se presenta el mapa de la fundición junto con las estaciones de monitoreo de la calidad del aire cercanas que realizan mediciones de arsénico, en la Figura 6-23 se incorpora la ubicación de las estaciones Cipreses y Cauquenes, las cuales miden únicamente  $\text{SO}_2$  y que pertenecen a CODELCO. Estas se encuentran a 17,4 y 18,2 km de la fundición respectivamente. Además, se incluyen las estaciones Rancagua I, la cual mide concentraciones de  $\text{MP}_{10}$ ,  $\text{MP}_{2.5}$  y  $\text{SO}_2$  y Rancagua II, la cual mide concentraciones de  $\text{MP}_{10}$  y  $\text{MP}_{2.5}$ , las que se ubican a 25,1 y 26,7 km de la fundición respectivamente. Es importante destacar que estas últimas dos estaciones se añaden como complemento al análisis, pero su ubicación es más lejana que las demás estaciones. Las estaciones Rancagua I y II se ubican en la ciudad de Rancagua y no son propiedad de la CODELCO, a diferencia de las demás estaciones.



**Figura 6-23 Mapa fundición Caletones, estaciones de monitoreo y principales localidades cercanas**

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA y OpenStreetMap

De forma de facilitar el análisis de las concentraciones a continuación, se presenta un resumen de las características de las diferentes estaciones cercanas a la fundición.

**Tabla 6-96 Resumen estaciones fundición Caletones**

Estación	Distancia [km]	Dirección desde fundición	Representatividad	Características
<b>Coya Club</b>	13,5	SO	N/A	En zona no poblada
<b>Coya Población</b>	13,1	SO	MP10, SO <sub>2</sub>	Presencia de población
<b>Sewell<sup>1</sup></b>	6,8	NE	N/A	En zona no poblada
<b>Cauquenes</b>	18,3	SO	N/A	Zona poco habitada
<b>Cipreses</b>	17,4	S	N/A	Zona poco habitada
<b>Rancagua I</b>	25,1	O	MP10, SO <sub>2</sub> , CO, MP2,5	Presencia de población
<b>Rancagua II</b>	26,7	O	MP10, MP2,5	Presencia de población

Nota: N/A indica que la estación no tiene representatividad poblacional para ningún contaminante.

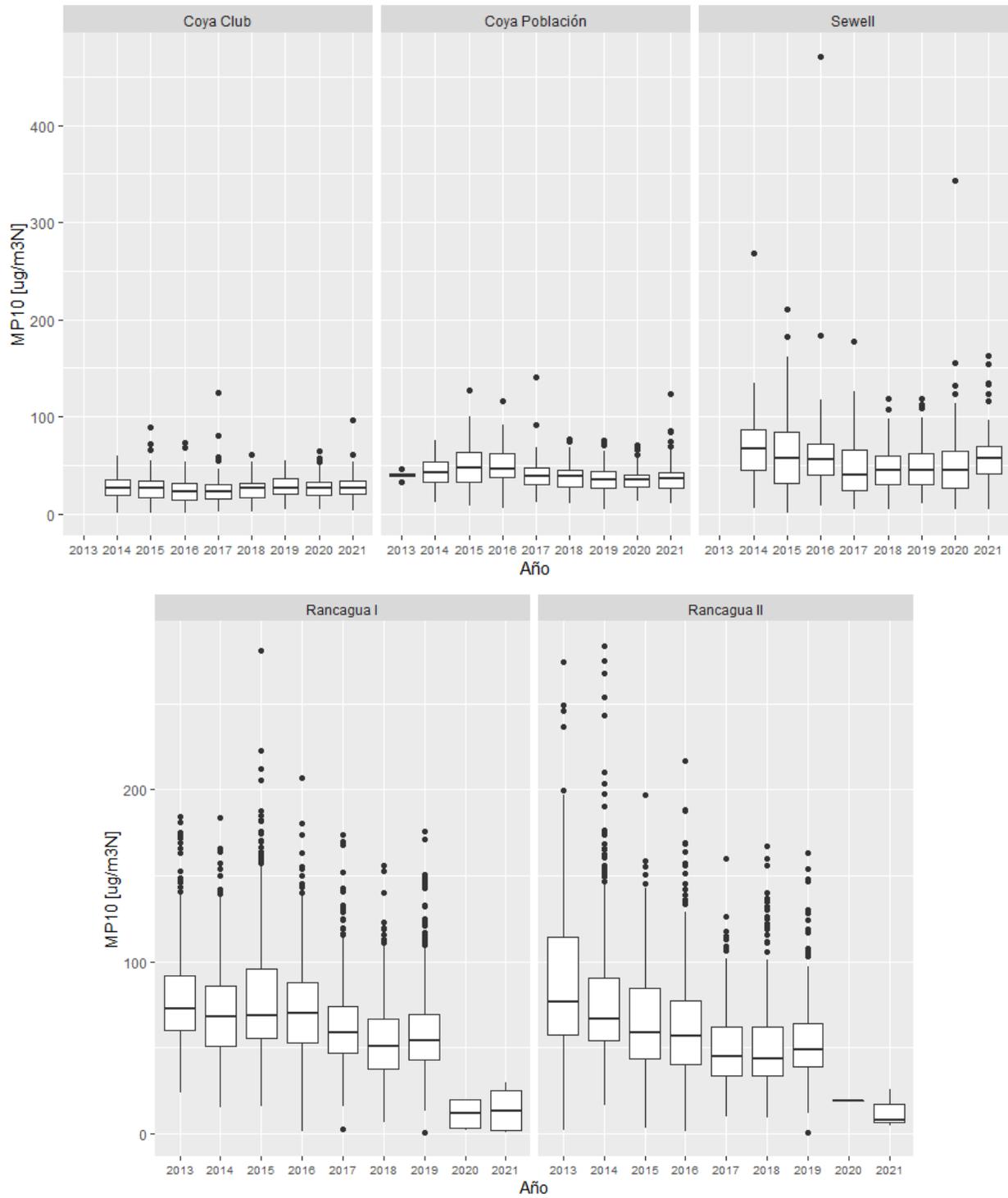
1. Sewell se considera estación de alto impacto debido a su cercanía a la fundición y a su baja población

Fuente: Elaboración propia

#### 6.2.7.1 MP10

En la Figura 6-24 se presenta la evolución de la concentración de MP10 medida en las estaciones Coya Club, Coya Población y Sewell, ubicadas en las cercanías de Caletones y en las estaciones Rancagua I y Rancagua II, ubicadas en la ciudad de Rancagua. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 6-97, Tabla 6-98, Tabla 6-99, Tabla 6-100 y Tabla 6-101 respectivamente.

De las tres estaciones cercanas a la fundición, se observa que las concentraciones de la estación Sewell superan a las concentraciones de las otras estaciones. Esto es esperable dada la mayor cercanía de la estación a la fundición. Por otra parte, las concentraciones registradas de la estación Coya Club son levemente menores a los de Coya Población, sobre todo para los años cercanos al 2016. Esto también se podría explicar por la mayor actividad humana que existe cerca de la estación Coya Población. No se percibe ningún cambio notable que coincida con el inicio del requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para MP, SO<sub>2</sub> y As (diciembre 2018). Por otra parte, las concentraciones en las estaciones Rancagua I y II son mayores. Esto es de esperar debido a que se encuentran en la ciudad donde hay diversas fuentes de material particulado. Se observa también una abrupta disminución de la concentración en el año 2020 en ambas estaciones.



**Figura 6-24 Concentraciones de MP10 [µg/m³N] en cercanías fundición Caletones, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la estación Coya Club (ver Tabla 6-97) se observa que la concentración mediana se ha mantenido estable dentro del rango de 23 y 27 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. Sin contar los valores extremos del 2017 y 2021, el estadígrafo de máxima se encuentra dentro del rango entre 55 y 89 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ].

**Tabla 6-97 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Club**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	115	110	99	118	113	115	119	116
<b>Max.</b>	S/I	60	89	73	125	61	55	64	96
<b>3rd Qu.</b>	S/I	36	34	31	30	32	36	33	34
<b>Mediana</b>	S/I	27	27	23	23	26	26	26	27
<b>1st Qu.</b>	S/I	19	17	14	15	17	21	19	20
<b>Min.</b>	S/I	1	1	1	2	2	5	4	3

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Coya Población (ver Tabla 6-98) se observa que la concentración mediana se ha mantenido relativamente estable con una leve disminución a partir del año 2016. La concentración mediana se ha mantenido dentro del rango de 35 a 47 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. Respecto a los valores máximos, se observan valores más altos para el periodo entre 2015 y 2017, y para el año 2021, donde oscilan entre 116 y 141 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. Mientras que, para el resto de los años, la concentración máxima se encuentra dentro del rango entre 46 y 77 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ].

**Tabla 6-98 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Población**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	5	106	116	117	116	116	117	118	117
<b>Max.</b>	46	75	127	116	141	77	75	71	123
<b>3rd Qu.</b>	42	54	63	62	47	45	44	40	43
<b>Mediana</b>	40	42	47	46	39	39	35	35	36
<b>1st Qu.</b>	39	33	33	38	30	28	27	28	27
<b>Min.</b>	32	12	8	6	12	10	4	13	10

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Sewell (ver Tabla 6-99) se observa que la mediana de las concentraciones relativamente estable con valores entre 40 y 67 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. Respecto del estadígrafo de máximo, se observan valores especialmente extremos para el 2016 y 2020, con 471 y 343 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], respectivamente. Mientras que, para el resto de los años, la concentración máxima se encuentra dentro del rango entre 118 y 268 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ].

**Tabla 6-99 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Caletones, estación Sewell**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	104	117	78	112	108	99	113	105
<b>Max.</b>	S/I	268	211	471	178	118	118	343	163
<b>3rd Qu.</b>	S/I	87	84	72	66	59	62	65	69
<b>Mediana</b>	S/I	67	57	56	40	45	45	45	57
<b>1st Qu.</b>	S/I	45	32	40	24	31	30	26	41
<b>Min.</b>	S/I	6	1	8	5	4	10	4	5

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la Estación Rancagua I (ver Tabla 6-100) se observa como la concentración mediana disminuye paulatinamente entre 2013 y 2019, pasando de 73 a 54 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], mientras que en 2020 se produce una disminución considerable a 12 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] que se mantiene en 13 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en 2021. Las concentraciones máximas oscilan entre 156 y 281 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] entre los años 2013 a 2019, disminuyendo a 20 y 30 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en 2020 y 2021 respectivamente.

**Tabla 6-100 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Caletones, estación Rancagua I**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	291	361	346	365	360	360	360	4	4
<b>Max.</b>	185	184	281	207	174	156	176	20	30
<b>3rd Qu.</b>	92	86	96	88	74	67	69	20	26
<b>Mediana</b>	73	68	68	70	59	51	54	12	13
<b>1st Qu.</b>	60	51	55	53	47	38	43	4	2
<b>Min.</b>	24	16	16	1	3	7	1	2	1

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, la Estación Rancagua II (ver Tabla 6-101) se observa como la concentración mediana disminuye paulatinamente entre 2013 y 2019, pasando de 77 a 49 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], mientras que en 2020 se produce una disminución considerable a 19 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] que se mantiene en 8 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en 2021. Las concentraciones máximas oscilan entre 160 y 284 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] entre los años 2013 a 2019, disminuyendo a 19 y 26 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en 2020 y 2021 respectivamente.

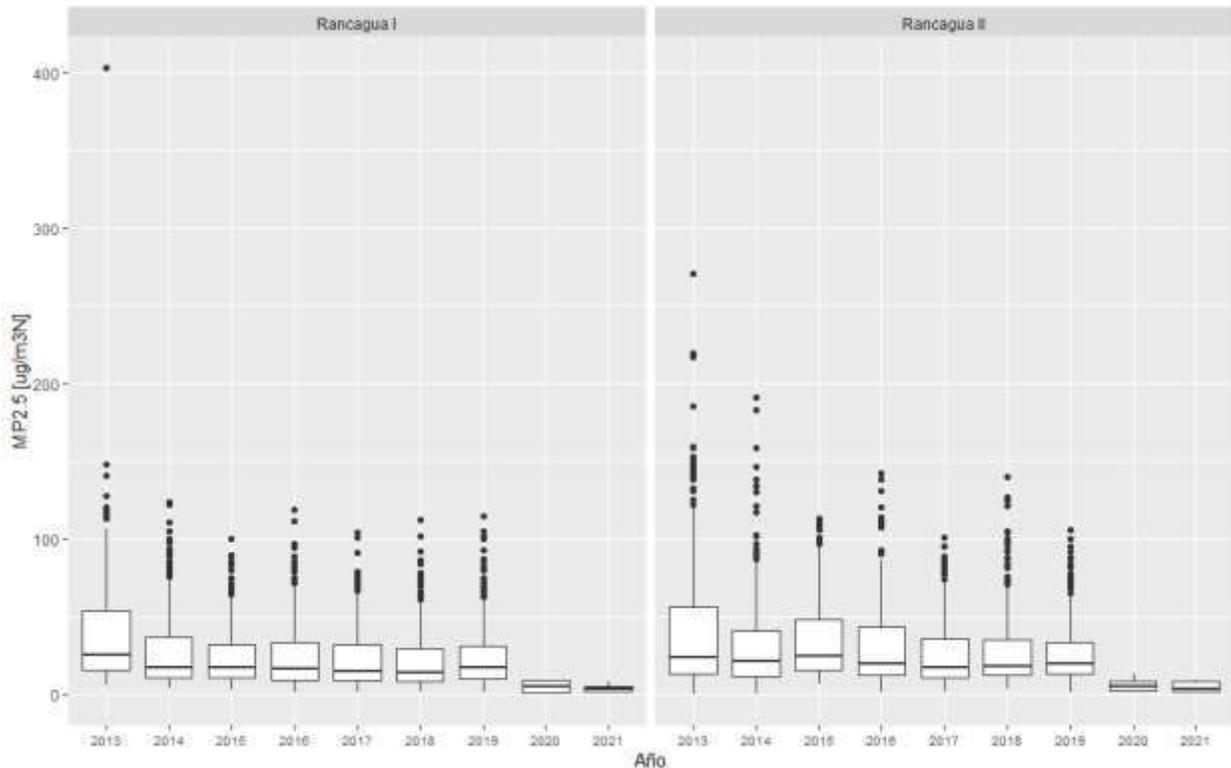
**Tabla 6-101 Estadígrafos concentraciones de MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Caletones, estación Rancagua II**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	304	364	318	363	363	360	364	1	3
<b>Max.</b>	274	284	197	217	160	167	163	19	26
<b>3rd Qu.</b>	114	91	84	77	62	62	64	19	17
<b>Mediana</b>	77	67	59	57	45	44	49	19	8
<b>1st Qu.</b>	58	54	44	40	34	34	39	19	7
<b>Min.</b>	2	17	3	2	10	9	1	19	5

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.7.2 MP2,5

En la Figura 6-25 se presenta la evolución de la concentración de MP2,5 medida en las estaciones Rancagua I y Rancagua II, ubicadas en la ciudad de Rancagua, cuyos estadígrafos se presentan en la Tabla 6-102 y Tabla 6-103, respectivamente. Se observa que las concentraciones se comportan de forma muy similar en ambas estaciones, disminuyendo en el año 2020 al igual como sucede con el MP10.



**Figura 6-25 Concentraciones de MP2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Caletones, todas las estaciones**

Fuente: Elaboración propia

En la Estación Rancagua I (ver Tabla 6-102) se observa como la concentración mediana disminuye paulatinamente entre 2013 y 2019, pasando de 25 a 18 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], mientras que en 2020 se produce una disminución considerable a 5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] que se mantiene en 3 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en 2021. Las concentraciones máximas oscilan entre 100 y 403 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] entre los años 2013 a 2019, disminuyendo a 9 y 8 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en 2020 y 2021 respectivamente.

**Tabla 6-102 Estadígrafos concentraciones de MP2.5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Caletones, estación Rancagua I**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	291	365	362	365	358	358	356	4	4
<b>Max.</b>	403	124	100	119	104	112	115	9	8
<b>3rd Qu.</b>	53	37	32	34	32	29	31	9	5
<b>Mediana</b>	25	18	17	16	15	14	18	5	3
<b>1st Qu.</b>	16	11	11	9	9	8	10	1	2
<b>Min.</b>	6	4	3	1	1	2	1	1	2

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, la Estación Rancagua II (ver Tabla 6-103) se observa como la concentración mediana disminuye paulatinamente entre 2013 y 2019, pasando de 24 a 20 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ], mientras que en 2020 se produce una disminución considerable a 5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] que se mantiene en 3 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en 2021. Las concentraciones máximas oscilan entre 101 y 271 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] entre los años 2013 a 2019, disminuyendo a 13 y 9 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en 2020 y 2021 respectivamente.

**Tabla 6-103 Estadígrafos concentraciones de MP2.5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Caletones, estación Rancagua II**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	287	364	308	359	360	357	358	4	5
<b>Max.</b>	271	191	113	142	101	140	106	13	9
<b>3rd Qu.</b>	57	41	48	43	36	35	34	9	8
<b>Mediana</b>	24	21	25	20	17	18	20	5	3
<b>1st Qu.</b>	13	12	16	13	11	12	13	3	2
<b>Min.</b>	0	0	7	1	2	3	1	2	2

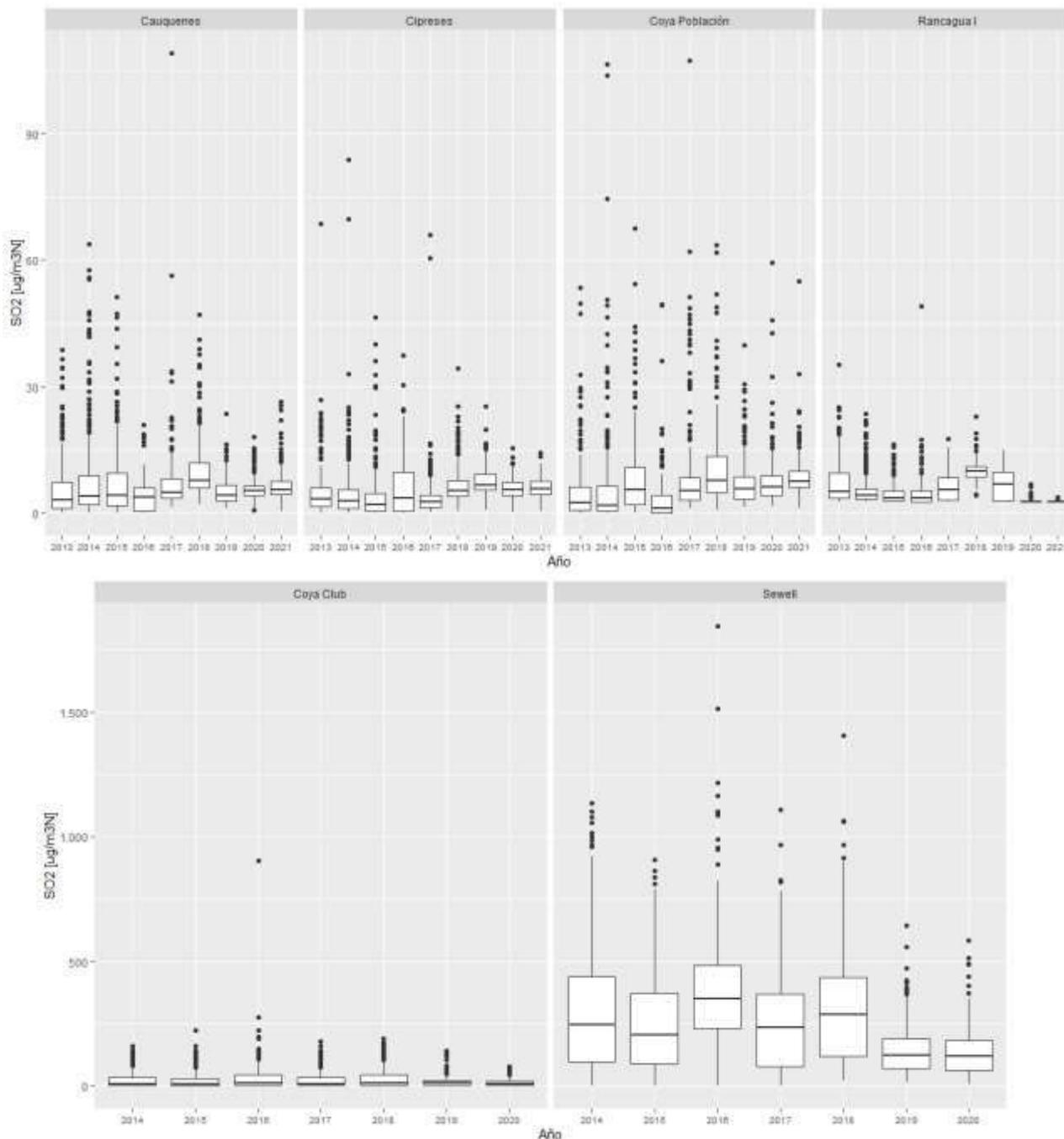
Fuente: Elaboración propia

### 6.2.7.3 SO<sub>2</sub>

En la Figura 6-26 se presenta la evolución de la concentración de SO<sub>2</sub> medida en las estaciones Cauquenes, Cipreses, Coya Club, Coya Población, Sewell y Rancagua I, ubicadas en las cercanías de Caletones. Por su parte, los estadígrafos de estas estaciones se presentan en la Tabla 6-104, Tabla 6-105, Tabla 6-106, Tabla 6-107, Tabla 6-108 y Tabla 6-109, respectivamente.

De las seis estaciones, se observa que las concentraciones de la estación Sewell superan las concentraciones de las otras estaciones, lo que es esperable dada su proximidad a la fundición. Además de esto, se debe destacar que la concentración en dicha estación disminuye considerablemente sus estadígrafos a partir del año 2019, lo que coincide con el inicio del requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para MP, SO<sub>2</sub> y As (diciembre 2018). El resto de las estaciones presentan concentraciones medianas estables, pero con valores máximos que han disminuido en el tiempo. Llama la atención los altos valores máximos registrados en Coya

Club en comparación a las otras estaciones lejanas a la fundición, especialmente considerando que se encuentra menos afectada por actividad humana local.



**Figura 6-26 Concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Caletones, todas las estaciones**

Nota: Estaciones Coya Club y Sewell se muestran en escala diferente.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Cauquenes (ver Tabla 6-104) se observa que la concentración mediana se mantiene moderadamente estable y presenta valores entre 3,1 y 7,8 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. Respecto del estadígrafo de la concentración máxima, se observa una disminución, pasando de un rango de entre 38,7 y 63,8 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] para los primeros tres años a un rango de entre 18,1 y 26,4 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] para los tres años más recientes.

**Tabla 6-104 Estadígrafos concentraciones de  $\text{SO}_2$  [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Caletones, estación Cauquenes**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	251	363	344	75	233	363	360	366	333
<b>Max.</b>	38,7	63,8	51,2	21,0	109,0	47,1	23,5	18,1	26,4
<b>3rd Qu.</b>	7,4	8,8	9,4	6,0	8,1	12,0	6,7	6,4	7,5
<b>Mediana</b>	3,1	4,0	4,2	3,7	4,8	7,8	4,3	5,2	5,6
<b>1st Qu.</b>	1,0	1,9	1,8	0,4	3,5	5,9	2,9	4,1	4,4
<b>Min.</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	2,1	1,1	0,7	0,5

Fuente: Elaboración propia

En la estación Cipreses (ver Tabla 6-105) se observa que la concentración mediana se mantiene moderadamente estable presentado valores entre 2,0 y 6,7 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. Respecto del estadígrafo de concentración máxima, se observa una disminución, pasando de un rango de entre 46,5 y 83,9 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] para los primeros tres años a un rango de entre 14,3 y 25,4 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] para los tres años más recientes.

**Tabla 6-105 Estadígrafos concentraciones de  $\text{SO}_2$  [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ] en cercanías fundición Caletones, estación Cipreses**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	225	330	356	108	231	360	362	360	298
<b>Max.</b>	68,6	83,9	46,5	37,4	66,0	34,4	25,4	15,4	14,3
<b>3rd Qu.</b>	5,9	5,6	4,7	9,8	4,3	7,8	9,3	7,2	7,4
<b>Mediana</b>	3,2	2,8	2,0	3,6	2,8	5,3	6,7	5,5	5,8
<b>1st Qu.</b>	1,5	1,2	0,5	0,4	1,4	4,1	5,4	4,3	4,4
<b>Min.</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,6	0,7	0,2	0,5

Fuente: Elaboración propia

En la estación Coya Club (ver Tabla 6-106) se observa que la concentración mediana se mantiene moderadamente estable presenta valores entre 9 y 13,4 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]. En cambio, los valores máximos presentan gran variación, oscilando entre 79,1 y 904,8 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ].

**Tabla 6-106 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Club**

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	358	345	321	363	359	348	360	0
<b>Max.</b>	161,0	222,0	904,8	177,4	189,4	143,6	79,1	S/I
<b>3rd Qu.</b>	35,0	30,0	45,0	32,4	44,4	21,5	21,0	S/I
<b>Mediana</b>	9,0	9,0	10,2	9,4	13,4	10,5	9,7	S/I
<b>1st Qu.</b>	3,0	1,0	3,0	3,9	4,7	4,7	4,5	S/I
<b>Min.</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	1,3	1,0	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Coya Población (ver Tabla 6-107) se observa una variabilidad de proporciones similares a las estaciones anteriores, presentado valores de concentraciones medianas entre 1,9 y 7,8 [µg/m<sup>3</sup>N], excluyendo el año 2016 que posee menos observaciones. Respecto del estadígrafo de concentración máxima, se observa una disminución, pasando de un rango de entre 53,5 y 106,4 [µg/m<sup>3</sup>N] para los primeros tres años a un rango de entre 39,8 y 59,5 [µg/m<sup>3</sup>N] para los tres años más recientes.

**Tabla 6-107 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Caletones, estación Coya Población**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	245	355	356	113	224	364	352	364	314
<b>Max.</b>	53,5	106,4	67,5	49,5	107,3	63,6	39,8	59,5	54,9
<b>3rd Qu.</b>	6,1	6,3	10,9	4,3	8,4	13,5	8,6	8,7	9,9
<b>Mediana</b>	2,5	1,9	5,5	1,2	5,2	7,8	5,9	6,2	7,4
<b>1st Qu.</b>	0,8	0,4	2,0	0,0	3,1	4,9	3,3	4,3	6,1
<b>Min.</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,7	1,3	1,5	1,0

Fuente: Elaboración propia

En la estación Sewell (ver Tabla 6-108) se observa una diferencia clara entre los años antes y después del inicio del requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para MP, SO<sub>2</sub> y As (diciembre 2018). En el periodo 2013-2018 la concentración mediana osciló entre 205 y 349,2 [µg/m<sup>3</sup>N] para luego disminuir a 123,7 y 118,4 [µg/m<sup>3</sup>N] en los años 2019 y 2020, respectivamente. Los estadígrafos de concentración máxima también disminuyeron, en el periodo 2013-2018 la máxima osciló entre 906 y 1.407,4 [µg/m<sup>3</sup>N] para luego disminuir a 644,9 y 585,6 [µg/m<sup>3</sup>N] en los años 2019 y 2020, respectivamente.

**Tabla 6-108 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Caletones, estación Sewell**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	0	341	333	252	356	345	328	361	0
<b>Max.</b>	S/I	1.133,0	906,0	1.843,0	1.109,2	1.407,4	644,9	585,6	S/I
<b>3rd Qu.</b>	S/I	439,0	373,0	484,7	369,7	434,4	189,1	181,8	S/I
<b>Mediana</b>	S/I	247,0	205,0	349,2	233,1	288,5	123,7	118,4	S/I
<b>1st Qu.</b>	S/I	97,0	88,0	231,3	79,4	118,7	71,7	63,1	S/I
<b>Min.</b>	S/I	0,0	0,0	1,0	0,3	23,8	15,2	7,9	S/I

S/I: No se cuenta con antecedentes para ese año.

Fuente: Elaboración propia

En la estación Rancagua I (ver Tabla 6-109) se observan valores de medianas relativamente estables entre 2013 y 2017, manteniéndose entre 3,5 y 5,4 [µg/m<sup>3</sup>N]. Luego, se aprecia una disminución entre 2018 y 2021, pasando de 9,8 a 2,7 [µg/m<sup>3</sup>N]. Esto podría tener relación con el inicio del requisito de cumplimiento de la Norma de Emisión para MP, SO<sub>2</sub> y As (diciembre 2018). Respecto a las concentraciones máximas, estas también tienden a disminuir entre 2018 y 2021, pasando de 23,0 a 3,7 [µg/m<sup>3</sup>N].

**Tabla 6-109 Estadígrafos concentraciones de SO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>N] en cercanías fundición Caletones, estación Rancagua I**

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>N</b>	258	330	262	289	319	357	174	203	156
<b>Max.</b>	35,2	23,6	16,2	49,0	17,6	23,0	15,1	6,8	3,7
<b>3rd Qu.</b>	9,5	5,7	5,3	5,4	8,4	11,0	9,6	3,0	2,8
<b>Mediana</b>	5,0	4,3	3,5	3,5	5,4	9,8	6,9	2,7	2,7
<b>1st Qu.</b>	3,6	3,3	2,8	2,8	3,2	8,5	2,9	2,6	2,6
<b>Min.</b>	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	4,2	2,6	2,6	2,6

Fuente: Elaboración propia

### 6.3 Variación de la calidad del aire tras la aplicación de la norma de emisión

A continuación, se presenta a modo de resumen las concentraciones medias de As, SO<sub>2</sub>, MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> observadas en las estaciones de monitoreo cercanas a las fundiciones antes y después de la aplicación de la norma. De esta forma, se puede evidenciar el efecto que ha tenido la implementación de la norma de emisión en la calidad del aire de las zonas aledañas a las fundiciones.

Se debe considerar que la media previa a la norma corresponde a la media de las concentraciones medias de los tres años anteriores al inicio de la norma<sup>101</sup>, es decir, si la norma entró en vigencia en diciembre de 2016, se promedian los valores de los años 2013 a 2015; mientras que, si entró en vigencia en diciembre de 2018, se promedian los valores de los años 2015 al 2017. Por otra parte, la media posterior a la norma corresponde a la media de las concentraciones medias de los tres años posteriores al año siguiente del inicio de la norma<sup>102</sup>, es decir, si la norma entró en vigencia en diciembre de 2016, se promedian los valores de los años 2018 al 2020. En el caso de que la norma hubiese entrado en vigencia en diciembre de 2018, se promedian los valores de los años 2020 y 2021. Se utilizaron estos rangos, es decir, excluyendo el mismo año de entrada en vigencia de la norma y el año siguiente, con la intención de reducir el impacto del proceso mismo de implementación de las medidas de control, los cuales muchas veces requirieron detenciones de las operaciones y/o una actividad reducida durante un tiempo.

Es relevante considerar que, especialmente en el grupo de fundiciones en que la norma entró en vigencia después, los resultados están influenciados por datos y parámetros recogidos durante un periodo donde algunas fundiciones aún no alcanzan una operación en régimen durante un período extenso. Esta limitación es relevante, pues es esperable que fundiciones como Chuquicamata y/o Potrerillos aumenten sus niveles de procesamiento respecto de los observados en el periodo analizado en el presente estudio, afectando sus niveles de emisión y, como consecuencia, la calidad del aire de las zonas aledañas.

En la Tabla 6-110 y Tabla 6-111 se presentan las concentraciones atmosféricas medias pre y post norma de arsénico y SO<sub>2</sub> respectivamente en las estaciones seleccionadas<sup>103,104</sup>. Estos dos contaminantes se asocian directamente con las emisiones de las fundiciones, y se observa que la aplicación del instrumento de gestión ambiental en general ha tenido un efecto positivo en la calidad del aire. En los casos en que la estación de una fundición indicara que luego de la aplicación de la norma las concentraciones subieron, se presentan los valores de todas las estaciones cercanas a dicha fundición, de forma de corroborar que la situación se diera en todas las estaciones y no fuera un caso puntual.

---

<sup>101</sup> Para las fundiciones que ya contaban con plantas de ácido de doble contacto (Altonorte, Ventanas y Chagres), el límite de la norma comenzó a aplicar a partir de diciembre de 2016. Para las demás fundiciones (Chuquicamata, Potrerillos, HVL y Caletones), el límite comenzó a aplicar a partir de diciembre de 2018.

<sup>102</sup> Se deja un margen con la intención de excluir el periodo en que la fundición estaría ajustándose para volver a operar en régimen

<sup>103</sup> Para As se selecciona la estación con mayores concentraciones en la zona de influencia y además la estación con representatividad poblacional para MP10 con mayor concentración. La excepción es Potrerillos, donde ninguna estación tiene representatividad poblacional para MP10. En el caso de que dos o más estaciones con mayores concentraciones sean representativas, se presentan las dos estaciones con mayores concentraciones medidas de As.

<sup>104</sup> Para SO<sub>2</sub> se seleccionaron las estaciones con representatividad poblacional con los mayores niveles de SO<sub>2</sub>. La excepción es Potrerillos, donde ninguna estación tenía representatividad poblacional.

**Tabla 6-110 Variación en las mediciones de estaciones con mayores concentraciones de As [ng/m<sup>3</sup>] luego de la aplicación de la norma de emisión**

Fundición	Estación	Media pre-norma	Media post norma	Delta media concentración	Cambio porcentual
Chuquicamata <sup>a</sup>	Aukahuasi	260	60	-200	-77%
	CD 23 de Marzo*	132	25	-107	-81%
Altonorte <sup>b</sup>	Sur	111	93	-18	-16%
	La Negra-Inacal*	56	54	-2	-4%
Potrerillos <sup>a</sup>	Doña Inés	4.990	1.056	-3.935	-79%
	CAP	172	30	-142	-82%
Hernán Videla Lira <sup>a</sup>	Paipote*	25	54	29	119%
	Tierra Amarilla*	17	34	18	108%
	San Fernando*	16	24	8	52%
	Copiapó*	19	19	10	105%
Ventanas <sup>b</sup>	Quintero*	85	48	-37	-43%
	Los Maitenes*	58	30	-28	-48%
Chagres <sup>b</sup>	Lo Campo*	22	40	18	82%
	Catemu*	22	29	7	32%
Caletones <sup>a</sup>	Sewell	391	67	-324	-83%
	Coya Población*	20	6	-14	-68%

\*Estación representativa para MP10

a. La norma entró en vigor en diciembre de 2018 para estas fundiciones

b. La norma entró en vigor en diciembre de 2016 para estas fundiciones

Nota: La media pre-norma corresponde a la media de las concentraciones medias de los tres años anteriores al inicio de la norma.

Nota 2: La media post norma corresponde a la media de las concentraciones medias de los tres años posteriores al año siguiente del inicio de la norma.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-111 Variación en las mediciones de estaciones con mayores concentraciones de SO<sub>2</sub> [ug/m<sup>3</sup>] luego de la aplicación de la norma de emisión**

Fundición	Estación	Media pre-norma	Media post norma	Delta media concentración	Cambio porcentual
Chuquicamata <sup>a</sup>	Servicio Médico Legal	4,04	2,41	-1,62	-88%
	Hospital El Cobre	4,29	2,46	-1,83	-43%
Altonorte <sup>b</sup>	Coviefi	3,34	1,24	-2,10	-63%
	La Negra-Altonorte*	14,62	3,37	-11,24	-77%
Potrerrillos <sup>a</sup>	CAP	149,21	14,76	-134,44	-90%
Hernán Videla Lira <sup>a</sup>	Copiapó*	8,19	9,30	1,11	14%
	Los Volcanes*	2,41	9,79	7,38	306%
	Paipote*	11,82	15,98	4,16	35%
	San Fernando*	2,53	4,48	1,95	77%
	Tierra Amarilla*	12,85	13,27	0,42	3%
Ventanas <sup>b</sup>	Los Maitenes*	31,61	24,21	-7,40	-23%
	Quintero*	31,07	23,63	-7,44	-24%
Chagres <sup>b</sup>	Catemu	32,97	12,85	-20,12	-61%
	Lo Campo*	64,79	22,56	-42,23	-65%
Caletones <sup>a</sup>	Coya Club	25,98	15,53	-10,46	-40%
	Sewell	301,08	133,38	-167,70	-56%
	Cipreses	4,81	5,88	1,06	22%
	Coya Población*	7,15	7,94	0,79	11%
	Cauquenes	6,41	5,93	-0,48	-7%
	Rancagua I*	5,02	2,84	-2,17	-43%

\* Estación representativa para el SO<sub>2</sub>

a. La norma entró en vigor en diciembre de 2018 para estas fundiciones

b. La norma entró en vigor en diciembre de 2016 para estas fundiciones

Nota: La media pre-norma corresponde a la media de las concentraciones medias de los tres años anteriores al inicio de la norma.

Nota 2: La media post norma corresponde a la media de las concentraciones medias de los tres años posteriores al año siguiente del inicio de la norma.

Fuente: Elaboración propia

Se observa cómo los resultados, en términos de mejora de la calidad del aire, varían tanto entre zona como por contaminante. Por ejemplo, en Chuquicamata, se observan reducciones de las concentraciones atmosféricas de arsénico cercanas al 80%, mientras que en cuanto a SO<sub>2</sub> las concentraciones disminuyeron entre un 43% y 88%. De forma opuesta, en los alrededores de Altonorte las reducciones de las concentraciones atmosféricas de arsénico se redujeron entre un 4% y 16%, mientras que el SO<sub>2</sub> tuvo reducciones de entre 63% y 77%. En cuanto a los aumentos en las concentraciones atmosféricas de estos contaminantes observadas en algunas zonas, se destaca el aumento de las concentraciones de As en los alrededores de Chagres y HVL, así como los aumentos de SO<sub>2</sub> en Caletones y HVL.

El aumento de los promedios de concentraciones de arsénico medidos alrededor de Chagres, se genera porque el año 2018 se observan concentraciones inusualmente altas, específicamente en los meses de junio, agosto y septiembre. Estos aumentos no se explican por las emisiones reportadas o condiciones meteorológicas particulares, sin embargo, si se excluyen las concentraciones medidas el año 2018 del promedio post-norma, se observa una disminución de la concentración promedio en la estación Catemu de un 18% (disminuye en 4 ng/m<sup>3</sup>), mientras

que en la estación Lo Campo se observa un aumento de la concentración promedio en un 15% (aumenta en 3 ng/m<sup>3</sup>).

En cuanto al aumento de las concentraciones de SO<sub>2</sub> medidas alrededor de Caletones, se destaca que el aumento se observó sólo en las estaciones Cipreses y Coya Población, donde sólo esta última es representativa (ver Sección 6.2.7). En las demás estaciones, se observa una reducción en el período posterior al 2019 (se debe considerar que la estación Rancagua I también es representativa de SO<sub>2</sub>). Cabe destacar que desde el 2019 las emisiones reportadas de SO<sub>2</sub> son cerca de la mitad de las reportadas anteriormente, lo cual coincide con las observaciones de la mayoría de las estaciones. Además, se debe considerar que el nivel de las concentraciones es relativamente bajo, por lo que pequeñas variaciones, las cuales pueden responder a variaciones en las condiciones meteorológicas, en términos absolutos resultan en variaciones porcentuales relevantes. Al respecto, se destaca que todas las estaciones analizadas cumplen por bastante margen la NPCA de SO<sub>2</sub>.

Respecto a la fundición HVL, se observa un deterioro de la calidad del aire, tanto en las concentraciones de As como de SO<sub>2</sub>, especialmente a partir del año 2020. Debido a que hay un problema en la implementación de los balances de masa durante este periodo, los cuales fueron implementados bajo una metodología que no refleja la operación real de la fundición y que, por ejemplo, llegó a resultar en múltiples emisiones mensuales negativas e incluso emisiones anuales negativas<sup>105</sup>, no es posible realizar una explicación del aumento de las concentraciones de ambos contaminantes utilizando los balances de masa oficiales. Sin embargo, el aumento de ambos contaminantes indica que las concentraciones deben provenir de un aumento de las emisiones de la fundición, mientras que las reestimaciones hechas de las emisiones para el presente estudio indican que efectivamente hubo un aumento en las emisiones de la fundición lo cual coincide con la reestimación de sus emisiones.

Por otra parte, se presenta la variación de las concentraciones de MP10 y MP2,5 tras la aplicación de la norma en la Tabla 6-112 y Tabla 6-113 respectivamente. Se debe tener en consideración que las concentraciones de estos contaminantes no están exclusivamente relacionadas a las emisiones de las fundiciones, ya que existen otras fuentes que también emiten material particulado.

---

<sup>105</sup> Al respecto cabe destacar que, en el período 2017 a 2020 se reportaron un total de 12 meses con emisiones negativas en HVL (un 25% de los meses). Dada la normativa actual que faculta a la SMA a solicitar una auditoría externa recién cuando se cumplan con tres meses consecutivos con emisiones negativas, esta auditoría no fue solicitada hasta diciembre del 2019 (RE 1857/2019 SMA), lo cual resultó que recién en junio del 2021 se contara con una metodología para el balance de masa que se ajusta a los protocolos (RE 1479/2021 SMA). Lo anterior resultó en que para la fundición la información recolectada para el período donde se observa un deterioro de la calidad del aire sea deficiente, dificultando el análisis de las causas. A esta situación, se suma lo observado en Potrerillos que entre 2017 y 2020 reportó un total de 6 meses (12,5% de los meses) con valores negativos, y que también cuenta con una nueva metodología aprobada en 2022 (RE 48/2022 SMA).

**Tabla 6-112 Concentraciones medias observadas de MP<sub>10</sub> antes y después de la aplicación de la norma [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]**

Fundición	Estación	Media pre-norma	Media post norma	Delta media concentración	Cambio porcentual
Chuquicamata <sup>a</sup>	Aukahuasi	49,47	65,96	16,49	33%
	Hospital El Cobre*	31,19	32,55	1,35	4%
	CD 23 de Marzo*	44,16	45,10	0,94	2%
	Centro*	38,57	27,13	-11,45	-30%
	C.P.V.K*	47,31	44,66	-2,66	-6%
Altonorte <sup>b</sup>	Coviefi*	30,76	24,75	-6,01	-20%
	La Negra-Inacal*	117,12	122,49	5,37	5%
	Sur	29,04	31,87	2,83	10%
Potrerillos <sup>a</sup>	Intelec	43,89	37,95	-5,94	-14%
	CAP	24,01	29,92	5,91	25%
	Cine Inca	28,77	19,69	-9,09	-32%
Hernán Videla Lira <sup>a</sup>	Paipote*	66,60	51,10	-15,50	-23%
	San Fernando*	92,32	45,44	-46,88	-51%
Ventanas <sup>b</sup>	Los Maitenes*	28,04	27,75	-0,29	-1%
	Quintero*	41,01	38,95	-2,05	-5%
Caletones <sup>b</sup>	Sewell	56,99	50,24	-6,75	-12%
	Coya Población*	46,11	34,96	-11,15	-24%
Chagres <sup>a</sup>	Catemu*	68,88	65,41	-3,47	-5%
	Lo Campo*	43,59	41,47	-2,12	-5%

\* Estación representativa para el MP<sub>10</sub>

a. La norma entró en vigor en diciembre de 2018 para estas fundiciones

b. La norma entró en vigor en diciembre de 2016 para estas fundiciones

Nota: La media pre-norma corresponde a la media de las concentraciones medias de los tres años anteriores al inicio de la norma.

Nota 2: La media post norma corresponde a la media de las concentraciones medias de los tres años posteriores al año siguiente del inicio de la norma.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-113 Concentraciones medias observadas de MP<sub>2,5</sub> antes y después de la aplicación de la norma [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]**

Fundición	Estación	Media pre-norma	Media post norma	Delta media concentración	Cambio porcentual
Chuquicamata <sup>a</sup>	Hospital El Cobre*	9,71	10,95	1,24	13%
	CD 23 de Marzo*	9,25	8,89	-0,36	-4%
	Centro*	9,91	5,20	-4,71	-48%
	C.P.V.K*	11,67	10,43	-1,24	-11%
Altonorte <sup>b</sup>	Coviefi	16,41	8,45	-7,95	-48%
	La Negra-Altonorte	25,10	12,65	-12,46	-50%
Potrerillos <sup>a</sup>	Cine Inca	7,52	6,21	-1,32	-17%
Ventanas <sup>b</sup>	La Greda*	15,72	15,26	-0,46	-3%
	Los Maitenes*	12,74	12,29	-0,45	-4%
Caletones <sup>a</sup>	Rancagua I*	23,87	4,50	-19,37	-81%
	Rancagua II*	29,95	5,53	-24,42	-82%

\* Estación representativa para el MP<sub>2,5</sub>

a. La norma entró en vigor en diciembre de 2018 para estas fundiciones

b. La norma entró en vigor en diciembre de 2016 para estas fundiciones

Nota: La media pre-norma corresponde a la media de las concentraciones medias de los tres años anteriores al inicio de la norma.

Nota 2: La media post norma corresponde a la media de las concentraciones medias de los tres años posteriores al año siguiente del inicio de la norma.

Fuente: Elaboración propia

En general, se observa que las concentraciones de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> han tendido a disminuir luego de la aplicación de la norma. Se observan estaciones puntuales en donde hay un aumento de las concentraciones, sin embargo, este aumento es relativamente bajo y no es generalizado para todas las estaciones asociadas a una misma fundición. Por lo tanto, es posible concluir que los aumentos se deben a emisiones provenientes de otras fuentes. Además, se debe tener en cuenta que en general para el año 2021 hay menos datos de mediciones que para los años anteriores, lo que podría afectar en los promedios observados en las estaciones asociadas a las fundiciones en donde la entrada en vigor de la norma fue en diciembre del año 2018.

## 7. Efectos adversos y metodologías de estimación de emisiones para contaminantes asociados a la norma

En la presente sección se detallan todos los antecedentes necesarios para la estimación de beneficios económicos asociados a la norma de emisión, desde los efectos en salud identificados y valorizados y referencias científicas sobre los efectos adversos a considerar, las metodologías y principales factores necesarios para la estimación de los beneficios, hasta la agrupación de contaminantes a considerar al estimar dichos beneficios.

### 7.1 Efectos en salud identificados y valorizados en experiencias internacionales

Para identificar los efectos en la salud se revisa el estudio “*Residual Risk Assessment for the Primary Copper Smelting Source Category in Support of the 2021 Risk and Technology Review Proposed Rule*” (US-EPA, 2021b) realizado en Estados Unidos por la US-EPA, donde se identifican y caracterizan distintos problemas relacionados con la salud y el medio ambiente, asociados a la exposición a contaminantes atmosféricos peligrosos (**HAP** por su sigla en inglés, *hazardous air pollutants*). Entre los contaminantes incluidos en la definición HAP, las mayores cantidades emitidas por el sector de producción de cobre primario son de **compuestos de plomo, compuestos de arsénico, compuestos de selenio, n-hexano, compuestos de cadmio, compuestos de níquel, compuestos de manganeso, compuestos de antimonio y compuestos de cromo (III)**, los que representan el 99% de las emisiones de HAP de la industria de producción primaria de cobre.

Específicamente, en la evaluación de efectos en la salud se prioriza la evaluación del cáncer como efecto de la exposición a HAP, en el contexto de la actualización de la norma de emisión para el sector de producción primaria de cobre. Los temas a tratar son la exposición crónica por inhalación, la detección de riesgo agudo y evaluación refinada, los riesgos en la salud humana por la exposición a través de vías distintas a la inhalación. Junto con lo anterior también se evalúa el riesgo medioambiental. A continuación, se detalla la metodología seguida en dicho documento.

En primer lugar, se estima la exposición humana crónica por vía inhalatoria, donde se utiliza el promedio anual de concentraciones de cada contaminante atmosférico (como arsénico, mercurio, plomo, entre otros) en un lugar específicamente afectado, para una vida entera de exposición de las personas que residen en él, con el fin de obtener la exposición crónica total y su incidencia sobre el cáncer. Dentro de las consideraciones utilizadas para el cálculo del riesgo, se estiman 70 años de modelamiento, es decir, 70 años de exposición permanente. No se aborda la exposición a corto plazo, ya que de esta forma se da un mayor margen para que garantice la protección de la salud. Por otra parte, no se considera la migración de largo plazo o la fluctuación o disminución de la población durante el modelamiento. La estimación de la incidencia de cáncer no se ve afectada, ya que el número total de población sigue siendo el mismo. Sin embargo, los

autores indican que esta última consideración afecta a la distribución del riesgo individual entre la población afectada.

En segundo lugar, se estudia la evaluación de detección de riesgo agudo, donde se evalúan riesgos potenciales a la salud debido a exposiciones agudas a los contaminantes atmosféricos. Se realiza un acercamiento a este estudio con la evaluación de riesgo crónico a la salud, donde se considera como peor escenario que el *peak* de emisiones ocurre durante una hora al año, a la vez que ocurre el peor escenario de las condiciones de dispersión de aire. Este escenario no es muy probable, pero es conservador debido a que se trata de riesgos en la salud. Se realiza un análisis de la dispersión del aire y finalmente se considera el percentil 99 de condiciones de dispersión del aire como más representativo ya que tiene mayor probabilidad de ocurrir, y con esto se considera que sigue siendo conservador para los riesgos de la salud.

En tercer lugar, se evalúan los riesgos en la salud humana por la exposición a través de vías diferentes a la inhalación. Se determinan distintos contaminantes de aire persistentes y bioacumulables en el ambiente, entre los que se priorizan para este análisis los **compuestos de cadmio, dióxidos, compuestos de mercurio, plomo, compuestos orgánicos policíclicos y el arsénico**. Se evalúa el riesgo de estos contaminantes para la salud humana con una exposición sin inhalación, considerando para cada uno de ellos un riesgo máximo de cáncer de 1 en un millón.

En particular, en la evaluación de los efectos de la exposición a compuestos de arsénico, estos están presentes en diversos productos de la agricultura, ganadería y pesca, de tal manera que es posible identificar dichos compuestos en distintas proporciones, en la carne, leche, huevos, frutas, verduras y pescado. De esta manera, el ser humano se encuentra expuesto al arsénico proveniente de los alimentos, donde siempre se encuentra presente a lo menos en pequeñas concentraciones. Las plantas incorporan el arsénico desde el ambiente a través de sus raíces o por deposición de este en las hojas. Esta captación depende de la especiación del arsénico (arsénico trivalente o pentavalente) y de la especie de la planta, por ejemplo, las papas y las zanahorias reciben el arsénico por las raíces y las hojas.

Finalmente, se realiza una evaluación del riesgo ambiental, la cual se enfoca en los contaminantes de aire persistentes y bioacumulables en el ambiente, **cadmio, dióxidos, mercurio, plomo, compuestos orgánicos policíclicos y arsénico**, más dos gases ácidos: **ácido clorhídrico (HCl) y fluoruro de hidrógeno (HF)**. Los primeros se seleccionan debido a que son capaces de acumularse en el suelo, sedimentos y agua, mientras que los ácidos son considerados por ser capaces de causar daño directo a plantas terrestres. Los valores de referencia de toxicidad se miden en  $\text{mg/kg-día}^{106}$ , para que sean comparables entre las especies afectadas.

---

<sup>106</sup> Unidades referidas a  $\text{mg}[\text{dosis}]/\text{kg} [\text{peso animal}]-\text{día}$ .

## 7.2 Comparación de los beneficios calculados en evaluaciones internacionales

En la comparación de los beneficios se utiliza el mismo estudio anterior “*Residual Risk Assessment for the Primary Copper Smelting Source Category in Support of the 2021 Risk and Technology Review Proposed Rule*” (US-EPA, 2021b) realizado en Estados Unidos por la US-EPA, descrito en la Sección 7.1 A continuación, se revisan los valores obtenidos de la evaluación de la detección del riesgo agudo, la evaluación de riesgo en la salud por vías diferentes a la inhalación y por último la evaluación de riesgo ambiental.

Se cuantifica tanto el riesgo crónico como el riesgo de salud por eventos agudos. Para el estudio de la evaluación de la detección aguda, se tiene que el caso del peor escenario con el *peak* de emisiones por una hora al año junto con el peor escenario de las condiciones de dispersión de viento tiene una probabilidad del 0,0005%. Mientras que la probabilidad considerada en el caso del percentil 99 de la dispersión del viento es de 0,04%, que es más real y al mismo tiempo permite garantizar la protección sobre la salud.

Para el caso de la evaluación de los riesgos a la salud por vías diferentes a la inhalación se tiene que el estudio estima las contribuciones de la ingesta de los HAP con persistencia y bioacumulables, presentes en la carne y huevos, frutas y verduras, pescado de agua dulce, y de la tierra ingerida por accidente. Para esta evaluación se elaboran tres perfiles de tipo de persona con mayor probabilidad de verse afectada: pescador, agricultor, y jardinero. De este análisis se concluye que el riesgo de cáncer con exposición a arsénico, cadmio y mercurio es inferior a un nivel preocupante para el pescador y el jardinero. En el caso del agricultor, se concluye que el riesgo de cáncer con exposición a mercurio es inferior a un nivel preocupante, mientras que los escenarios de exposición a arsénico y cadmio se consideraron poco realistas.

En la evaluación de riesgo ambiental se hacen estudios de valores referenciales de toxicidad respecto al arsénico, cadmio, mercurio divalente y metil mercurio. Para la evaluación del impacto sobre la fauna, se les da agua a con cantidades de arsénico individuos de la especie para obtener el nivel más bajo de efectos adversos observados (LOAEL) para luego calcular el nivel de efectos adversos no observados (NOAEL). Por ejemplo, para el visón americano (pequeño mamífero que come peces) se tiene un resultado de NOAEL igual a 0,052 mg As/kg-día, mientras que para la serreta grande (ave pequeña que come peces, parecido a un pato) se obtiene un NOAEL igual a 0,15 mg As/kg-día, mientras que para el metil mercurio los valores de NOAEL obtenidos son 0,0246 mg [Hg]/kg-día para el visón y un NOAEL igual a 0,013 mg [Hg]/kg-día Para cada contaminante priorizado se obtienen estos valores para las dos especies mencionadas.

En la Tabla 7-1 se muestra una síntesis comparativa de cada efecto, donde se indica si el efecto fue identificado, cuantificado y valorizado. El efecto de exposición crónica de inhalación humana solamente se logra identificar y se destaca el cáncer como consecuencia. Mientras que la detección de riesgo agudo, la exposición por vías diferentes a la inhalación y la exposición a

arsénico en ecosistemas se logran identificar y cuantificar. No se indica ningún tipo de valorización de los efectos cuantificados.

**Tabla 7-1 Cuantificación y valorización de cada efecto en la salud identificado**

Motivo	Efecto	Identificación	Cuantificación	Valorización
Exposición crónica de inhalación humana	Enfermedades varias	✓	×	×
	Cáncer por exposición a contaminantes cancerígenos	✓	×	×
Detección de riesgo agudo	Enfermedades varias	✓	✓	×
Exposición por vías diferentes a la inhalación	Cáncer por exposición a contaminantes cancerígenos	✓	✓	×
Exposición a arsénico en ecosistemas	Muerte de flora	✓	✓	×
	Muerte de fauna	✓	✓	×

Fuente: Elaboración propia

### 7.3 Revisión de investigaciones científicas desde 2011 sobre efectos adversos

Para actualizar el conocimiento científico respecto de los efectos adversos de los contaminantes normados en la norma de emisión, se realizó una revisión bibliográfica de investigaciones científicas publicadas a partir del año 2011. La búsqueda se efectuó utilizando principalmente el motor de búsqueda PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>) y en ella se incluyeron todo tipo de estudios relacionados con efectos adversos sobre la salud de la población producto de la exposición ambiental al arsénico, principalmente por la vía inhalatoria. La estrategia de búsqueda fue efectuada usando palabras clave libres y descriptores del Medical Subject Headings (MeSH) pertinentes en inglés. Se emplearon sinónimos para refinar la búsqueda. Los operadores booleanos empleados para formular la cadena de búsqueda fueron AND y OR. La búsqueda arrojó 237 publicaciones de las cuales se revisaron los resúmenes de cada título potencialmente relevante identificando 104 que cumplen con los criterios de inclusión. También se realizó la búsqueda en Tripdatabase (<https://www.tripdatabase.com/>).

Dado que, de los contaminantes normados, al arsénico no ha sido regulado en normativas asociadas a la calidad del aire, se realiza especialmente énfasis en este contaminante. En el “Anexo 1: Resultados de investigaciones científicas sobre efectos adversos del arsénico” (ver Sección 11.1) se presenta el detalle de la revisión, mientras que en la Sección 7.3.1 se presenta la discusión con los principales hallazgos.

#### 7.3.1 Discusión respecto a efectos adversos del arsénico

En base a las publicaciones científicas es posible destacar que existe consenso de que lograr determinar de manera precisa la concentración del arsénico en el aire es fundamental para evaluar la exposición y los riesgos a la salud humana, ya que, aunque existe gran cantidad de información disponible sobre el arsénico total en el aire, poco se sabe sobre la contribución relativa de cada especie química del metaloide (Lewis, Reid, Pollock, & Campleman, 2012).

Por otra parte existe evidencia científica de que la toxicidad del arsénico depende principalmente del estado de oxidación y de la forma molecular en la que se encuentra (Hong, Song, & Chung, 2014; Jomova et al., 2011) y que los efectos tóxicos dependen de la formación de metabolitos metilados que contienen arsénico trivalente (Thomas, 2021), y que la bioconversión del arsénico inorgánico en metabolitos metilados afecta la acción como tóxico o carcinógeno (Cullen, 2014).

Dado lo anterior es importante recalcar la importancia de estandarizar a nivel país las metodologías para la cuantificación del metaloide en el aire, considerando especialmente los procedimientos involucrados en el muestreo, pretratamientos de muestras y el posterior análisis instrumental con procedimientos estandarizados para el aseguramiento y control de la calidad, de manera asegurar exactitud, precisión, representatividad y comparabilidad de la información generada (Lewis et al., 2012).

Algunos estudios han determinado que tanto cuando se inhala material particulado (MP), las partículas retenidas se depositan en diferentes regiones del Tracto Respiratorio (TR) según su tamaño y, como regla general, cuanto más pequeña sea la partícula, más profundamente penetrará en el TR y más tiempo será retenida (Martin et al., 2014). Además hay que considerar que otras publicaciones han determinado que el arsénico se acumula más en la fracción fina del MP (García-Aleix, Delgado-Saborit, Verdú-Martín, Amigó-Descarrega, & Esteve-Cano, 2014; Sanchez-Rodas, Sanchez De La Campa, Oliveira, & De La Rosa, 2012). Los resultados también indican que el As (III) siendo más tóxico tiende a concentrarse preferentemente en la fracción más fina MP2.5 en comparación con el As (V), lo que representa un riesgo adicional para la salud de la población expuesta (Sanchez-Rodas et al., 2012). Estos resultados muestran la importancia de la especiación del arsénico en el aire, debido a la presencia de especies de arsénico con distinta toxicidad.

Por otra parte, hay antecedentes que refuerzan la necesidad de controlar y regular las posibles fuentes de contaminación por metales, ya que indican que la co-exposición ambiental humana al arsénico y otros metales como el Pb, Cd, Hg tiene el potencial de provocar efectos adversos como daño hepático (Huang et al., 2021) y efectos neurotóxicos incluso si sus contribuciones individuales están por debajo de los NOAEL<sup>107</sup> (Zhou et al., 2018).

### **7.3.2 Identificación de efectos adversos de otras sustancias controladas por la norma de emisión en el aire**

Es posible encontrar en el aire otros contaminantes atmosféricos que se sabe o se sospecha que causan efectos adversos a la salud humana. A continuación, se presentan para algunas de estas sustancias que pueden estar presentes en el medioambiente, una descripción general de los efectos a la salud asociados a la exposición por vía inhalatoria (Tabla 7-2).

---

<sup>107</sup> NOAEL: NO OBSERVED ADVERSE EFFECT LEVEL, nivel sin efecto adverso observado.

**Tabla 7-2 Identificación de peligros de las sustancias de interés**

Sustancia	Identidad (No CAS)	Efectos en la salud humana
SO <sub>2</sub>	7446-09-5	Inhalación: La exposición a concentraciones por encima de 2 ppm pueden irritar los ojos, la nariz, la garganta, los senos paranasales, con ahogo, tos y broncoconstricción a veces. Las concentraciones de 50-100 ppm se consideran peligrosas, y las exposiciones a 400-500 ppm son potencialmente mortales. La exposición a altas concentraciones puede resultar en edema pulmonar y parálisis ("SO <sub>2</sub> . Toxicology details: (2021). In Micromedex (Columbia Basin College Library ed.) [Electronic version].micromedex.pdf," n.d.).
MP	-	Inhalación: Muerte prematura en personas con enfermedad cardíaca o pulmonar, ataques cardíacos no fatales, latido del corazón irregular, asma agravada, disminución de la función pulmonar, aumento de los síntomas respiratorios, como irritación de las vías respiratorias, tos o dificultad para respirar. Las personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, los niños y los adultos mayores son los más propensos a verse afectados por la exposición a la contaminación por partículas.(WHO, 2000a)
NO <sub>2</sub>	10102-44-0	Inhalación: La exposición crónica al dióxido de nitrógeno ha producido una reducción de la función pulmonar con una capacidad vital reducida, una capacidad respiratoria máxima reducida, una reducción de la capacidad pulmonar y un aumento del volumen residual. El síndrome involucra disnea de esfuerzo, estertores húmedos y sibilancias, y tos productiva y es similar al enfisema Se han informado asociaciones entre la exposición crónica al dióxido de nitrógeno y la contaminación del aire y los resultados respiratorios adversos ("NO <sub>2</sub> . Toxicology details: (2021). In Micromedex (Columbia Basin College Library ed.) [Electronic version].micromedex.pdf," n.d.)
Ni	7440-02-0	Inhalación: La inhalación de níquel se ha relacionado con irritación pulmonar, asma, neumoconiosis, fibrosis pulmonar y edema pulmonar. Los primeros síntomas después de la inhalación son mareos, dolor de garganta, ronquera y debilidad. A veces se reportan gingivitis, estomatitis, sabor metálico, irritación nasal, daño en la mucosa nasal, perforación del tabique nasal, hiposmia / anosmia, tos y dificultad para respirar. La exposición crónica al níquel o sus compuestos puede causar rinitis, sinusitis, alergias y cáncer de las cavidades del seno nasal, los pulmones y posiblemente otros órganos. Varias estudios de trabajadores de refinerías de níquel han informado tasas excesivas de cáncer de pulmón y nasal, y posible cáncer excesivo de la laringe ("Ni. Toxicology details: (2021). In Micromedex (Columbia Basin College Library ed.) [Electronic version].micromedex.pdf," n.d.)
V	7440-62-2	Inhalación: Respirar aire con pentóxido de vanadio puede producir tos que puede durar varios días después de la exposición. Las exposiciones por inhalación a los compuestos de vanadio y vanadio resultan principalmente en efectos adversos para el sistema respiratorio. Los síntomas más comunes informados en exposiciones laborales fueron: irritación del tracto respiratorio, conjuntivitis, dermatitis, tos, broncoespasmo, congestión pulmonar y bronquitis ("V. Toxicology details: (2021). In Micromedex (Columbia Basin College Library ed.) [Electronic version].micromedex.pdf," n.d.).

Sustancia	Identidad (No CAS)	Efectos en la salud humana
Hg	7439-97-6	Inhalación: La inhalación de vapor de Hg afecta principalmente a los pulmones. La patología pulmonar incluye neumonitis, bronquiolitis necrotizante, edema pulmonar, lesión pulmonar aguda y muerte. También pueden desarrollarse efectos en el sistema nervioso central, daño renal, gingivitis y estomatitis. La inhalación crónica conduce a la tríada clásica de trastornos neuropsiquiátricos, temblor y gingivostomatitis. Los niños y algunos adultos desarrollan acrodinia asociada con calambres severos en las piernas, irritabilidad, insomnio, diaforesis, hipertensión, erupción miliarial y descamación de la piel eritematosa en los dedos, las manos y los pies. Se ha reportado disfunción renal ("Hg. Toxicology details: (2021). In Micromedex (Columbia Basin College Library ed.) [Electronic version].micromedex.pdf," n.d.).
Pb	7439-92-1	Efectos en el tracto gastrointestinal, sistema hematopoyético, sistema cardiovascular, sistema nervioso central y periférico, riñones, sistema inmunológico y sistema reproductivo y los síntomas no invertidos, como la disfunción del nervio periférico, se producen a niveles de 30-50 ug / dL en adultos; no hay un umbral claro evidente ("Pb. Toxicology details: (2021). In Micromedex (Columbia Basin College Library ed.) [Electronic version].micromedex.pdf," n.d.).

Fuente: Elaboración propia

### 7.3.2.1 Coeficientes de riesgos

Se recopilieron los valores de referencia basados en la evaluación del efecto toxicológico de las sustancias de interés respecto a la exposición aguda (Tabla 7-3) y exposición crónica (Tabla 7-4).

**Tabla 7-3 Valores de referencia exposición aguda**

Sust	MRL		AEGL 1 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		AEGL 2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		AEGL 3 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		REL	ERPG-1	ERPG-2	IDLH/10
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ / Endpoint		1 hrs (no discapacitante) / Endpoint		1 hrs (discapacitante) / Endpoint		1 hrs (letal) / Endpoint		$\mu\text{g}/\text{m}^3$			
SO <sub>2</sub>	26,18	sistema respiratorio	520	dosis sin efecto observado (NOEL), para broncoconstricción en asmáticos en ejercicio	1.950	Broncoconstricción moderada en asmáticos en ejercicio	78.000	Calculada en base a BMC LC5 en ratas expuestas a 4 horas	-	-	-	-
MP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NO <sub>2</sub>	-	-	940	ardor leve en los ojos, dolor de cabeza leve, opresión en el pecho o dificultad para respirar en asmáticos en ejercicio.	23.000	sensación de ardor en la nariz y pecho, tos, disnea, producción de esputo en voluntarios normales	38.000	irritación notoria, cambios histopatológicos en los pulmones, fibrosis y edema del tejido cardíaco, necrosis en el hígado, sin muertes en animales de experimentación (monos)	-	-	-	-
Ni	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2	-	-	1000
V	0,8	sistema respiratorio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hg	-	-	No recomendado	Inodoro, sin señales de advertencia	1.700	Sin efectos en fetos	8.900	Mayor efecto no letal	0,6	-	2.100	-
Pb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10000

MRL = ATSDR minimum risk levels for no adverse effects

AEGL = Acute exposure guideline levels for mild effects

REL = California EPA reference exposure level for no adverse effects. Most, but not all, RELs are for 1-hour exposures.

ERPG = US DOE Emergency Removal Program guidelines for mild or transient effects (ERPG-1) and irreversible or serious effects (ERPG-2) for 1-hour exposures.

IDLH/10 = One-tenth of levels determined by NIOSH to be imminently dangerous to life and health, approximately comparable to mild effects levels for 1-hour exposures. IDLH/10 values shown here are only for substances that lack AEGL and ERPG values.

NOEL: (No observed adverse effect level) o "dosis sin efecto adverso"

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 7-4 Valores de referencia exposición crónica**

Sustancia	MRL			NONCANCER		CANCER		
	Duración de la exposición	µg/m <sup>3</sup>	Endpoint	µg/m <sup>3</sup>	SOURCE	1/( µg/m <sup>3</sup> )	EPA WOE	SOURCE
SO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-
MP	-	-	-	-	-	-	-	-
NO <sub>x</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-
NO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	-	-	-	1,4E-5	ATSDR	2,4E-4	A	IRIS
V	-	-	-	-	-	-	-	-
	Crónica	0,1	sistema respiratorio	1,0E-4	ATSDR	-	-	-
Hg	Crónica	0,2	Sistema neurológico	0,3	IRIS	-	D	US EPA
Pb				0,15	EPA-OAQPS	-	B2	US EPA

MRL = ATSDR minimum risk levels for no adverse effects

EPA WOE (1986 Guidelines) = weight of evidence for carcinogenicity under the 1986 EPA cancer guidelines (A = human carcinogen; B1 = probable carcinogen, limited human evidence; B2 = probable carcinogen, sufficient evidence in animals; C = possible human carcinogen; D = not classifiable; E = evidence of noncarcinogenicity).

Fuente: Elaboración propia

## 7.4 Metodologías para la estimación de otros beneficios

De acuerdo a la guía metodológica (MMA, 2013b) la estimación de beneficios debe considerar los siguientes pasos, bajo los cuales se estructuran las siguientes subsecciones.

1. Identificación de impactos
2. Cuantificación
3. Valorización

### 7.4.1 Identificación de impactos

En la Tabla 7-5 se muestra una lista de impactos identificados con una breve descripción. Para su construcción se consideraron los tipos de efectos observados en análisis internacionales similares (ver Sección 7.1), la evidencia científica respecto a los efectos (ver Sección 7.3), así como los lineamientos presentados en la Guía Metodológica para Elaboración de AGIES (MMA, 2013b). Se seleccionaron aquellos efectos que son consecuencia de las emisiones de los contaminantes normados por la actual norma de emisiones: MP, SO<sub>2</sub>, As, Hg. Estos efectos se presentan en categorías generales ya que cada uno posee diferentes efectos específicos (por ejemplo, el daño a la salud se manifiesta de distintas formas).

**Tabla 7-5 Tipos de impacto identificados**

Efecto	Breve descripción
<b>Daño a la Salud</b>	Las partículas y compuestos emitidos al aire en exceso pueden producir efectos nocivos en la salud de las personas, como por ejemplo daños en el sistema cardio-respiratorio.
<b>Disminución en visibilidad</b>	La presencia de partículas en el aire reduce la visibilidad causando una disminución del bienestar y calidad de vida.
<b>Daño a materiales</b>	El exceso de contaminación atmosférica puede causar daños en los materiales de construcción alterando propiedades físicas y químicas de estos.
<b>Daño a ecosistemas acuáticos</b>	Altas concentraciones de NO <sub>x</sub> y SO <sub>x</sub> pueden producir deposición ácida en el agua modificando su composición y dificultando la supervivencia de especies acuáticas.
<b>Daño en plantas y bosques</b>	La deposición ácida puede alterar el crecimiento de plantas y árboles. Además, el ozono y otras partículas pueden ingresar vía las estomas de las plantas y dañar su estructura.
<b>Aumento en efecto invernadero</b>	El carbono negro, que forma parte del material particulado, es un gas de efecto invernadero que aumenta el efecto del mismo nombre acrecentando la probabilidad de elevar las temperaturas a nivel global, gatillando el cambio climático.

Fuente: Adaptado de (MMA, 2013b)

Los daños a la salud suelen ser más estudiados y a la hora de ser valorizados suelen tener mayor relevancia. Por esta razón, en la Tabla 7-6 se muestran los efectos en salud identificados con mayor detalle.

**Tabla 7-6 Impactos en salud identificados**

Categoría	Efecto	Causa
<b>Mortalidad prematura</b>	Mortalidad Prematura	Todas
		Respiratoria
<b>Acciones médicas</b>	Admisiones Hospitalarias	Asma
		Cardiovascular
		Enfermedad respiratoria crónica
		Neumonía
		Respiratoria
<b>Restricción actividad</b>	Visitas médicas	Bronquitis aguda
	Visitas sala emergencia	Asma
	Días de actividad restringida	Todas
<b>Otros</b>	Días de actividad restringida menor	Todas
	Días laborales perdidos	Todas
	Días de colegios perdidos	Todas
	Nacimientos prematuros	Todas
<b>Otros</b>	Reacciones alérgicas	Todas
	Deterioro cognitivo	Todas
	Problemas reproductivos	Todas

Fuente: Elaboración propia

### 7.4.2 Cuantificación

En esta etapa se aspira a relacionar el cambio de concentración con el nivel de cada tipo de impacto. Es importante resaltar que no todos los efectos identificados pueden ser cuantificados.

El daño a la salud se puede cuantificar con funciones de concentración-respuesta obtenidas a partir de estudios epidemiológicos (metodología en detalle más adelante). Como se ha mencionado, este efecto suele ser el más estudiado y el de mayor peso. La disminución de visibilidad también se puede cuantificar con factores que predicen la visibilidad asociada a ciertas concentraciones. Sin embargo, este bien público suele tener baja valoración y su valorización varía mucho geográficamente (Fischhoff & Furby, 1988). Por su lado, cuantificar el daño a materiales es más complejo dada la gran cantidad de receptores y el efecto distinto que se tiene en cada material. Para poder cuantificar este efecto se necesita gran cantidad de información que no siempre está disponible. El daño a ecosistemas acuáticos, plantas y bosques es igualmente complejo de cuantificar. La lluvia acida se puede modelar con la concentración y meteorología, pero la sensibilidad de respuesta de estos organismos es más incierta. Existen métodos para evaluar esto extrapolando resultados de organismos específicos (Suter II, 2016) pero requieren cierto mínimo de información toxicológica. Por último, el efecto en el cambio climático se puede calcular determinando la cantidad de gases de efecto invernadero emitida.

Específicamente en este estudio, solo se cuantifica el efecto en salud, donde la estimación estadística del número de eventos para cada efecto se estima a partir de la Ecuación 1:

$$\Delta E_{ij}^k = [\exp(\beta_{ij}^k * \Delta C^k) - 1] * Pobj_j^k * IR_{ij}$$

**Ecuación 1 Cambio en la incidencia de los efectos**

Fuente: (MMA, 2013b)

Donde,

$\Delta E_{ij}^k$ : Cambio en el número de efectos i debido al cambio de concentraciones del contaminante k en la población j

$\beta_{ij}^k$ : Coeficiente de riesgo unitario del efecto i en la población j producto del cambio en la concentración del contaminante k

$\Delta C^k$ : Cambio de la concentración del contaminante k

$Pobj_j^k$ : Número de personas de la población j expuesta al contaminante k

$IR_{ij}$ : Tasa incidencia del efecto i en la población j

En palabras simples, el término  $\exp(\beta_{ij}^k * \Delta C^k) - 1$  expresa cuántos eventos adicionales ocurren producto de la exposición a  $\Delta C^k$  respecto del número de eventos base esperados:  $Pobj_j^k * IR_{ij}$ .

A modo de ejemplo, en la Tabla 7-7 y Tabla 7-8 se presentan los coeficientes  $\beta_{ij}^k$  para el material particulado y dióxido de azufre, respectivamente. Estos fueron rescatados de la recomendaciones de GreenLab (2018) y se basan en la revisión del Estado del Arte internacional en este tipo de análisis para instrumentos de gestión del aire, de forma complementaria a la Guía para Elaboración de AGIES (MMA, 2013b). En este paso es importante no caer en doble conteos al ocupar distintas categorías y grupos receptores. Por ejemplo, no se pueden sumar los efectos por causas respiratorias con los efectos por asma para el mismo grupo etario, pues el asma es un subconjunto de causas respiratorias.

**Tabla 7-7 Coeficientes de Dosis-Respuesta para MP2.5 (por  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )**

Tipo de efecto	Causa	Edades	Coeficiente	Fuente
<b>Mortalidad</b>	Todas las causas	30+	$9,47 \times 10^{-3}$	(Krewski et al., 2009; Lepeule, Laden, Dockery, & Schwartz, 2012)
<b>Admisiones Hospitalarias</b>	Cardiovascular	18-64	$1,40 \times 10^{-3}$	(Moolgavkar, 2000)
	Cardiovascular	65+	$1,89 \times 10^{-3}$	(Zanobetti, Franklin, Koutrakis, & Schwartz, 2009)
	Enfermedades respiratorias	65+	$1,39 \times 10^{-3}$	(Kloog, Coull, Zanobetti, Koutrakis, & Schwartz, 2012; Zanobetti et al., 2009)
	EPOC	18-64	$2,20 \times 10^{-3}$	(Moolgavkar, 2000)
	Asma	<65	$3,32 \times 10^{-3}$	(Sheppard, 2003)
<b>Visitas sala emergencia</b>	Asma	Todas	$1,39 \times 10^{-3}$	(Glad et al., 2012; Mar, Koenig, & Primomo, 2010; Slaughter et al., 2005)
<b>Días laborales perdidos</b>	Todas las causas	18-64	$4,60 \times 10^{-3}$	(Ostro, 1987)

Nota: En los casos que se presenta más de una fuente para un coeficiente, el valor que se presenta corresponde al promedio entre las fuentes.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 7-8 Coeficientes de Dosis-Respuesta para Dióxido de Azufre (por  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )**

Tipo de efecto	Causa	Edades	Coeficiente	Fuente
<b>Admisiones Hospitalarias</b>	Enfermedades respiratorias	65+	$0,80 \times 10^{-3}$	(Schwartz, Zanobetti, & Bateson, 2003)
<b>Visitas sala emergencia</b>	Asma	0-14	$5,00 \times 10^{-3}$	(Wilson, Wake, Kelly, & Salloway, 2005)
	Asma	65+	$11,00 \times 10^{-3}$	(Wilson et al., 2005)

Fuente: Elaboración propia

Siguiendo con las variables presentadas la Ecuación 1, a modo de ejemplo, la población de cada localidad afectada se presenta en la Tabla 7-9. Para estimar la población se consideró el reporte del INE respecto a la población censada en 2017 en las “Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos” (INE, 2019).

**Tabla 7-9 Población proyectada para cada localidad**

Localidad	Población proyectada 2035 (habitantes)
Calama	184.185
ChiuChiu	376
La Negra	405
Antofagasta	430.521
El Salvador	5.397
Potreriillo	-
Copiapó	166.759
Tierra Amarilla	10.167
Quintero	34.078
Puchuncaví	6.645
Ventanas	10.482
Catemu	8.897
Coya	3.386
<b>Total</b>	<b>861.299</b>

Fuente: (INE, 2019)

Por último, las tasas de incidencia  $IR_{ij}$  se pueden obtener del estudio para automatizar la estimación de la estimación de tasas de incidencia (GreenLab, 2020). Estas tasas pueden tener distintos niveles de desagregación dependiendo del uso o disponibilidad de información. En este estudio, y dado que se incluyen comunas con población pequeñas, se utilizan las tasas de incidencia de mortalidad a nivel provincial las cuales tienen mayor robustez estadística frente a las tasas comunales.

### 7.4.3 Valoración

El último paso para estimar beneficios es valorizar monetariamente los impactos cuantificados. Para esto, a cada evento estimado se le atribuye un valor, que puede ser tanto directo como indirecto. En el caso de mortalidad, la valorización se tendría que realizar con el Valor de la Vida Estadística (VVE). Para morbilidad por su lado, se utilizan estimaciones de costos unitarios (el beneficio es una reducción de costos). A modo de ejemplo, en la Tabla 7-10 se muestran algunos costos unitarios directos obtenidos del estudio para actualizar los costos unitarios (GreenLab, 2020).

**Tabla 7-10 Comparación de costos unitarios directos según causa y grupo de edad [UF/caso]**

Efecto	Endpoints	(GreenLab, 2020)	Guía AGIES (MMA, 2013b)
Admisiones Hospitalarias	HA-Asth-<65	6,5	21,0
	HA-CLD-18-64	5,0	27,4
	HA-CVD-65+	81,8	43,9
	HA-CVD-18-64	100,8	45,3
	HA-RSP-65+	2,7	29,4
Visitas sala emergencia	ERV-Asth-all	2,2	0,8
	ERV-Asth-<15	2,2	0,8
	ERV-Asth-65+	2,2	0,8

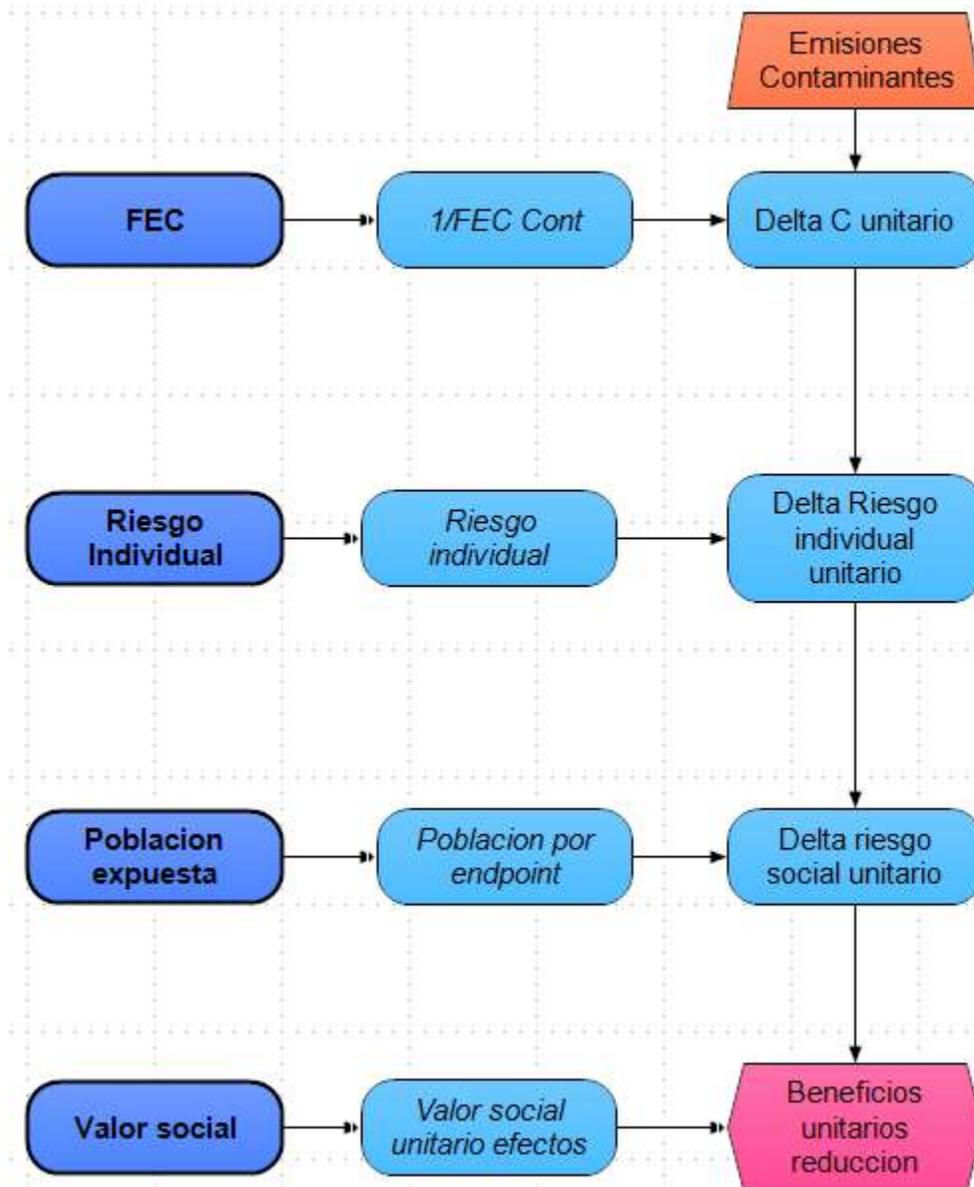
Fuente: Extracto de (GreenLab, 2020)

## 7.5 Estimación de beneficios económicos

En la Figura 7-1, se presenta de forma simplificada el modelo utilizado para la estimación de los beneficios económicos unitarios de la reducción de emisiones. Se observa que, en primer lugar, fue necesario determinar los Factores de Emisión-Concentración de las fuentes asociados a las localidades de interés de forma de poder determinar la variación en las concentraciones locales al disminuir las emisiones de contaminantes en una tonelada anual.

Por otra parte, se estimaron los riesgos individuales para diferentes efectos en la salud en distintos grupos etarios, con la intención de poder determinar la cantidad de casos que se evitarían al disminuir en una unidad las emisiones de contaminantes. Al considerar la población proyectada para cada localidad (ver Tabla 7-9 de la Sección 7.4.2), se obtuvo el riesgo social unitario, es decir, la cantidad de casos que se presentarían en cada localidad al disminuir en una unidad las emisiones de contaminantes.

Finalmente, utilizando los costos unitarios según causa y grupo de edad presentados en la Tabla 7-10 de la Sección 7.4.3, es posible determinar los beneficios de la reducción de emisiones al disminuir en una tonelada anual las emisiones de los contaminantes.



**Figura 7-1 Extracto del modelo para estimación de beneficios unitarios**

Fuente: Elaboración propia

### 7.5.1 Factor Emisión Concentración (FEC)

Para la estimación de los Factores de Emisión-Concentración de material particulado y SO<sub>2</sub> se priorizó la obtención de información a partir de búsquedas bibliográficas. En general, se revisaron estudios de calidad del aire, modelaciones de dispersión de contaminantes y antecedentes para la elaboración de planes de descontaminación ambiental en las zonas de interés.

Para los casos en que no fue posible contar con información, se realizaron estimaciones a partir de las emisiones reportadas en los informes de fiscalización realizados por la SMA y de las concentraciones observadas en las estaciones de monitoreo. En el caso del SO<sub>2</sub>, esto se realizó asumiendo que todas las concentraciones de SO<sub>2</sub> observadas provienen de las fundiciones (excepto en los casos en que existen termoeléctricas cerca, como por ejemplo en la fundición Ventanas). En el caso del material particulado, se observaron las variaciones en concentraciones medidas en los periodos en que las fundiciones dejaron de funcionar respecto a periodos de funcionamiento normal.

Los valores determinados de FEC para la emisión de material particulado y SO<sub>2</sub> se presentan en la Tabla 7-11 y Tabla 7-12 respectivamente.

**Tabla 7-11 FEC emisión MP [(t/año)/(μg/m<sup>3</sup>)]**

Fuente	Localidad	FEC
Chuquicamata	Calama	3.931
	ChiuChiu	17.817
Altonorte	La Negra	1.145
	Antofagasta	4.495
Potrerillos	El Salvador	2.070
	Potreriillos	269
Hernán Videla Lira	Copiapó	249
	Tierra Amarilla	425
Ventanas	Quintero	47
	Puchuncaví	234
	Ventanas	188
Chagres	Catemu	23
Caletones	Coya	14.471

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 7-12 FEC emisión SO<sub>2</sub> [(t/año)/(μg/m<sup>3</sup>)]**

Fuente	Localidad	FEC SO <sub>2</sub>	FEC MP2.5
Chuquicamata	Calama	-	70.611
	ChiuChiu	-	1.098.806
Altonorte	La Negra	24.900	-
	Antofagasta	97.755	-
Potrerillos	El Salvador	4.444	-
	Potreriillo	578	-
Hernán Videla Lira	Copiapó	420	-
	Tierra Amarilla	510	-
Ventanas	Quintero	-	6.448
	Puchuncaví	-	32.174
	Ventanas	-	25.920
Chagres	Catemu	896	-
Caletones	Coya	7.970	-

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, las estimaciones de los FEC de las emisiones de arsénico se estimaron a partir de la información de emisiones fugitivas y puntuales de las fundiciones y las concentraciones observadas en las estaciones de monitoreo. Los valores estimados se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 7-13 FEC emisión As [(t/año)/(ng/m3)]**

Fuente	Localidad	Fugitiva	Puntual
Chuquicamata	Calama	8,8	9,8
	ChiuChiu	136,4	103,9
Altonorte	La Negra	4,5	115,7
	Antofagasta	17,8	30,6
Potrerillos	El Salvador	15,9	20,8
	Potrerillo	2,1	5,7
Hernán Videla Lira	Copiapó	0,2	0,9
	Tierra Amarilla	0,4	0,2
Ventanas	Quintero	0,6	2,2
	Puchuncaví	3,0	4,6
	Ventanas	2,5	2,2
Chagres	Catemu	1,8	1,0
Caletones	Coya	14,5	47,5

Fuente: Elaboración propia

## 7.5.2 Riesgo individual

A partir de los coeficientes de Dosis-Respuesta y de las tasas de incidencia, tal como se explica en la Sección 7.4.2, se calcularon los riesgos individuales para distintos efectos en la salud en diferentes grupos etarios. Los efectos a la salud considerados se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 7-14 Efectos a la salud asociados a los contaminantes en estudio**

Código efecto	Efecto	Causa	Grupo etario
CAN-RSP-All	Cáncer	Respiratoria	Todas
ERV-Asth-0-14	Visitas sala emergencia	Asma	0-14
ERV-Asth-65+	Visitas sala emergencia	Asma	65+
ERV-Asth-All	Visitas sala emergencia	Asma	Todas
HA-Asth-<65	Admisiones hospitalarias	Asma	65+
HA-CLD-18-64	Admisiones hospitalarias	EPOC	18-64
HA-CVD-18-64	Admisiones hospitalarias	Enfermedades cardiovasculares	18-64
HA-CVD-65+	Admisiones hospitalarias	Enfermedades cardiovasculares	65+
HA-RSP-65+	Admisiones hospitalarias	Enfermedades respiratorias	65+
Mort-All-30+	Mortalidad	Todas las causas	30+
WLD-All-18-64	Productividad laboral perdida	Todas las causas	18-64

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7-15 se presentan los riesgos individuales de mortalidad para personas sobre 30 años de edad asociado a las concentraciones de MP, mientras que en la Tabla 7-16 se presentan los

riesgos individuales de cáncer pulmonar en personas de todas las edades asociados a concentraciones de arsénico. En el Anexo de la Sección 11.2 se presentan los riesgos determinados para todos los efectos en la salud y grupos etarios considerados, asociados a las localidades de interés.

**Tabla 7-15 Riesgos individuales de mortalidad asociados a concentraciones de MP, personas sobre 30 años [casos/t/año]**

Fuente	Localidad	Riesgo
<b>Chuquicamata</b>	Calama	0,000015
	Chiu-Chiu	0,000003
<b>Altonorte</b>	La Negra	0,000076
	Antofagasta	0,000019
<b>Potrerosillos</b>	El Salvador	0,000036
	Potrerosillo	0,000281
<b>Hernán Videla Lira</b>	Copiapó	0,000294
	Tierra Amarilla	0,000172
<b>Ventanas</b>	Quintero	0,002260
	Puchuncaví	0,002260
	Ventanas	0,002260
<b>Chagres</b>	Catemu	0,004284
<b>Caletones</b>	Coya	0,000006

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 7-16 Riesgos individuales de cáncer asociados a concentraciones de arsénico, todas las edades [casos/t/año]**

Fuente	Localidad	Riesgo asociado a emisiones fugitivas	Riesgo asociado a emisiones puntuales
<b>Chuquicamata</b>	Calama	6,54E-09	5,86E-09
	Chiu-Chiu	4,20E-10	5,52E-10
<b>Altonorte</b>	La Negra	1,26E-08	4,95E-10
	Antofagasta	3,22E-09	1,87E-09
<b>Potrerosillos</b>	El Salvador	3,61E-09	2,76E-09
	Potrerosillo	2,78E-08	1,00E-08
<b>Hernán Videla Lira</b>	Copiapó	2,30E-07	6,72E-08
	Tierra Amarilla	1,35E-07	2,83E-07
<b>Ventanas</b>	Quintero	9,38E-08	2,59E-08
	Puchuncaví	1,88E-08	1,26E-08
	Ventanas	2,33E-08	2,58E-08
<b>Chagres</b>	Catemu	3,13E-08	5,70E-08
	Llailay	3,19E-08	5,82E-08
	Panquehue	2,55E-08	4,65E-08
<b>Caletones</b>	Coya	3,96E-09	1,21E-09

Fuente: Elaboración propia

### 7.5.3 Riesgo Social

Utilizando la población proyectada para cada localidad (ver Tabla 7-9 de la Sección 7.4.2), se obtuvo la cantidad de casos evitados en cada localidad por tipo de efecto a la salud al disminuir en una unidad las emisiones de los contaminantes. En la siguiente tabla, se presentan los números de casos evitados agregados por fundición.

**Tabla 7-17 Riesgo social de diferentes efectos a la salud para los diferentes tipos de contaminantes por fundición [casos/t/año]**

Fundición	Contaminantes NE	Efecto	Fugitiva	Puntual
Altonorte	As	CAN-RSP-All	0,001	0,001
	MP	ERV-Asth-All		6,92
		HA-Asth-<65		0,04
		HA-CLD-18-64		0,02
		HA-CVD-18-64		0,49
		HA-CVD-65+		0,77
		HA-RSP-65+		0,28
		Mort-All-30+		5,30
		WLD-All-18-64		38,39
		SO2	ERV-Asth-0-14	
	ERV-Asth-65+			2,17
	HA-RSP-65+			0,05
Caletones	As	CAN-RSP-All	0,000	0,000
	MP	ERV-Asth-All		0,02
		HA-Asth-<65		0,00
		HA-CLD-18-64		0,00
		HA-CVD-18-64		0,00
		HA-CVD-65+		0,00
		HA-RSP-65+		0,00
		Mort-All-30+		0,01
		WLD-All-18-64		0,09
		SO2	ERV-Asth-0-14	
	ERV-Asth-65+			0,04
	HA-RSP-65+			0,00
Chagres	As	CAN-RSP-All	0,001	0,002
	MP	ERV-Asth-All		28,23
		HA-Asth-<65		0,23
		HA-CLD-18-64		0,25
		HA-CVD-18-64		2,09
		HA-CVD-65+		8,03
		HA-RSP-65+		4,65
		Mort-All-30+		25,57
		WLD-All-18-64		137,10
		SO2	ERV-Asth-0-14	
	ERV-Asth-65+			1,21
	HA-RSP-65+			0,07
Chuquicamata	As	CAN-RSP-All	0,001	0,001
	MP	ERV-Asth-All		3,37
		HA-Asth-<65		0,01
		HA-CLD-18-64		0,02
		HA-CVD-18-64		0,25
		HA-CVD-65+		0,36

Fundición	Contaminantes NE	Efecto	Fugitiva	Puntual	
		HA-RSP-65+		0,17	
		Mort-All-30+		1,78	
		WLD-All-18-64		18,69	
	SO2	ERV-Asth-All			0,19
		HA-Asth-<65			0,00
		HA-CLD-18-64			0,00
		HA-CVD-18-64			0,01
		HA-CVD-65+			0,02
		HA-RSP-65+			0,01
		Mort-All-30+			0,10
		WLD-All-18-64			1,04
Hernán Videla Lira	As	CAN-RSP-All	0,040	0,014	
	MP	ERV-Asth-All		49,88	
		HA-Asth-<65		0,14	
		HA-CLD-18-64		0,23	
		HA-CVD-18-64		2,86	
		HA-CVD-65+		7,36	
		HA-RSP-65+		2,62	
		Mort-All-30+		31,38	
		WLD-All-18-64		257,84	
	SO2	ERV-Asth-0-14			19,41
		ERV-Asth-65+			37,59
		HA-RSP-65+			0,91
	Potrerillos	As	CAN-RSP-All	0,000	0,000
MP		ERV-Asth-All		0,19	
		HA-Asth-<65		0,01	
		HA-CLD-18-64		0,00	
		HA-CVD-18-64		0,01	
		HA-CVD-65+		0,03	
		HA-RSP-65+		0,02	
		Mort-All-30+		0,13	
		WLD-All-18-64		0,98	
SO2		ERV-Asth-0-14			0,06
		ERV-Asth-65+			0,09
		HA-RSP-65+			0,01
Ventanas		As	CAN-RSP-All	0,004	0,001
	MP	ERV-Asth-All		78,61	
		HA-Asth-<65		0,46	
		HA-CLD-18-64		0,35	
		HA-CVD-18-64		5,30	
		HA-CVD-65+		20,36	
		HA-RSP-65+		7,43	
		Mort-All-30+		77,73	
		WLD-All-18-64		378,40	
	SO2	ERV-Asth-All			0,57
		HA-Asth-<65			0,00
		HA-CLD-18-64			0,00
		HA-CVD-18-64			0,04
HA-CVD-65+				0,15	
	HA-RSP-65+			0,05	
	Mort-All-30+			0,56	
	WLD-All-18-64			2,75	

Fuente: Elaboración propia

### 7.5.4 Beneficios

A continuación, se presentan los beneficios estimados al año 2035 en UF para la disminución de una tonelada anual de emisiones de cada contaminante. Se observa que los mayores beneficios se obtienen al reducir las emisiones de material particulado, lo que se asocia a una reducción de material particulado fino. La fundición que presentaría mayores beneficios sería Ventanas, lo que se explica principalmente porque sus valores FEC son menores, lo que quiere decir que una disminución de una unidad de emisiones genera una variación mayor en las concentraciones de contaminantes.

**Tabla 7-18 Beneficios unitarios por contaminante y fundición al año 2035 [UF / t/año]**

Fundición	MP	SO2	As	
			Fugitiva	Puntual
Fundición Chuquicamata	33.557	1.867	20	18
Fundición Altonorte	99.895	8	23	14
Fundición Potrerillos	2.373	0	0	0
Fundición HVL	592.311	133	669	237
Fundición Ventanas	1.466.722	10.660	60	21
Fundición Chagres	482.647	4	17	32
Fundición Caletones	237	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

## 7.6 Agrupación de contaminantes

Existen dos agrupaciones importantes de contaminantes, asociados a las emisiones de SO<sub>2</sub> y de MP. Al SO<sub>2</sub> se asocian las emisiones de SO<sub>3</sub>, mientras que al MP se asocian metales pesados, en donde se incluyen el As, Pb, Hg, Cd, entre otros. En la Tabla 3-15 se puede observar las etapas del proceso de fundición y equipos en donde se emiten estos contaminantes. Una disminución en las emisiones de SO<sub>2</sub> o de MP implica una disminución en las cantidades emitidas de los respectivos contaminantes asociados.

Debido a que están asociados, para medir las emisiones de estos contaminantes, se utilizan las metodologías de medición de SO<sub>2</sub> y MP presentadas en la Tabla 2-17. Por otra parte, los efectos adversos que ocasiona la exposición a estos contaminantes en la salud humana se presentan en la Tabla 7-2.

## 8. Escenarios de actualización de la norma existente

En este Capítulo se presenta una revisión comparativa de los componentes del D.S. 28/2013 del MMA (2013a) con otras opciones internacionales. En base a este análisis, en conjunto con el proceso de revisión de antecedentes evaluados en los capítulos precedentes, se proponen alternativas de actualización para la norma existentes.

### 8.1 Definiciones de la fuente a regular

En el D.S. 28/2013 del MMA (2013a) se define como fuente a *“toda fundición de cobre o cualquier otra fuente industrial emisora de As donde se realiza un tratamiento térmico de compuestos minerales o metalúrgicos de cobre y oro, cuyo contenido de As en la alimentación sea superior a 0,005% en peso en base mensual”* (artículo 2°). En el mismo artículo se especifica que las fuentes existentes corresponden a las fundiciones (identificando cada una de las siete fundiciones), así como toda otra fuente industrial con RCA aprobada con anterioridad al decreto. Dentro de esta última categoría cabe la Planta de Tostación Ministro Hales.

La US-EPA (1986) en cambio, promulgó estándares de arsénico para fundiciones primarias de cobre, plantas de fabricación de vidrio y plantas de arsénico. En dicha norma define fundición primaria como *“cualquier instalación o proceso intermedio comprometido en la producción de cobre desde materiales con contenido de cobre por medio técnicas pirometalúrgicas”*. Posteriormente, en US-EPA (2002a) complementa la definición de fundición primaria de cobre como cualquier instalación o proceso intermedio dedicado a la producción de cobre a partir de concentrados de mineral de sulfuro de cobre mediante el uso de técnicas pirometalúrgicas. En la práctica estas definiciones incluyen las mismas fuentes, y de haber sido aplicadas en Chile, calificarían como fundiciones las 7 fundiciones de cobre junto con la planta de tostación, pues el proceso de tostación puede ser calificado como una técnica pirometalúrgica. Los estándares para fuentes existentes y nuevas definidas por las normas de EEUU, aplican sobre cualquier establecimiento donde la tasa de carga total promedio de arsénico sea superior a 75 kg/h.

Más recientemente, en la propuesta de actualización de norma de la US-EPA (2022), la categoría de fuente principal de fundición primaria de cobre se definió como cualquier instalación dedicada al proceso pirometalúrgico utilizado para la extracción de cobre a partir de óxidos de azufre, concentrados de minerales nativos u otros minerales que contienen cobre. Como se definió originalmente, la categoría incluye, entre otras, las siguientes unidades de proceso de fundición: tostadores, hornos de fundición y convertidores. Las fuentes afectadas bajo la fuente principal actual NESHAP son secadores de concentrado, hornos de fundición, recipientes de limpieza de escoria, convertidores y fuentes de emisiones fugitivas. Las fuentes afectadas bajo la fuente de área NESHAP son secadores de concentrado, recipientes de fundición (por ejemplo, hornos), recipientes de conversión, plantas de secado y molienda de mata, sistemas de gas secundarios y operaciones de refinación de ánodos.

Del análisis comparativo se observa que la definición chilena resulta robusta sin generar incertidumbres respecto para los establecimientos de si les aplica o no la norma. En este sentido el criterio de alimentación de As en la alimentación sea superior a 0,005% en peso en base mensual es más fácil de verificar que el criterio utilizado en EEUU, el cual es más complejo de estimar y requiere un análisis anual de las entradas.

## 8.2 Valores de límites de emisión

En el D.S. 28/2013 del MMA (2013a), se fijan los límites de emisión en chimeneas para distintos procesos unitarios. En la Tabla 8-1 se presentan estos límites, donde se puede notar que difieren según proceso y tipo de fuente.

**Tabla 8-1 Límites de emisión en chimenea D.S. 28/2013 del MMA**

Proceso unitario	Cont.	Fuente	Fundiciones existentes	Fuentes nuevas	Unidad
<b>Secadores</b>	MP	Fundiciones	50	30	mg/Nm <sup>3</sup>
<b>Planta de ácidos</b>	SO <sub>2</sub>	Fundiciones	600	200	ppm
		Otras fuentes industriales	400		
	As	Fundiciones	1	1	mg/Nm <sup>3</sup>
		Otras fuentes industriales	1		
Hg	Fundiciones y otras fuentes	n.a.	0,1	mg/Nm <sup>3</sup>	
<b>Hornos de limpieza de escoria</b>	As	Fundiciones	1	1	mg/Nm <sup>3</sup>
	MP	Fundiciones	50	30	mg/Nm <sup>3</sup>
<b>Hornos de refino</b>	Opacidad	Fundiciones	20%	20%	Ringelmann

Nota: Las condiciones normales N corresponden a 25°C y 1 atm.

Fuente: Elaboración propia a partir de (MMA, 2013a)

Además, en su artículo 3, se fijan límites máximos de emisión anuales de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y As para fuentes existentes, en toneladas por año, de manera específica a cada fundición existente (ver Tabla 8-2). En el mismo artículo se establece que, simultáneamente, las fundiciones deben cumplir con un nivel de captura y fijación de arsénico y azufre de, al menos, 95%. Mientras que en el artículo 8, se establece que la captura y fijación de nuevas fuentes debe ser de, al menos, 98% tanto para As como para S.

**Tabla 8-2 Límites máximos de emisión anual [t/año]**

Fuente emisora	SO <sub>2</sub>	As
Altonorte	24.000	126
Caletones	47.680	130
Chagres	14.400	35
Chuquicamata	49.700	476
Hernán Videla Lira	12.880	17
Potrerosillos	24.400	157
Ventanas	14.650	48

Fuente: (Tabla 1 MMA, 2013a)

Los actuales valores vigentes en la normativa chilena en las chimeneas coinciden con los valores vigentes actualmente en la normativa de EEUU, y con los valores considerados en otras normativas a nivel nacional. En el Anexo 2, en la Sección 11.3, se presentan estadígrafos anuales respecto de los niveles de cumplimiento de cada uno de los procesos unitarios en cada una de las fuentes reguladas, el cual es complementario con los datos presentados en la Sección 8.5. En estos análisis se observa un alto nivel de cumplimiento de los límites durante el período de estudio.

Del análisis se observa, por ejemplo, como incluso con un valor de 80% la norma aún se logran altas tasas de cumplimiento. Por su parte, la normativa de hornos de escorias cuenta con menor margen de cumplimiento, observándose que se ha superado el 80% del valor en las tres fundiciones al menos una vez, y que sus valores medios están bastante cercanos de la norma. Por su parte, en general los secadores cumplen con la norma, alcanzándose valores medios anuales que van desde los 7-8 mg/m<sup>3</sup> en Altonorte, Caletones y Chagres, hasta los 30-35 mg/m<sup>3</sup> en Chuquicamata y HVL. Como se planteó en la Sección 3.2.4 los límites totales de emisión se han cumplido también en cada una de las fundiciones.

A nivel internacional, la propuesta más reciente es la desarrollada por la US-EPA (2022). La mayor novedad de esta propuesta es la incorporación de límites para las emisiones fugitivas. Dada la dificultad de medir directamente la emisión de metales peligrosos, se propone regular la emisión fugitiva de MP como *proxy* de otros contaminantes peligrosos. La Tabla 8-3 presenta los límites de emisión propuestos.

**Tabla 8-3 Valores límites de emisión disponibles en la propuesta de enmienda de la US-EPA**

Contaminantes y parámetros	Valor límite de emisión	Unidad	Punto de medición	Frecuencia de verificación y otras características de la medición
MP	Fuentes existentes y nuevas: 5,8	mg/m <sup>3</sup> S	Fuentes puntuales de refinación de ánodos	Prueba de cumplimiento inicial Prueba de cumplimiento al menos 1 vez al año
	Fuentes existentes y nuevas: 1,95 (4,3)	kg/h (lbs/h)	Emisiones fugitivas de techos de hornos de fundición	Prueba de cumplimiento inicial Prueba de cumplimiento al menos 1 vez al año

Contaminantes y parámetros	Valor límite de emisión	Unidad	Punto de medición	Frecuencia de verificación y otras características de la medición
				Valor promedio horario
	Fuentes existentes y nuevas: 0,77 (1,7)	kg/h (lbs/h)	Emisiones fugitivas de techos de convertidores	Prueba de cumplimiento inicial Prueba de cumplimiento al menos 1 vez al año Valor promedio horario
	Fuentes existentes y nuevas: 0,73 (1,6)	kg/h (lbs/h)	Emisiones fugitivas de techos de hornos de refinación de ánodos	Prueba de cumplimiento inicial Prueba de cumplimiento al menos 1 vez al año Valor promedio horario
<b>MP10</b>	Fuentes nuevas: 14 (0,031)	g/t (lbs/t) de concentrado de cobre que ingresa al reactor	Reactor de fusión (*)	Prueba de cumplimiento inicial Prueba de cumplimiento al menos 1 vez al año
<b>Hg</b>	Fuentes existentes: 0,002 (0,0043)	kg/h (lbs/h)	Emisiones en toda la instalación de la fundición (límite BTF) <sup>108</sup>	Prueba de cumplimiento inicial para cada uno de los equipos afectados dentro de los 3 años primeros años (a partir de la entrada en vigencia) Prueba de cumplimiento al menos 1 vez al año
	Fuentes nuevas: 0,0004 (0,00097)	kg/h (lbs/h)	Emisiones en toda la instalación de la fundición (límite MACT) <sup>109</sup>	Los propietarios u operadores deben cumplir con todos los requisitos, a más tardar en la fecha de vigencia de la enmienda final.

(\*) Los reactores de fusión corresponden a Convertidores Teniente (CT) y reactores Noranda.

Nota: En el caso de esta norma, las fuentes emisoras nuevas corresponden a fuentes cuya construcción o reconstrucción empezó después del 11/01/2022.

Fuente: Elaboración propia en base a (US-EPA, 2022)

A diferencia de Chile que ha regulado las emisiones fugitivas indirectamente por medio de límites de emisiones totales de la fundición y exigiendo mínimos de captura y fijación, en EEUU se había

<sup>108</sup> Los estándares “*beyond-the-floor*” (BTF) se conocen comúnmente como estándares más exigentes que el estándar correspondiente al grado máximo de reducción de emisiones de HAP alcanzable (MACT, por sus siglas en inglés).

<sup>109</sup> Para fuentes principales, el CAA establece que el NESHAP basado en tecnología debe reflejar el grado máximo de reducción de emisiones de HAP alcanzable (después de considerar el costo, los requisitos de energía y los impactos ambientales y de salud no relacionados con la calidad del aire). Estos estándares se conocen comúnmente como estándares MACT.

privilegiado establecer mínimos técnicos de control basados en la *Best Available Technologies* (BAT), las cuales entre otras incluye la instalación de sistemas de captura y tratamiento de emisiones secundarias en convertidores (US-EPA, 1986). En la nueva propuesta, la normativa de EEUU complementa lo anterior con sistemas de capturas y abatimiento de las fuentes fugitivas instalando normativas a “nivel de techo”, es decir, estableciendo límites para las emisiones fugitivas. Es destacable también que estas normativas las establece para MP, utilizado como un proxy para las emisiones de metales pesados como el Arsénico y el Mercurio (US-EPA, 2022).

### 8.3 Métodos de medición para determinar los parámetros regulados en la norma de emisión

Las fundiciones de cobre se caracterizan por generar emisiones al aire, tanto en forma fugitiva como por chimeneas. Estas emisiones contienen elementos y sustancias tóxicas que forman parte natural de la composición química del concentrado, las cuales son liberadas durante los procesos fusión y conversión.

Actualmente, la norma regula las chimeneas de procesos unitarios específicos. En la Tabla 8-4, se pueden observar las metodologías de cuantificación de emisiones utilizadas por fundición, con el detalle de elementos, métodos de medición y si aplica, rango de medición y la resolución exenta que la valida.

**Tabla 8-4 Identificación de chimeneas por fundición y contaminantes medidos**

Fundición	PUR	Elemento	Método de medición	Rango de medición	RE que aprueba validación
DCH	PAS°3	SO <sub>2</sub>	CEMS	0-1050 ppm	Res. Ex N°1775/2019 SMA
DCH	PAS°4	SO <sub>2</sub>	CEMS	0-1050 ppm	Res. Ex N°1776/2019 SMA
DCH	PAS°3	As	CH-29	n.a.	n.a.
DCH	PAS°3	As	CH-29	n.a.	n.a.
DCH	Secador	MP	CH-5	n.a.	n.a.
POT	PAS	SO <sub>2</sub>	CEMS	0 – 1000 ppm	Res. Ex. N°1772/2019
POT	PAS	As	CH-29	n.a.	n.a.
POT	Secador	MP	CH-5	n.a.	n.a.
POT	Horno de Limpieza de Escorias	As	CH-29	n.a.	n.a.
POT	Horno de Limpieza de Escorias	MP	CH-5	n.a.	n.a.
ALN	PAS°1	SO <sub>2</sub>	CEMS	Rango de medición bajo: 0-650 ppm 0-600 ppm  Rango de	Res. Ex. N° 730/2019 SMA  Res. Ex N° 1913/2021 SMA

Fundición	PUR	Elemento	Método de medición	Rango de medición	RE que aprueba validación
				medición alto: 0-2000 ppm	
ALN	PAS°1	As	CH-29	n.a.	n.a.
ALN	PAS°3	SO <sub>2</sub>	CEMS	Rango de medición bajo: 0-650 ppm 0-600 ppm  Rango de medición alto: 0-2000 ppm	Res. Ex. N° 730/2019 SMA  Res. Ex N° 1913/2021 SMA
ALN	PAS°3	As	CH-29	n.a.	n.a.
ALN	Secador	MP	CH-5	n.a.	n.a.
HVL	PAS	SO <sub>2</sub>	CEMS	Rango de medición bajo: 0-650 ppm  Rango de medición alto: 0-2000 ppm	Res. Ex. N° 729/2019 SMA
HVL	PAS	As	CH-29	n.a.	n.a.
HVL	Secador	MP	CH-5	n.a.	n.a.
HVL	Horno de limpieza de Escorias	As	CH-29	n.a.	n.a.
HVL	Horno de limpieza de Escorias	MP	CH-5	n.a.	n.a.
VEN	Planta de ácido	SO <sub>2</sub>	CEMS	Rango de medición bajo: 0-618 ppm  Rango de medición alto: 0-4000 ppm	Res. Ex N°1773/2019 SMA
VEN	Planta de ácido	As	CH-29	n.a.	n.a.
VEN	Secador	MP	CH-5	n.a.	n.a.
VEN	Horno de limpieza de Escorias	As	CH-29	n.a.	n.a.
VEN	Horno de limpieza de Escorias	MP	CH-5	n.a.	n.a.
CHG	Planta de ácido	SO <sub>2</sub>	CEMS	0 – 1000 ppm	Res. Ex. N°1771/2019
CHG	Planta de ácido	As	CH-29	n.a.	n.a.
CHG	Secador	MP	CH-5	n.a.	n.a.
CHG	Horno de limpieza de Escorias	As	CH-29	n.a.	n.a.
CHG	Horno de limpieza de Escorias	MP	CH-5	n.a.	n.a.

Fundición	PUR	Elemento	Método de medición	Rango de medición	RE que aprueba validación
CAL	Sistema de Reducción de emisiones N°1 (SRE N°1 – PLG N°1)	SO <sub>2</sub>	CEMS 1A	0-1600 ppm	Res. Ex N°1260/2021 SMA
CAL	Sistema de Reducción de emisiones N°1 (SRE N°1 – PLG N°1)	SO <sub>2</sub>	CEMS 1B	0-1600 ppm	Res. Ex N°1261/2021 SMA
CAL	Sistema de Reducción de emisiones N°1 (SRE N°1 – PLG N°1)	As	CH-29	n.a.	n.a.
CAL	Sistema de Reducción de emisiones N°2 (SRE N°2 – PLG N°2)	SO <sub>2</sub>	CEMS 2A	0-1600 ppm	Res. Ex N°1262/2021 SMA
CAL	Sistema de Reducción de emisiones N°2 (SRE N°2 – PLG N°2)	SO <sub>2</sub>	CEMS 2B	0-1600 ppm	Res. Ex N°1263/2021 SMA
CAL	Sistema de Reducción de emisiones N°2 (SRE N°2 – PLG N°2)	As	CH-29	n.a.	n.a.
CAL	Secador	MP	CH-5	n.a.	n.a.

Fuente: Elaboración propia

El método CEMS corresponde al monitoreo continuo de dióxido de azufre, desde una fuente puntual. La metodología consiste en tomar muestras de gas en forma continua en la chimenea, luego, se lleva parte de esta a un analizador instrumental para determinar la concentración de gas de dióxido de azufre, utilizando un analizador de rayos ultravioleta, analizador infrarrojo no dispersivo, fluorescente o con celda electroquímica. Este método corresponde al CH-6C.

El método CH-5, corresponde al muestreo isocinético de material particulado de una fuente y se recoge en un filtro de fibra de vidrio, manteniendo una temperatura de rango ( $120 \pm 14$  °C) u otra temperatura según se especifique. La masa de particulado, que incluye todo material que se condense a o sobre temperatura de filtración, se determinará gravimétricamente después de llevar a sequedad.

Respecto al método CH-29, una muestra de la chimenea es tomada isocinéticamente desde la fuente, las emisiones de partículas son colectadas en la sonda y filtro calefaccionado, y las emisiones de gases son luego recogidas en una solución acuosa ácida de peróxido de hidrógeno y una solución acuosa ácida de permanganato de potasio.

Ahora, en comparación a normas internacionales, las mediciones isocinéticas son equivalentes a los utilizados y propuestos por la US-EPA. En la Tabla 8-5<sup>110</sup>, se puede ver el número de método y la aplicación que tiene. Estos métodos son aplicables a los procesos unitarios regulados,

<sup>110</sup> De la norma propuesta por la US-EPA, 2022.

secador, horno de limpieza de escorias y plantas de ácido. Además, la US-EPA en su propuesta (2022) incluye registrar concentraciones de material particulado en procesos de refinación de ánodos y en proceso de conversión y fundición, estas para captación de techo, donde también se pueden aplicar estos métodos. Las condiciones actuales si permiten la implementación del método, se deben realizar pruebas para determinar el cumplimiento de los límites. El tiempo de muestreo que se propone es de 12 horas cada una, y se utiliza la media aritmética de los resultados de tres mediciones. Además, las mediciones se deben realizar en un estado operacional de condiciones normales. Es relevante incluir registros de las condiciones operacionales durante la medición.

También, se propone agregar mediciones de mercurio en las fuentes que no cumplen con los límites establecidos en las fuentes reguladas. Para esto, se debe cumplir con mantener una descarga continua de mercurio. Se debe utilizar un valor de intervalo aproximadamente dos veces la norma de emisión y puede ser redondeado hacia arriba con  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Además, determinar el promedio sobre una base móvil de 2 horas.

**Tabla 8-5 Métodos de mediciones de contaminantes propuestos por la US-EPA**

Método	Objetivo	Descripción
<b>Método 1</b>	Seleccionar ubicaciones de los puntos de muestreo y el número de puntos transversales.	Se divide la sección transversal de la pila en un número de áreas iguales. Los puntos transversales se ubican dentro de estas áreas
<b>Método 2, 2F o 2G</b>	Determinar caudal volumétrico del gas de la chimenea.	Se mide la velocidad de presión y el ángulo de guiñada del caudal de velocidad en la chimenea. De las mediciones se hace un promedio.
<b>Método 3, 3A o 3B</b>	Determina peso molecular seco del gas en la chimenea.	Se extrae muestra del gas en punto único, punto integrado o mixto. Se analiza la muestra para determinar porcentajes de CO <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> a través de Orsat o Fyrite.
<b>Método 4</b>	Determinar el contenido de humedad en el gas de a la chimenea.	Se extrae muestra de gas a una velocidad constante de la fuente, se elimina la humedad y se determina por gravimetría.
<b>Método 5D o Oregon 8</b>	Determinar MP filtrable en proceso de refinación. Utilizar el filtro de método 29.	Equivalente a CH-29
<b>Método 9</b>	Determinar opacidad.	Escala de Ringelmann a través de método visual.

Fuente: Elaboración propia en base a (US-EPA, 2022)

## 8.4 Análisis y recomendación del método por balance de masa

En esta Sección se presenta un análisis y recomendación del método de determinación de la emisión del azufre y los metales pesados por balances de masa. En el marco del D.S. 28/2013 del MMA, el protocolo de balances de masa se reporta en reportes técnicos, los cuales incluyen información relevante de las mediciones y cálculos realizados, esto se encuentra en el artículo 16 de la norma mencionada. Los plazos y el contenido detallado se pueden encontrar en la Sección 3.1 del Informe complementario sobre antecedentes para una Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico de la presente consultoría, entregado adjunto al presente documento.

Respecto al cumplimiento del protocolo de balances de masa, cada una de las fundiciones debe proponer una metodología específica a su sistema, especificando los límites del sistema, flujos, nodos y metodología de muestreo, medición y ajuste. Esta metodología debe ser aprobada por la SMA y está sujeta a modificaciones en base a hallazgos. Esta metodología es utilizada para estimar las emisiones con las cuales se verifica el cumplimiento de los límites de emisión presentados en la Tabla 8-2. Para el año 2022, las resoluciones que aprueban las metodologías de balances de masa por fundición se incluyen en la siguiente tabla:

**Tabla 8-6 Resoluciones que aprueban las metodologías de balances de masa por fundición**

Fundición	Resolución Exenta que aprueba metodología de balances de masa
Chuquicamata	Res. Ex. N° 299/2019 SMA
Potrerosillos	Res. Ex. N° 48/2022 SMA
Altonorte	Res. Ex. N°92/2021 SMA
Hernán Videla Lira	Res. Ex. N° 1479/2021 SMA
Ventanas	Res. Ex. N° 1596/2018 SMA
Chagres	Res. Ex. N°649/2018 SMA
Caletones	Res. Ex. N° 592/2019 SMA

Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar que, desde que comienzan a regir los límites de emisión, las metodologías de balances de masa de cada fundición se han ido adaptando a partir de solicitudes de la SMA, de forma de perfeccionar las estimaciones y reflejar los cambios en la operación de las fundiciones. En este marco, todas las fundiciones han reportado los informes técnicos mensuales de acuerdo a lo establecido en el artículo 12 de la Norma. Estos reportes también han sido perfeccionados, observándose una mayor estandarización entre ellos que en los primeros años.

Aun así, a partir de un análisis se observan que existen espacios y oportunidades de mejora que permitirían por un lado aumentar el nivel de confiabilidad de los datos obtenidos mediante la aplicación de las metodologías de balance de masa. En particular, se destacan tres recomendaciones: asegurar la estandarización de flujos, contabilidad del material de limpieza y gestión oportuna de emisiones negativas.

### 8.4.1 Estandarización de Flujos

El límite de sistema respecto del cual se realiza el balance de masa queda definido en el Protocolo descrito en la Res. Ex. N° 694/2015 de la SMA, y se define de manera que el balance de masas para cada fuente emisora regulada se pueda llevar a cabo análogamente. Aun así, respecto a los flujos definidos, no se observa una estandarización entre fuentes que corresponda a los propuestos en la metodología, lo cual se ve reflejado en los diversos formatos utilizados en los reportes técnicos.

De esta forma, se nota que al menos para el periodo analizado en el presente informe para los flujos de entrada, no se ha llevado a cabo la agrupación de los flujos acorde a lo establecido por el Protocolo (Res. Ex. N° 694/2015 de la SMA). Así, a modo de ejemplo, de acuerdo con el Protocolo, los concentrados se deben presentar en flujos denominados como “Concentrado Propio de Cu o Au” y “Concentrado Externo”, además de distinguir otro flujo llamado “Calcinas”. Dentro de los reportes técnicos disponibles, se encuentra una variedad de flujos con denominaciones distintas como, por ejemplo, la fundición Chuquicamata presenta el flujo “Alimentación Secador N6”, o, por otra parte, Chagres presenta “Conc. Las Tórtolas” y “Conc. El Soldado”. De esta forma, se dificulta la estandarización al momento del levantamiento y análisis de estos antecedentes. Particularmente, se propone que la metodología para cada fundición tenga como resultado los flujos de concentrados y calcinas en planillas homogéneas y que se presenten en los reportes técnicos con un formato establecido y con los flujos correspondientes a los establecidos en el protocolo. Aun así, se considera relevante mantener el detalle de los sub-grupos de flujos, lo cual se puede incluir en una fila adicional a los datos estandarizados. Esto puesto que distintos sub-grupos pueden tener características diferentes, tal como contenido de los diferentes elementos de interés, información que se puede perder de usar estrictamente los flujos definidos en el Protocolo. De esta manera, se tiene trazabilidad e información detallada valiosa.

**Tabla 8-7 Ejemplos de flujos reportados en el año 2020 y equivalencia con flujos estandarizados en el Protocolo**

Fundición	Flujo reportado	Flujo equivalente protocolo	Subgrupo de flujo propuesto
<b>Chuquicamata</b>	Alimentación Secador N6	Concentrado Propio de Cu o Au	Alimentación secador 6
<b>Chagres</b>	Conc. Las Tórtolas	Concentrado Externo	Origen Las Tórtolas
<b>Chagres</b>	Conc. El Soldado	Concentrado Externo	Origen El Soldado

Fuente: Elaboración propia

De la misma forma, se puede notar que se encuentra una incongruencia en los flujos intermedios o inventarios. En el caso de Ventanas, se pueden encontrar flujos intermedios denominados “Existencia Circulante” y “Existencia Proceso”, los cuales difieren del resto de las fundiciones en la presentación de datos. Dado esto, se recomienda estandarizar los flujos intermedios o de inventario para todas las fundiciones, a modo de permitir el análisis comparativo y global. Esto podría significar una modificación en la denominación de los inventarios a considerar de modo que se mantenga el detalle de reporte de información, pero que permita la estandarización.

**Tabla 8-8 Comparación de flujos intermedios o inventarios reportados, año 2020**

Chuquicamata	Potrerillos	Altonorte	HVL	Ventanas	Chagres	Caletones
Carga Fría	Carga Fría	Circulantes	Circulantes	Circulantes y	Existencia	Carga Fría
Calcina	Carga Líquida			Existencias (por		Carga Líquida
Carga Líquida	Circulantes	2022:	2022:	separado):		Concentrado de Escoria
CPS	Ladrillos	Circulante Nave	Circulante CT	Conversión		CT
Carga Líquida	Metal Blanco	Polvos Electrofiltro Miljo	Escoria CT fría	Polvos Convertidores		Material Particulado
HF	Moldes	CPS	Metal Blanco	Polvos Gases HE y CPS		Piezas de Cobre en
Carga Líquida	Otros	Polvos Electrofiltro Miljo	Frío	Escoria Especial		Plataforma
Hornos Refino	(Concentrado	Reactor	Circulante	Escoria Anódica		Polvos Planta Reducción
Carga Líquida	Planta de	Limpiezas Fundición	Conversión	Cobre Anódico (cobre		Humos Hornos Anódicos
Pozo de	Flotación de	Concentrado Escoria	Polvos de	sucio)		Polvos Precipitadores en
Enfriamiento	Escorias)	Escoria de Alta Ley	Fusión	Placas y Moldes de		Silos
Concentrado		Metal Blanco Reactor	Polvos de	Ánodos		Tolvas Concentrado
Scrap	2021:	Ripio BAMP	Conversión	Circulante a la Venta		
	Escoria de	Ripio PTP	Polvos			
	Convertidor	Stock Polvo PTP	Precipitadores	Existencia en Proceso:		
	Teniente	Barras Rechazo Ánodos	Electrostáticos	Concentrador Secador		
	Polvo Grueso	Carga Fría	Productos en	Concentrados CT		
	Polvo Fino	Ánodos en Planta	Proceso	Escoria CT		
	Ánodos	Ladrillos		Metal Blanco CT		
	Metal Blanco	Moldes y Matrices		Escoria HE		
	Moldes	Efluente		Metal Blanco HE		
	Carga Fría	Inventario Interno		Circulante en HE		
	Carga líquida CT	Camada		Metal Blanco CPS		
	Carga Líquida	Pipeline PLS		Blíster CPS		
	CPS	Escoria de Reactor		Blíster Retén		
	Carga Líquida HA	Pipeline PTE		Blíster HB		
	Concentrado			Carga Horno Rev. RAF		
				Existencia Proceso sólo		
				SIF		
				Ácido Sulfúrico GrA en		
				estanques		

Fuente: Elaboración propia

Además, no se encuentra la información del detalle de los muestreos y cálculo de las mediciones de estos flujos para todos los reportes técnicos. En este sentido, se propone agregar una hoja en la planilla de los reportes técnicos donde se encuentren los valores solicitados en el balance de masa, además de la ley de Cu y Fe, los análisis realizados al resto de los elementos en el inciso h) y los errores asociados.

Cabe destacar que, a la fecha de la elaboración de este informe, las metodologías de las fundiciones de Chuquicamata, Ventanas, Chagres y Caletones se encuentran en proceso de actualización. Además, se ha incorporado la solicitud en el detalle de los flujos intermedios para las fundiciones de Altonorte y Hernán Videla Lira.

**Tabla 8-9 Resumen de reporte de detalles de muestre y cálculo en el período 2020**

Fundición	Expediente	Detalle muestreos	Detalle cálculo	Auditoría
<b>Chuquicamata</b>	DFZ-2021-1884-II-NE	Se entrega metodología, pero no los valores numéricos.	No se entregan valores del proceso de cálculo.	Presenta
<b>Potrerrillos</b>	DFZ-2021-2624-III-NE	Se entrega metodología, pero no los valores numéricos.	No se entregan valores del proceso de cálculo.	Presenta
<b>Altonorte</b>	DFZ-2021-2019-II-NE	Balance Detallado Mensual (% Humedad, %Cu, Diferencias), pero no de As ni S.	No se entregan valores del proceso de cálculo.	Presenta
<b>Hernán Videla Lira</b>	DFZ-2021-972-III-NE	Se entrega metodología, pero no valores numéricos.	No se entregan valores del proceso de cálculo.	No Presenta
<b>Ventanas</b>	DFZ-2021-1858-V-NE	Algunos valores numéricos por flujo y mes, presentes en el informe IEC-15-2021	No se entregan valores del proceso de cálculo.	Presenta
<b>Chagres</b>	DFZ-2021-2351-V-NE	Algunos Balances Detallados Mensual es (% Humedad, %Cu, Diferencias), presentes en el informe de auditoría "Revisión y Verificación de los Balances Másicos de la Fundición"	No se entregan valores del proceso de cálculo.	Presenta
<b>Caletones</b>	DFZ-2021-2625-VI-NE	Se entrega metodología, pero no los valores numéricos.	No se entregan valores del proceso de cálculo.	Presenta

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, respecto a la presentación de los equipos e instalaciones, se recomienda estandarizar las unidades de las dimensiones y capacidades, a modo de analizar y evaluar los procesos de manera homogénea. Además, para facilitar el análisis del estado de operación de la planta, se puede efectuar una estandarización en las unidades de dimensiones y capacidades en

que se reporta el balance, para así permitir una mejor contextualización de los niveles de emisión. Esto último se puede realizar a través de un indicador, como factor de planta.

También, se recomienda solicitar la información mensual de las horas de operación y capacidades reales de los procesos unitarios en un formato tabla, ya que, actualmente, solo algunas fundiciones las presentan en los informes anuales. De esta manera, la presentación de la información será más metódica y tendrá una menor dificultad al momento del levantamiento y análisis de los datos. También, se podrá efectuar un análisis más robusto de los procesos unitarios, para tener una visión más detallada del sistema establecido por fundición.

### 8.4.2 Material de Limpieza

Con respecto al material de limpieza, este actualmente se reporta mensualmente, pero se considera únicamente en el balance anual como la sumatoria de todos los meses, en línea con lo estipulado en el artículo 12 de la Norma. Esta situación depende de instancias de mantención de los equipos, la cual no se realiza necesariamente de forma anual. En estos casos, el valor anual reportado como material de limpieza no necesariamente corresponde a remociones ocurridas durante el periodo informado, sino que corresponde a la acumulación entre las mantenciones, aunque se reporta para el año donde se realiza la mantención o limpieza. De forma análoga, si la mantención no se realiza durante un año, la emisión reportada es una sobreestimación, pues no considera que la fracción que queda contenida en el material que posteriormente es reportado como material de limpieza.

En la Tabla 8-10, se puede observar el número de meses en los cuales se reporta algún nivel de material de limpieza para arsénico y azufre. Respecto a la información del periodo 2017-2020, se nota que las divisiones Chuquicamata y Caletones presentan con mayor frecuencia material de limpieza, con 10 meses con reportes. Luego, Potrerillos con 7 meses, Ventanas con 5 periodos mensuales, Chagres con 3 y Altonorte con 2. Cabe destacar, que la fundición Hernán Videla Lira no ha presentado material de limpieza en sus reportes técnicos durante este período.

**Tabla 8-10 Número de meses en los que se reporta material de limpieza por fundición, periodo 2017-2020**

Fundición	2017	2018	2019	2020	Total
DCH	5	1	3	1	10
POT	3	1	1	2	7
ALN	0	1	0	1	2
HVL	0	0	0	0	0
VEN	1	2	1	1	5
CHG	0	1	0	2	3
CAL	2	2	4	2	10

Fuente: Elaboración propia

De forma complementaria, a modo de comparación entre fundiciones, en la Figura 8-1 y Figura 8-2, se puede ver el detalle del arsénico y de azufre contenido en el material de limpieza mensual reportado por las fundiciones. De esta manera, se puede realizar un seguimiento en el periodo estudiado, donde se observan periodos de reporte de material de limpieza que no corresponden al año evaluado.

Se observa que Chuquicamata ha presentado valores de material de limpieza con una recurrencia superior al resto de las fundiciones, concentradas en el 2017 y en el periodo de diciembre/2018 hasta abril/2019.

Luego, Potrerillos, presenta valores superiores al resto de las fundiciones en el periodo de 2017 en arsénico. Se puede ver, que desde octubre/2018 a diciembre/2019 se presenta solo un mes con material de limpieza, el cual es bajo en comparación al resto, tanto para arsénico como para azufre. Respecto a Altonorte, se pueden ver dos meses con reportes de material de limpieza, el primero, en noviembre/2018 y el segundo 18 meses después.

La fundición Ventanas, presenta valores bajos en comparación al resto de las fundiciones, tanto en arsénico como azufre, particularmente, tiene un valor de corrección en el año 2018, correspondiente a inventarios y reportado en el material de limpieza en la planilla técnica asociada. Luego, la fundición Chagres presenta tres meses, con una diferencia de más de dos años, el primero en octubre/2018 y luego en noviembre/2020 y diciembre/2020.

Respecto a Caletones, esta tiene valores mensuales de material de limpieza en todos los años del periodo estudiado, donde hay una concentración de información en cuatro meses seguidos entre marzo/2019 y junio/2019, para luego no reportar valores hasta 11 meses después, en junio/2020 y julio/2020. Por otra parte, Hernán Videla Lira no presenta material de limpieza en este periodo.

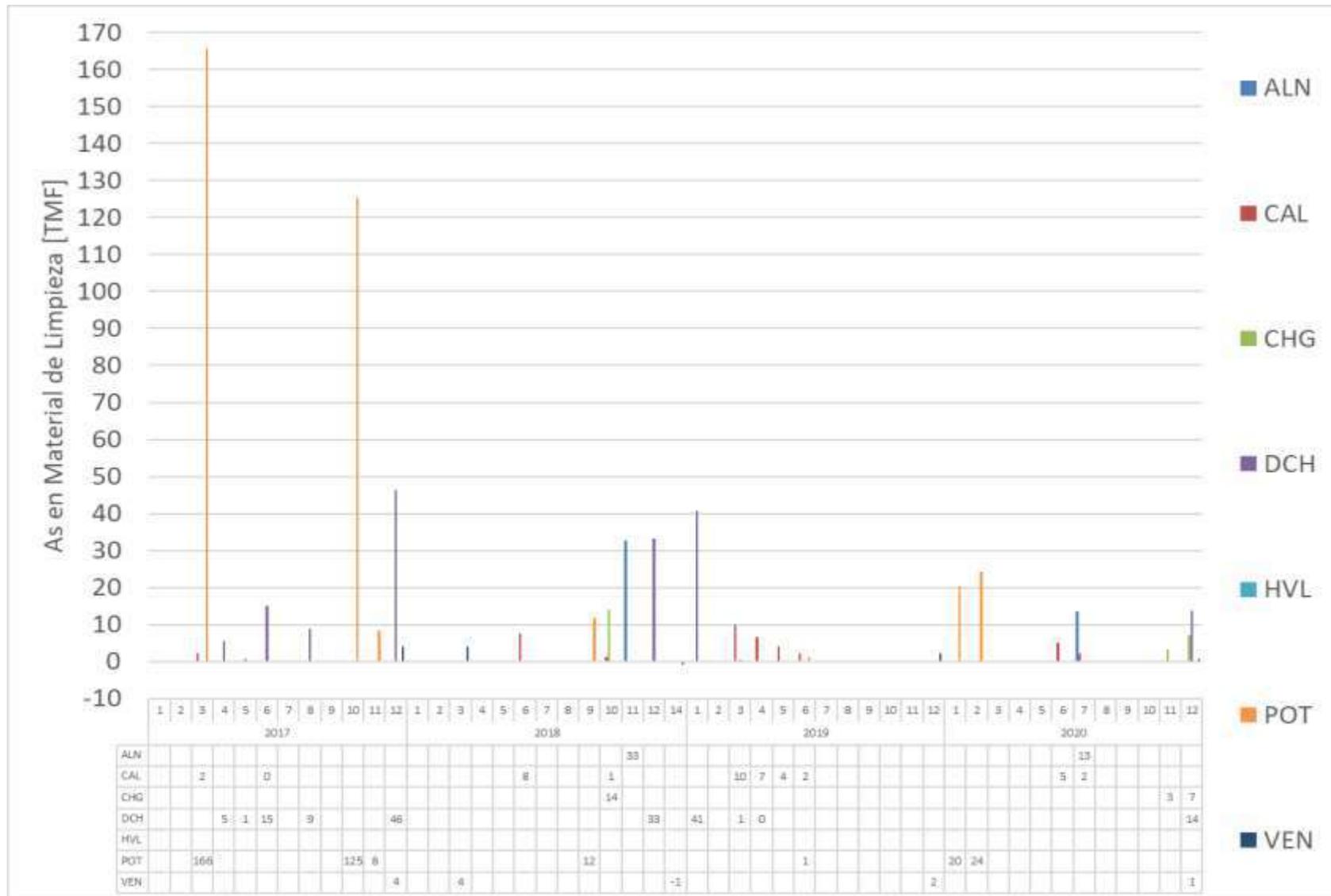


Figura 8-1 As en Material de Limpieza [TMF], periodo 2017-2020

Fuente: Elaboración propia

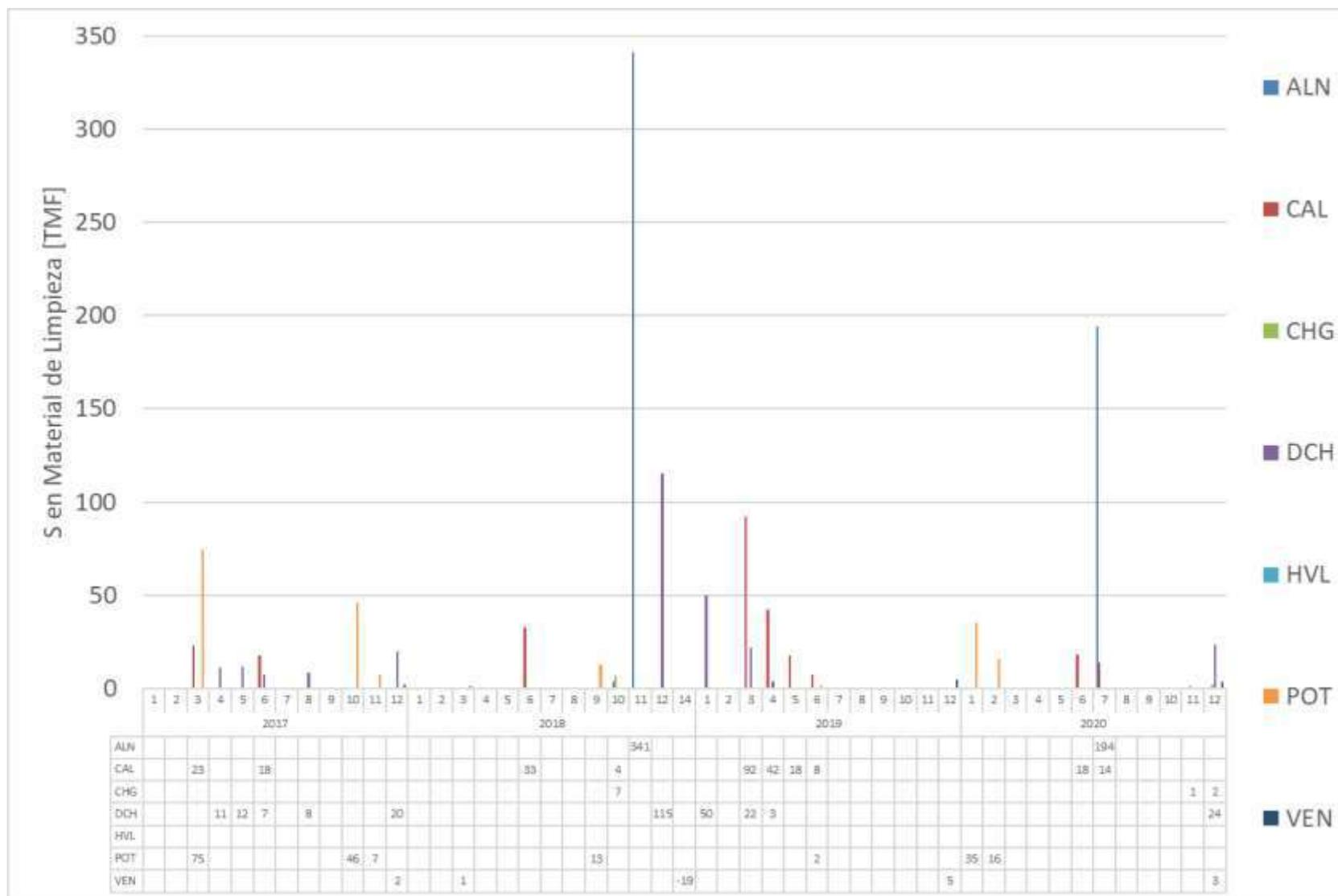


Figura 8-2 S en Material de Limpieza [TMF], periodo 2017-2020

Fuente: Elaboración propia

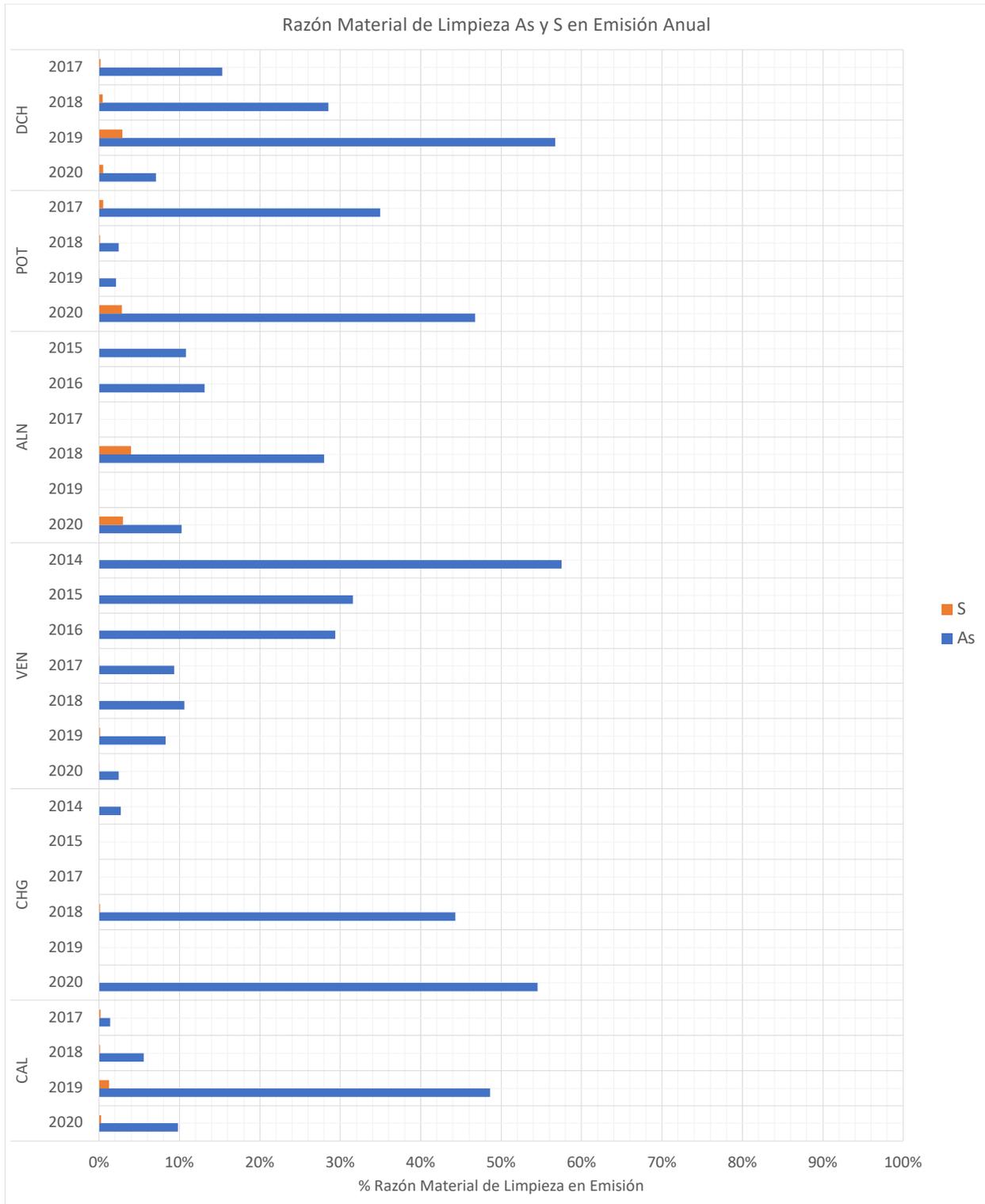
**Tabla 8-11 As Balance y en material de limpieza**

Fundición	Año	Límite As (ton/año)	As Balance (ton/año)	As en Material de Limpieza (ton/año)	Emisión Anual (ton/año)	% Razón Material de Limpieza As al balance
<b>DCH</b>	<b>Total</b>	476	<b>883</b>	<b>165</b>	<b>718</b>	<b>19%</b>
	2017		499	76	422	15%
	2018		117	33	84	28%
	2019		73	42	32	57%
	2020		195	14	181	7%
<b>POT</b>	<b>Total</b>	157	<b>1487</b>	<b>357</b>	<b>1130</b>	<b>24%</b>
	2017		856	299	557	35%
	2018		482	12	470	2%
	2019		53	1	52	2%
	2020		96	45	51	47%
<b>ALN</b>	<b>Total</b>	126	<b>707</b>	<b>73</b>	<b>633</b>	<b>10%</b>
	2015		124	13	111	11%
	2016		105	14	92	13%
	2017		116	0	116	0%
	2018		116	33	84	28%
	2019		114	0	114	0%
	2020		131	13	118	10%
<b>HVL</b>	<b>Total</b>	17	<b>32</b>	<b>0</b>	<b>32</b>	<b>0%</b>
	2017		18	0	18	0%
	2018		7	0	7	0%
	2019		-6	0	-6	0%
	2020		13	0	13	0%
<b>VEN</b>	<b>Total</b>	48	<b>359</b>	<b>106</b>	<b>253</b>	<b>29%</b>
	2014		93	54	40	58%
	2015		71	23	49	32%
	2016		66	19	46	29%
	2017		43	4	39	9%
	2018		29	3	26	11%
	2019		28	2	26	8%
	2020		29	1	28	2%
<b>CHG</b>	<b>Total</b>	35	<b>166</b>	<b>25</b>	<b>141</b>	<b>15%</b>
	2014		30	1	29	3%
	2015		29	0	29	0%
	2017		24	0	24	0%
	2018		32	14	18	44%
	2019		33	0	33	0%
	2020		19	10	9	55%
<b>CAL</b>	<b>Total</b>	130	<b>458</b>	<b>41</b>	<b>417</b>	<b>9%</b>
	2017		181	3	178	1%
	2018		156	9	148	6%
	2019		46	23	24	49%
	2020		74	7	67	10%

As Balance: Suma de los balances mensuales definidos según artículo 12

Emisión Anual: Balance anual definido según artículo 12. Equivalente a As Balance – As en material de limpieza

Fuente: Elaboración propia



**Figura 8-3 Razón de Material de Limpieza en Emisión Anual para Arsénico y Azufre (%), periodo 2017-2020**

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 8-11 y en la Figura 8-3, se pueden observar las razones de material de limpieza en comparación con el resultado del balance mensual. Como se esperaba, se observa que proporcionalmente, el arsénico corresponde a una fracción mayor que el azufre. Hay valores que superan el 50% del resultado del balance mensual para Arsénico (Chuquicamata 2019 y Chagres 2020) lo que va de la mano con la implementación de medidas en el caso de Chuquicamata y con el largo periodo que no se reportó material de limpieza en Chagres, entre el 2018 y 2020.

De esta forma, en particular para el caso del arsénico, los resultados del balance mensual pueden tener una desviación relevante respecto de las emisiones reales, especialmente en aquellas fundiciones que no cuenten con mantenciones mayores de forma anual. Esto puede llevar a casos donde la suma de los balances mensuales en un año puede implicar un valor de emisión acumulada superior al límite establecido, siendo que una fracción del arsénico puede estar incorporado en el material acumulado en los equipos. Este arsénico sólo se contabiliza al momento de realizar la limpieza, la cual, si no ocurre en el mismo año calendario, puede resultar en una sobreestimación de las emisiones anuales durante dicho año, y en una posterior subestimación de las emisiones en el año donde efectivamente se haga la mantención. Cabe destacar que, de considerar horizontes más largos, es esperable que la estimación de los balances de masa y las emisiones converjan.

Dado lo anterior, una propuesta que podría cooperar en evitar que el impacto de este aspecto metodológico afecte la consecución de los objetivos ambientales de la Norma, sería establecer límites de emisión diferenciados según si no se considera el material de limpieza (límite anual) o si se considera (límite trianual). Por último, se recomienda solicitar mayor detalle del cálculo de este valor, a través de entrega de informes por unidad (por ejemplo, Convertidor Teniente, Hornos Flash, CPS u Hornos de Escorias), junto con los valores base y composición de arsénico y azufre.

### **8.4.3 Emisiones Negativas**

Una brecha importante de información durante el desarrollo del presente estudio, consiste en los recurrentes resultados del balance de arsénico que arroja emisiones negativas mensuales en los reportes técnicos. Los valores negativos no solo carecen de sentido físico, sino que afectan la confiabilidad de los resultados obtenidos con esta metodología. También, es importante mencionar que estas irregularidades tienen consecuencias en otros indicadores reportados como, por ejemplo, obtener una captura y fijación mayor al 100%.

En el artículo 22° del Decreto 165/1998 (MINSEGPRES, 1998), y modificado por el DS 75/2008 (MINSEGPRES, 2007) con el fin de adoptar criterios más exigentes respecto a sus resultados y su consideración en la emisión anual, referenciando por la norma de emisiones, señala que, al arrojar un resultado neto negativo, la fuente deberá explicar y justificar este resultado en el informe mensual del artículo 33 del DS 75/2008. El mismo artículo establece que si durante 3

meses seguidos una fuente emisora presentara resultados netos negativos, la fuente emisora deberá realizar una auditoría externa.

Dado la actual exigencia, el año 2019, la fundición Hernán Videla Lira reportó 6 valores mensuales negativos: enero, febrero, abril, mayo, junio y julio. Recién en julio, cumplió con los requisitos para la auditoría externa. Dado esto, la SMA, mediante la Resolución Exenta N°1050 de 24 de julio de 2019, solicitó la justificación técnica que explicara el motivo de las emisiones negativas. Esto fue respondido a través de carta 084/2019 de 2 de agosto de 2019 por ENAMI, lo cual significó acciones a implementar de manera inmediata. Luego, el 19 de diciembre de 2019, se solicita mediante Resolución Exenta N°1857, realizar una auditoría externa para determinar los motivos de las emisiones negativas durante el año 2019. Posteriormente, mediante Carta Of. Ord. N° 137/2020 SMA, el titular entrega respuesta a la verificación efectuada por la SMA, donde se evidencian diferencias en varios meses, para los balances de As y de S.

Además, mediante carta de 12 de junio de 2019, se informó del inicio de la auditoría externa que evaluó el año 2018 en verificación de la aplicación de la metodología del balance de masa de As y S. Tras estos exámenes, se encuentran hallazgos variados en la aplicación de la metodología de balances de masa. Luego, mediante carta N°077 de 24 de junio de 2020, el titular da aviso del inicio de la auditoría externa que revisa la aplicación de metodología de balances de masas. Ahora bien, recién el 29 de junio de 2021, mediante Resolución Exenta N°1479, se establece que la metodología se ajusta a los requerimientos establecidos en el protocolo y que, por lo tanto, se aprueba.

Dado este caso, se recomienda actualizar el artículo 22°, modificando que la explicación y justificación debe ir complementada con las planillas completas de toda la metodología de balance, incluyendo: la totalidad de los valores de las muestras de todos los flujos, detalle de resultados intermedios en metodología de cálculo y ajustes, justificación técnica y operacional de los procesos de la fuente y anomalías correspondientes al mes en cuestión. Además, se propone modificar los meses seguidos presentando resultados netos de balance mensual negativos a 2 meses para solicitar una auditoría externa que evalúe el caso. Se considera que se debe realizar un seguimiento oportuno de este comportamiento, ya que es un indicador de errores en las mediciones y/o cálculos de balance de masa. Esto se debe aplicar en conjunto tanto para el arsénico como para el azufre. También, se recomienda aplicar una auditoría específica a balances de masa si se repiten resultados negativos en 3 meses o más durante el periodo de un año, independiente de que ocurran en meses seguidos.

Con esta recomendación, ENAMI hubiese estado sujeto a realizar una auditoría externa tras los resultados de febrero/2019, por los tres meses consecutivos de emisiones negativas (diciembre/2018, enero/2019 y febrero/2019), la cual habría tenido un informe disponible en un periodo máximo de dos meses desde la notificación. A partir de esta medida, se podría haber disminuido el tiempo en la modificación, verificación y aprobación en la metodología de balance de masa de As y S de la fundición. Dado que el proceso comenzó en diciembre/2019, podría haber

habido una diferencia considerable de tiempo en recibir los resultados de las evaluaciones realizadas.

De esta manera, se podría contribuir a continuar con el aumento en la calidad de los cálculos de balances de masa, para que se disminuyan los errores y validar la aplicación de metodología específica implementada por cada fuente emisora. También, se evitarán rectificaciones en los valores que resultan de los balances de masa, junto con los indicadores calculados mensualmente.

#### **8.4.4 Buenas prácticas transversales**

Dentro de la revisión del articulado existente, se considera que existen mejoras y buenas prácticas para aplicar en pos de una actualización de la norma existente.

En primer lugar, como medida de transparencia, se considera que se puede disminuir el periodo para que los informes mensuales asociados a la norma estén disponibles públicamente en una plataforma online, con la opción de ser validados posteriormente. Actualmente, en el artículo 16 del decreto se señala los informes mensuales deben ser presentados dentro de los 21 días del mes siguiente al período que se informa. Se recomienda la práctica de disponibilizar lo remitido en un periodo breve en la página web de SNIFA.

A futuro, se considera que se puede avanzar en la disponibilización de los datos históricos a la ciudadanía en una plataforma que permita visualizar los datos e indicadores generados, como las que genera actualmente RETC para visualización y exploración de la información ambiental levantada<sup>111</sup>. Esta plataforma contribuiría a la revisión por parte de las partes interesadas, eliminando dificultades por medio de la sistematización de la información reportada por todas las fuentes en todos los años en un solo lugar.

### **8.5 Revisión de límites de emisión**

En esta Sección se presentan datos históricos de emisiones para observar el nivel de cumplimiento de los límites actuales y en base a ello, junto con antecedentes de las Secciones anteriores, proponer nuevos límites de emisión. En línea con la estructura del decreto, la justificación se presenta para emisiones y capturas a nivel anual, y luego separada para cada proceso unitario y contaminante.

---

<sup>111</sup> <https://retc.mma.gob.cl/indicadores/dashboard-general/> (visitada en junio 2022)

## 8.5.1 Emisiones anuales

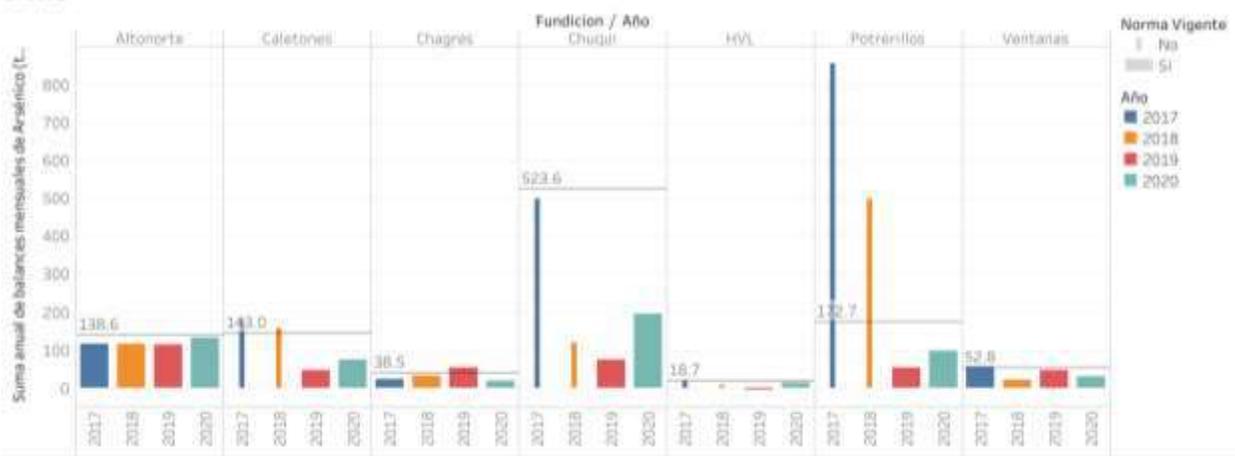
### 8.5.1.1 As

Actualmente se norma la emisión anual neta que considera el arsénico removido en el material de limpieza, pero como se explicó anteriormente (ver Sección 8.4.2), la periodicidad de esta remoción genera distorsiones en este indicador. Se propone, por tanto, cambiar el límite de emisión anual a dos límites diferentes:

1. Para la suma de balances mensuales en un año calendario, sin considerar la remoción de material de limpieza.
2. Para las emisiones trianuales, considerando la remoción de material de limpieza y mantención durante este período.

En específico, para el primer límite se propone un límite un 10% mayor que el actual umbral, considerando que actualmente el método considera el descuento por la remoción de material de limpieza. Es importante resaltar que esta propuesta no implica una relajación de la norma actual ya que correspondería a un indicador distinto al no considerar la remoción de material de limpieza y mantención. De hecho, en la Tabla 8-11 y en la Figura 8-3 se observa que en las fundiciones con menor fracción de material de limpieza en promedio, esta representa un 10% del arsénico emitido, por lo que en el resto de las fundiciones, este nuevo límite implicaría implícitamente un aumento de la ambición.

Por su parte, para el segundo límite se propone complementar la restricción anterior con un nuevo límite más restrictivo para emisión trianual, el cual sí considere la reducción de emisión por material de limpieza. Esto tomando en cuenta que, para horizontes de tres años, es esperable que la estimación de las emisiones por medio del balance de masa, considerado el material de limpieza y mantención, converjan con las emisiones reales (ver Sección 8.4.2), o al menos su diferencia sea menor que al hacer el análisis en un horizonte anual. Lo anterior puesto que las mantenciones observadas ocurren en plazos menores a los tres años propuestos. Si bien, se tratan de normas diferentes con la actual norma la cual utiliza un horizonte de un año, su equivalencia anual corresponde a un valor límite 10% más exigente que el actual, el cual responde



Nota: No considera la resta de emisiones asociada al material de limpieza.

**Figura 8-4 Suma de balances mensuales de As y límite propuesto [ton/año]**

Fuente: Elaboración propia

### 8.5.1.2 SO<sub>2</sub>

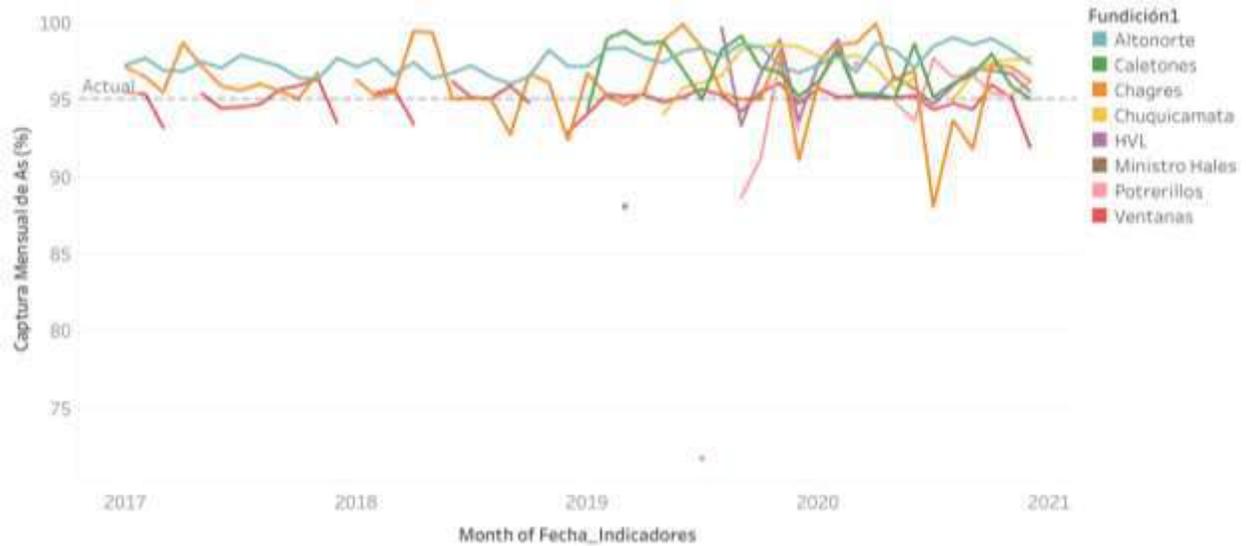
Tomando en consideración que los niveles de concentración de SO<sub>2</sub> en el aire se encuentran bajo los umbrales normados por la NPCA de SO<sub>2</sub> para todas las estaciones (ver Sección 6.2), no se proponen nuevos límites de emisión para este contaminante.

## 8.5.2 Eficiencia de captura y fijación

### 8.5.2.1 As

En la Figura 8-5 se presenta el porcentaje de captura y fijación de arsénico para las distintas fundiciones en el periodo con norma vigente. Se puede observar que fundiciones como Altonorte cumplen con holgura el requisito de 95% para todo el periodo. Sin embargo, la mayoría tiene varios meses bajo el umbral. Si bien durante la consultoría se discutió la opción de realizar una exigencia a nivel mensual, considerando que los impactos en salud del arsénico a los niveles de concentración en el aire observado son efectos crónicos y no agudos, se desistió de esta opción.

De la misma forma, si bien se considera posible realizar un aumento del nivel de ambición de este indicador, en la presente propuesta se privilegió el aumento de la ambición de los demás límites complementarios. Lo anterior responde a que los impactos de estos contaminantes en salud, para los niveles de concentración observados, ocurren a causa de la exposición crónica. Lo anterior está en línea con los límites propuestos por la US-EPA que no establece exigencias de este tipo. Se espera que las modificaciones que tenga este indicador responda a la implementación del resto de los límites.

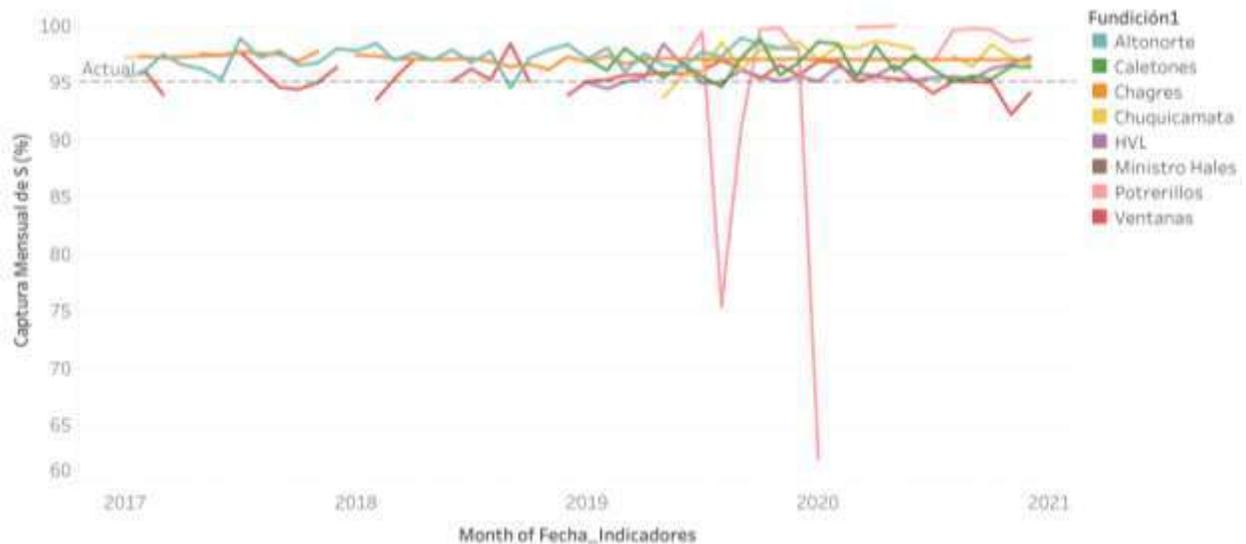


**Figura 8-5 Captura y Fijación de Arsénico (%)**

Fuente: Elaboración propia

### 8.5.2.2 S

En la Figura 8-6 se presenta el porcentaje de captura y fijación de azufre para las distintas fundiciones en el periodo con norma vigente. En este caso se observa un mayor cumplimiento de las fundiciones con excepción de meses puntuales. Al igual que en emisiones anuales de SO<sub>2</sub>, no se considera necesario aumentar la restricción de su emisión, tomando en cuenta que no se está superando la NPCA de este contaminante.



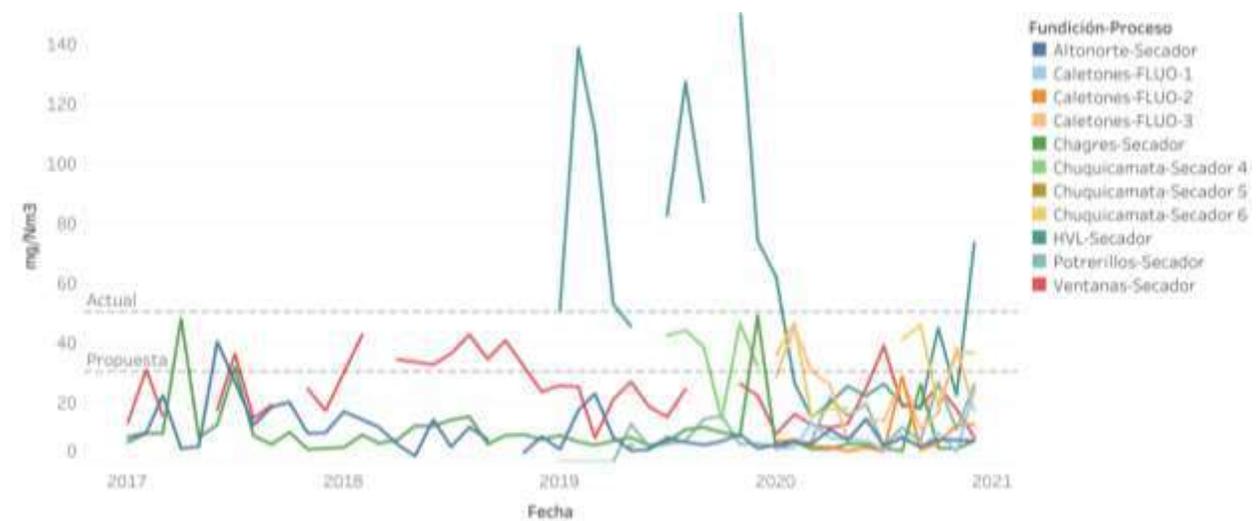
**Figura 8-6 Captura y Fijación de Azufre (%)**

Fuente: Elaboración propia

### 8.5.3 Límites para Secadores

#### 8.5.3.1 MP

Para el proceso regulado de secado, actualmente se cuenta con un límite de 50 mg/Nm<sup>3</sup> para material particulado en las fundiciones existentes. En la Figura 8-7 se puede observar que para el periodo con la norma vigente todas las fundiciones han podido cumplir el límite, con excepción de Hernán Videla Lira, la cual lo cumplió solo unos cuantos meses. En un escenario de alta ambición se propone reducir el límite a 30 mg/m<sup>3</sup>, que corresponde al límite exigido actualmente a nuevas fundiciones. Cabe resaltar que basado en los datos históricos que se ven en la figura, este nuevo límite podría requerir de esfuerzos adicionales considerables por parte de fundiciones que hoy cumplen el nivel aceptable.



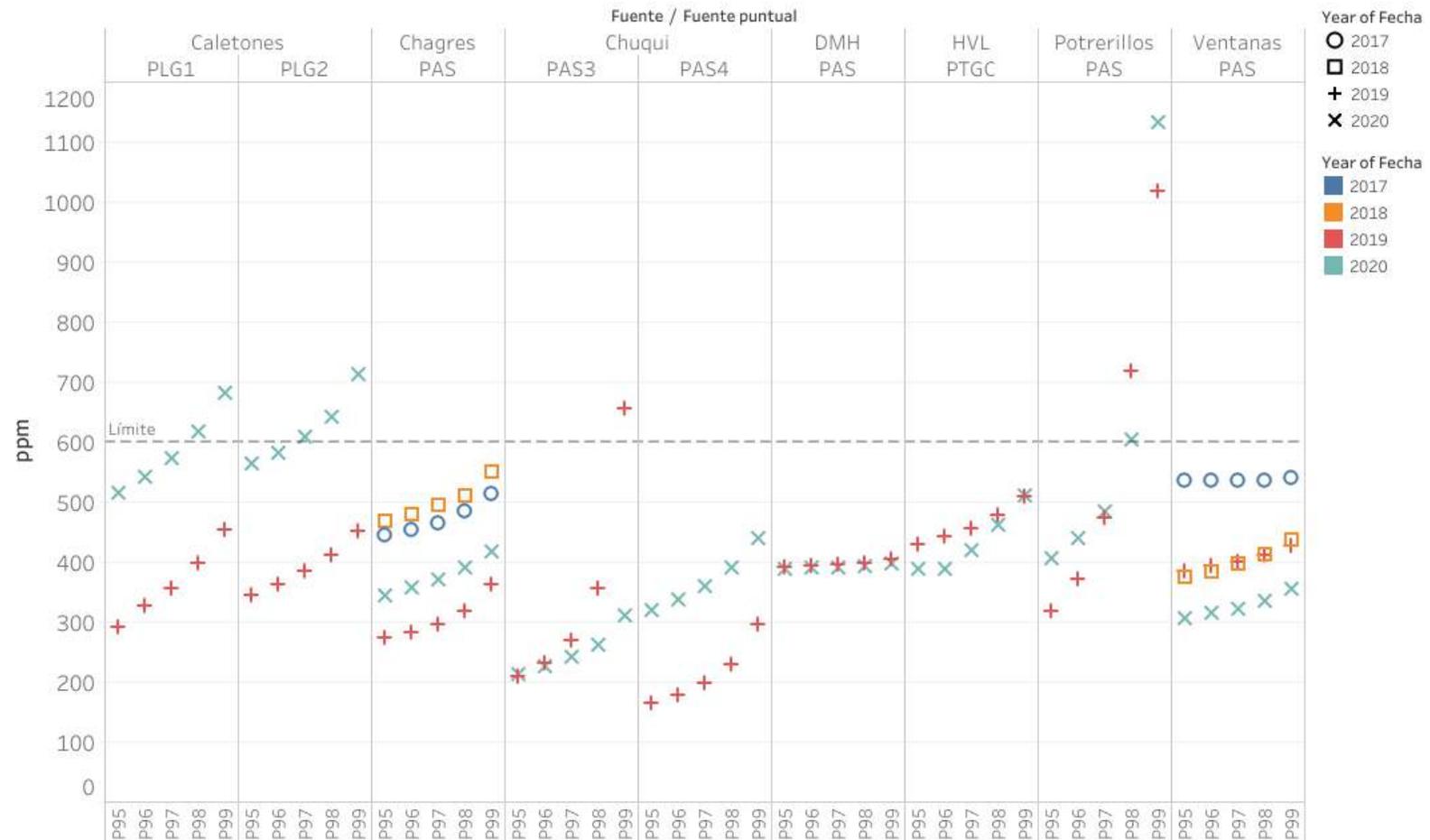
**Figura 8-7 Material Particulado [mg/Nm<sup>3</sup>] en Secadores**

Fuente: Elaboración propia

### 8.5.4 Límites para Plantas Ácidos

#### 8.5.4.1 SO<sub>2</sub>

En la Figura 8-8 se pueden observar las concentraciones correspondientes a los percentiles 95, 96, 97, 98 y 99 de cada año en que la norma actual se encuentra vigente en las distintas fundiciones. La norma actual exige un límite horario de 600 ppm de SO<sub>2</sub> que se debe cumplir al menos el 95% de las horas de funcionamiento anual. En la Figura 8-8 se observa que el percentil 95 de todas las fuentes se encuentra con holgura bajo este límite. Para avanzar en la línea con la propuesta de la US-EPA (US-EPA, 2022), donde el límite se debe cumplir en el 100% de las horas, se propone subir el porcentaje de exigencia a un 99%. Mirando el último año de operación ("x" de color celeste), esta nueva exigencia solo demandaría esfuerzos adicionales para la fundición de Potrerillos y Caletones, sumado a que esta última sí hubiera cumplido esta exigencia en el año 2019.



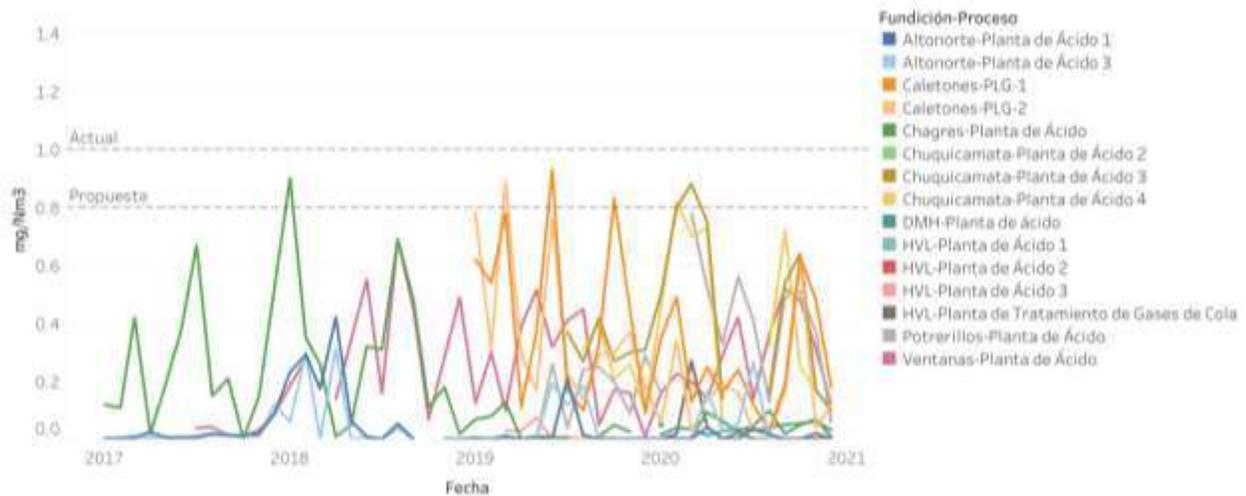
Nota: El límite de 600 ppm aplica para todas las fuentes menos la planta de tostación Ministro Hales (DMH), la cual posee un límite de 400 ppm.

**Figura 8-8 Percentiles anuales de concentración horaria de SO2**

Fuente: Elaboración propia

### 8.5.4.2 As

Respecto del arsénico medido en plantas de ácidos, la Figura 8-9 presenta las concentraciones históricas medidas para los periodos y fuentes con norma vigente. Se puede observar que el límite actual de 1 mg/Nm<sup>3</sup> se cumple para todo el periodo y por todas las fuentes. Para asegurar la calidad actual del aire actual, se propone reducir el límite a 0,8 mg/Nm<sup>3</sup>. En la Figura se puede ver que este valor sólo se ha superado en situaciones esporádicas por diferentes. De esta manera, se prevendría un aumento de las emisiones permitido por el espacio de holgura existente en la actualidad.

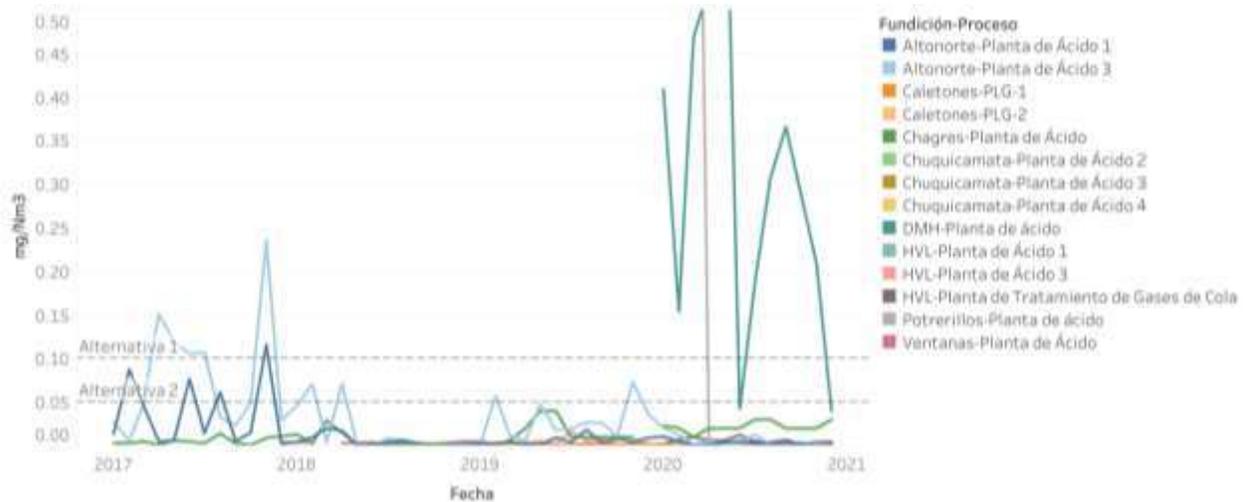


**Figura 8-9 Arsénico [mg/Nm<sup>3</sup>] medido en Plantas de Ácidos**

Fuente: Elaboración propia

### 8.5.4.3 Hg

En la Figura 8-10 se puede observar el mercurio medido en las plantas de ácido. Actualmente no existen límites de emisión para las fundiciones existentes, pero sí un límite de 0,1 mg/Nm<sup>3</sup> para las nuevas fundiciones. Para evitar incrementos futuros en los niveles de emisión de este proceso-contaminante, se propone ampliar el límite impuesto a fundiciones nuevas hacia las existentes y otras fuentes (la planta de tostación DMH). Observando la figura, se puede ver que el primer límite propuesto ya se cumple en la mayor parte del tiempo. La excepción es la planta de tostación DMH la cual presenta niveles mayores de concentración. Este nuevo límite exigiría esfuerzos por parte de DMH, pero es difícil estimar el nivel de esfuerzo con los datos presentados considerando que corresponden a un tipo de observación sin obligaciones. En un escenario de mayor ambición, se podría reducir este límite a 0,5 mg/Nm<sup>3</sup> el cual estarían cumpliendo todas fundiciones que reportaron este contaminante en el último año.



**Figura 8-10 Mercurio [mg/Nm<sup>3</sup>] medido en Plantas de Ácidos**

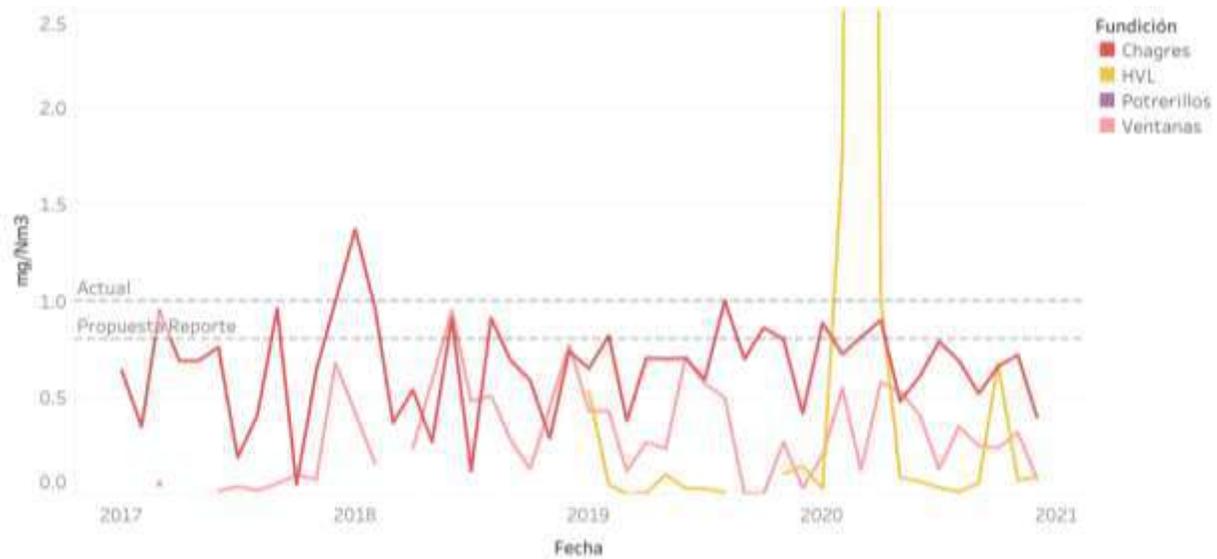
Fuente: Elaboración propia

## 8.5.5 Límites para Hornos de limpieza de escoria

### 8.5.5.1 As

En la Figura 8-11 se muestra el arsénico medido en los hornos de limpieza de escoria. El límite actual corresponde a 1 mg/Nm<sup>3</sup> tanto para fundiciones nuevas como existentes. En la Figura se observa que este límite se ha cumplido para la mayoría de los meses con norma vigente, sin embargo, reducir el límite a un 80% del nivel actual (0,8 mg/Nm<sup>3</sup>) implicaría que una gran cantidad de meses se hubiera superado el potencial límite.

Sumado a esto, se observa que en algunos casos la superación en un mes específico viene acompañado de una alta emisión en los meses siguientes, lo que podría significar que estas altas mediciones están afectadas por condiciones operacionales que duran un par de meses. Esto es de especial preocupación con un contaminante que se acumula en el medio ambiente. Dados estos antecedentes, y considerando el rol preventivo de la SMA, se propone un nuevo instrumento de regulación con un enfoque preventivo. Este correspondería a la obligación de entregar un reporte cuando se supere 0,8 mg/Nm<sup>3</sup>, explicando la causa de esa alta concentración y un plan de acciones para no superarla en los siguientes meses.

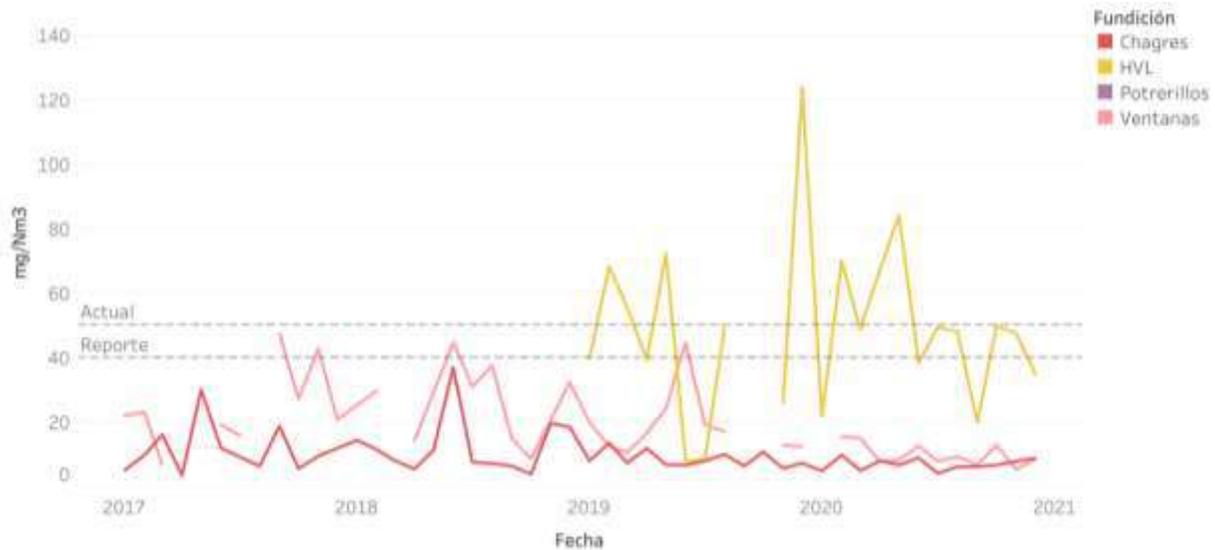


**Figura 8-11 Arsénico [mg/Nm<sup>3</sup>] medido en Hornos de Escoria**

Fuente: Elaboración propia

#### 8.5.5.2 MP

Respecto del material particulado medido en los hornos de escoria, la Figura 8-12 muestra las emisiones históricas reportadas. Se observa un incumplimiento reiterado por parte de Hernán Videla Lira al límite de 50 mg/Nm<sup>3</sup> para fuentes existentes, el cual incluso baja a 30 mg/Nm<sup>3</sup> para fuentes nuevas. Similar al caso anterior se propone exigir un reporte al superar el 80% del límite de emisiones, explicando las causas de esa alta concentración y detallando un plan de acciones para no superarla en los siguientes meses. Sin embargo, excluyendo a Hernán Videla Lira, sí pareciera ser posible extender el límite de fuente nuevas (30 mg/Nm<sup>3</sup>) a el resto de las fundiciones.



**Figura 8-12 Material Particulado [mg/Nm3] medido en Hornos de Escoria**

Fuente: Elaboración propia

## 8.5.6 Límites para Hornos de Refino

### 8.5.6.1 MP

Por último, la Figura 8-13 muestra el material particulado medido en los hornos de refino. Es importante notar que Chagres cuenta con una medición por mes mientras que Ventanas cuenta con una medición isocinética al semestre. Actualmente, para los hornos de refino solo existe un límite de opacidad (20%), pero la propuesta de la US-EPA (US-EPA, 2022) incorpora un límite de concentración material particulado de 5,8 mg/m<sup>3</sup>. Chagres cumpliría el valor de la propuesta para todas las mediciones mientras que Ventanas lo cumpliría en la mitad de las observaciones.



Para mantener la calidad actual y considerando el análisis presentado en la Sección 8.5.4.3 se propone aplicar este límite también a las plantas de ácidos de las fundiciones existentes y otras fuentes industriales emisoras de arsénico existentes.

- **Exigir informe de causas y plan de acciones cuando se supere el 80% de la norma en los hornos de limpieza de escoria:** En base a lo discutido en las secciones 8.5.5.1 y 8.5.5.2, se propone que si un horno de limpieza de escoria emite una concentración de As o MP mayor o igual al 80% de la norma, se exija entregar un informe a las autoridades competentes que explique la causa de esa alta emisión junto con un plan de acciones para no superar dicho umbral en los siguientes meses.
- **Agregar un límite de emisión de material particulado a las chimeneas de campanas secundarias:** Actualmente, solo algunas fuentes existentes poseen chimenea de campana secundaria (*secondary hood system*), donde los gases liberados por estas no poseen límites de emisión. Se propone por tanto un límite de 11,6 mg/ Nm<sup>3</sup> para todas las chimeneas de campanas secundarias, ya sea que provengan del convertidor, reactor u otro proceso. Cabe resaltar que este límite se encuentra vigente en la norma estadounidense sobre arsénico desde hace más de 40 años (US-EPA, 1986).
- **Exigir que se informe emisión de MP en las chimeneas de todas las fuentes relevantes:** Así como actualmente se pide el reporte de Hg en las plantas de ácido, se propone exigir el reporte de las emisiones de MP para cualquier combinación de chimeneas provenientes de los secadores, hornos de fusión, hornos de escoria, convertidores, unidades combinadas de fusión y conversión, hornos de refinación de ánodo.

### 8.6.2 Alternativa 2: actualizar límites actuales a propuesta US-EPA

Una segunda alternativa consiste en adecuar los límites de los procesos unitarios que se encuentran normados actualmente, a los niveles de la propuesta de la US-EPA (US-EPA, 2022). Asimismo, se propone variar el control de las emisiones totales de arsénico mediante dos límites diferenciados entre anuales y trianuales. En específico, los cambios adicionales a los propuestos en la alternativa 1 son los siguientes:

- **Cambiar el límite de balance de emisiones anuales de Arsénico por un límite en la suma de los balances mensuales en un año calendario y límite de emisiones trianual:** En base a lo discutido en la Sección 8.5.1, se propone modificar el límite de emisión anual que se calcula por balance de emisiones, por un límite de la suma anual de los balances mensuales (sin considerar material de limpieza y mantención) y un límite de emisión trianual (que considera el material de limpieza y mantención).
- **Exigir un cumplimiento de 99% de las horas de funcionamiento para el límite horario de SO<sub>2</sub>:** En base al análisis realizado en la Sección 8.5.4.1 se propone elevar el 95% de cumplimiento de 95% a 99% para el límite de SO<sub>2</sub> emitido en las plantas de ácido. Esto es de especial importancia para reducir la frecuencia de, e idealmente evitar, episodios críticos de contaminación. Cabe resaltar que la US-EPA (US-EPA, 2022) recomendó terminar con la excepción de cumplimiento de la norma en los periodos de encendido, apagado y falla, exigiendo así su cumplimiento para el 100% de la horas.

- **Reducir el límite de emisión de Hg en las plantas de ácido de las fundiciones existentes y fuentes nuevas:** En base a lo analizado en la Sección 8.5.4.3, se propone reducir el límite de Hg de 0,1 a 0,05 mg/Nm<sup>3</sup> para las fundiciones existentes y fuentes nuevas.
- **Agregar un límite de material particulado en los hornos de refino:** Actualmente, en los hornos de refino se controla únicamente la opacidad. En línea con lo propuesto por la US-EPA (US-EPA, 2022), se sugiere cambiar el límite actual a uno de 5,8 mg/Nm<sup>3</sup>.

### 8.6.3 Alternativa 3: actualizar límites y agregar fuentes fugitivas de propuesta US-EPA

Por último, se propone una tercera alternativa donde se agregan límites de emisiones fugitivas, según lo propuesto por la US-EPA (US-EPA, 2022), además de otros límites vigentes en la normativa estadounidense. En específico, los cambios adicionales a los propuestos en la alternativa 2 son los siguientes:

- **Agregar un límite de material particulado para emisiones fugitivas medidas en los techos de los reactores, convertidores y hornos de refino:** Actualmente no existen límites de emisiones fugitivas, por lo tanto, se sugiere adoptar los límites propuestos por la US-EPA (US-EPA, 2022). Estos límites se chequean en el techo del reactor, el convertidor y el horno de refino, con distintos límites para cada uno (ver Tabla 8-3 o Tabla 8-12). Si bien el límite es para material particulado, esto aspira a limitar por añadidura a otros contaminantes más peligrosos.
- **Prohibir los convertidores por lotes (tipo *batch*) en nuevas fundiciones:** Dado el alto nivel de emisiones fugitivas asociadas a este tipo de convertidores, se propone su prohibición en nuevas fundiciones. Esta restricción se encuentra vigente en Estados Unidos para todas las fundiciones construidas después de 1998 (US-EPA, 2002a).
- **Agregar un límite de MP10 en los reactores de fusión de las fuentes nuevas:** Se propone limitar la emisión de MP10 en los reactores de fusión de las nuevas fuentes a un máximo de 15 gramos de MP10 emitido por tonelada de concentrado de cobre que ingresa.
- **Agregar un límite de material particulado para las emisiones de escape generadas a nivel de sistema :** Para todo tipo de proceso de dicho sistema, se propone un límite de 300 gramos de MP10 por tonelada de concentrado de cobre que ingresa, en coherencia con la norma de la US-EPA (2007). El límite establecido por la norma de la US-EPA de 2007 a nivel de sistema aplica para los gases de escape de cualquier combinación de chimeneas, salidas de gases u otras aperturas en hornos, reactores u otros tipos de procesos utilizados para la producción de cobre anódico a partir de concentrados de cobre mediante técnicas pirometalúrgicas. Adicionalmente, dicha norma específica que esto incluye secadores, hornos de fusión, hornos de escoria, convertidores, unidades combinadas de fusión y conversión, hornos de refinación de ánodo, entre otros equipos.
- **Obligar a instalar sistemas de captura y tratamiento de gases secundarios en los convertidores:** Por último, se propone obligar a instalar sistemas de captura y tratamiento de gases secundarios en los convertidores, tal como actualmente se exige en la normativa de EEUU (US-EPA, 1986).

#### **8.6.4 Resumen alternativas**

Cada alternativa contiene una serie de cambios que no necesariamente deben ser realizados en conjunto, esto quiere decir que es posible implementar una alternativa distinta con cambios elegidos de cada alternativa. Es importante resaltar que para cumplir con los límites se deben medir isocinéticamente las emisiones evacuadas de todas las chimeneas, cuyo origen incluya las emisiones provenientes de las etapas de fundición, conversión, tratamiento de escoria y/o refinación.

Tabla 8-12 Límites de emisión actuales y propuestos según alternativa

Punto de medición	Contaminante	Fuente	Actual	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Método	Frecuencia de verificación
Sistema de la fundición	As	Fundiciones existentes	Emisión anual	Emisión anual	<b>Balance Anual Emisión Trianual</b>	Balance Anual Emisión Trianual	Balance masa	Anual / Trianual
	SO <sub>2</sub>	Fundiciones existentes	Balance anual	Balance anual	Balance anual	Balance anual	Balance masa	Anual
Secadores	MP	Fundiciones existentes	50 mg/Nm <sup>3</sup>	50 mg/Nm <sup>3</sup>	50 mg/Nm <sup>3</sup>	<b>30 mg/Nm<sup>3</sup></b>	CH-5	Mensual
		Fuentes nuevas	30 mg/Nm <sup>3</sup>	30 mg/Nm <sup>3</sup>	30 mg/Nm <sup>3</sup>	30 mg/Nm <sup>3</sup>	CH-5	Mensual
Planta de ácidos	SO <sub>2</sub>	Fundiciones existentes	600 ppm	600 ppm	<b>600 ppm (1)</b>	600 ppm (1)	CEMS	Mensual
		Otras fuentes industriales existentes	400 ppm	400 ppm	<b>400 ppm (1)</b>	400 ppm (1)	CEMS	Mensual
		Fuentes nuevas	200 ppm	200 ppm	<b>200 ppm (1)</b>	200 ppm (1)	CEMS	Mensual
	As	Fundiciones existentes	1 mg/Nm <sup>3</sup>	<b>0,8 mg/Nm<sup>3</sup></b>	0,8 mg/Nm <sup>3</sup>	0,8 mg/Nm <sup>3</sup>	CH-29	Mensual
		Otras fuentes industriales existentes	1 mg/Nm <sup>3</sup>	<b>0,8 mg/Nm<sup>3</sup></b>	0,8 mg/Nm <sup>3</sup>	0,8 mg/Nm <sup>3</sup>	CH-29	Mensual
		Fuentes nuevas	1 mg/Nm <sup>3</sup>	<b>0,8 mg/Nm<sup>3</sup></b>	0,8 mg/Nm <sup>3</sup>	0,8 mg/Nm <sup>3</sup>	CH-29	Mensual
	Hg	Fundiciones existentes	n.a.	<b>0,1 mg/Nm<sup>3</sup></b>	<b>0,05 mg/Nm<sup>3</sup></b>	0,05 mg/Nm <sup>3</sup>	CH-29	Mensual
		Otras fuentes industriales existentes	n.a.	<b>0,1 mg/Nm<sup>3</sup></b>	0,1 mg/Nm <sup>3</sup>	0,1 mg/Nm <sup>3</sup>	CH-29	Mensual
		Fuentes nuevas	0,1 mg/Nm <sup>3</sup>	0,1 mg/Nm <sup>3</sup>	<b>0,05 mg/Nm<sup>3</sup></b>	0,05 mg/Nm <sup>3</sup>	CH-29	Mensual
Hornos de limpieza de escoria	As	Fundiciones existentes	1 mg/Nm <sup>3</sup>	<b>1 mg/Nm<sup>3</sup> (2)</b>	1 mg/Nm <sup>3</sup> (2)	1 mg/Nm <sup>3</sup> (2)	CH-29	Mensual
		Fuentes nuevas	1 mg/Nm <sup>3</sup>	<b>1 mg/Nm<sup>3</sup> (2)</b>	1 mg/Nm <sup>3</sup> (2)	1 mg/Nm <sup>3</sup> (2)	CH-29	Mensual
	MP	Fundiciones existentes	50 mg/Nm <sup>3</sup>	<b>50 mg/Nm<sup>3</sup> (3)</b>	50 mg/Nm <sup>3</sup> (3)	50 mg/Nm <sup>3</sup> (3)	CH-5	Mensual
		Fuentes nuevas	30 mg/Nm <sup>3</sup>	<b>30 mg/Nm<sup>3</sup> (4)</b>	30 mg/Nm <sup>3</sup> (4)	30 mg/Nm <sup>3</sup> (4)	CH-5	Mensual

Punto de medición	Contaminante	Fuente	Actual	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Método	Frecuencia de verificación
Hornos de refino	Opacidad	Todas	20% Ringelman	20% Ringelman	n.a.	n.a.		Mensual
	MP	Todas	n.a.	n.a.	<b>5,8 mg/Nm3</b>	5,8 mg/Nm3	CH-5	Mensual
Techo Reactor	MP	Todas	n.a.	n.a.	n.a.	<b>1,95 kg/hr</b>	CH-5	Anual
Techo CPS	MP	Todas	n.a.	n.a.	n.a.	<b>0,77 kg/hr</b>	CH-5	Anual
Techo Hornos de refino	MP	Todas	n.a.	n.a.	n.a.	<b>0,73 kg/hr</b>	CH-5	Anual
Reactor de fusión	MP10	Fuentes nuevas	n.a.	n.a.	n.a.	<b>15 g/ton (5)</b>	CEMS	Anual
Chimeneas de campanas secundarias	MP	Fundiciones existentes	n.a.	<b>11,6 mg/Nm3</b>	11,6 mg/Nm3 (6)	11,6 mg/Nm3 (6)	CH-5	Mensual
		Fuentes nuevas	n.a.	<b>11,6 mg/Nm3</b>	11,6 mg/Nm3 (6)	11,6 mg/Nm3 (6)	CH-5	Mensual
Sistema de la fundición/fuente (7)	MP	Todas	n.a.	n.a.	n.a.	<b>300 g/ton (8)</b>	CEMS	Diario

En negrita se destacan los cambios incrementales respecto de la alternativa regulatoria anterior.

Nota: Las condiciones normales N corresponden a 25°C y 1 atm. En negrita se marcan los cambios respecto del escenario precedente.

- (9) El límite se mantiene, pero se exige el cumplimiento en el 99% de las horas de funcionamiento.
- (10) Si bien el límite se mantiene en 1 mg/Nm3, cuando se supere 0,8 mg/Nm3 se exigirá a la fuente que entregue un informe explicando la causa de superación del umbral de 80% del valor límite establecido, y un plan de acciones para reducir las emisiones correspondientes.
- (11) Si bien el límite se mantiene en 50 mg/Nm3, cuando se supere 40 mg/Nm3 se exigirá a la fuente que entregue un informe explicando la causa de superación del umbral de 80% del valor límite establecido, y un plan de acciones para reducir las emisiones correspondientes.
- (12) Si bien el límite se mantiene en 30 mg/Nm3, cuando se supere 24 mg/Nm3 se exigirá a la fuente que entregue un informe explicando la causa de superación del umbral de 80% del valor límite establecido, y un plan de acciones para reducir las emisiones correspondientes.
- (13) Gramos de MP10 por tonelada de concentrado de cobre que ingresa. El límite es para el promedio anual.
- (14) Se mantiene el límite, pero se hace obligación contar con sistemas de captura secundarios en los convertidores.
- (15) Este valor límite a nivel de sistema aplica para los gases de escape de cualquier combinación de chimeneas, salidas de gases u otras aperturas en hornos, reactores u otros tipos de procesos utilizados para la producción de cobre anódico a partir de concentrados de cobre mediante técnicas pirometalúrgicas. Incluye secadores, hornos de fusión, hornos de escoria, convertidores, unidades combinadas de fusión y conversión, hornos de refinación de ánodo (entre otros equipos).
- (16) Gramos de MP10 por tonelada de concentrado de cobre que ingresa. El límite es para el promedio diario.

Fuente: Elaboración propia

## 8.7 Mejoras de articulado existente

En esta sección se presentan los cambios al articulado existente en la norma chilena que materializarían los cambios resumidos previamente (Sección 8.6). Es importante resaltar que la presente Sección entrega propuestas de carácter referencial, basadas en los hallazgos técnicos del presente estudio. Se destaca que el equipo consultor no cuenta con expertos en asuntos legales, por lo que las propuestas presentadas solo se refieren a aspectos técnicos y son sujeto de mejoras.

Adicionalmente a las mejoras propuestas en esta Sección, existen una serie de recomendaciones presentadas en las Secciones anteriores, y que no se vinculan directamente con el articulado. Entre ellas, se encuentra la estandarización de flujos, aumento en el detalle de la presentación de mediciones y cálculo de los balances de masa, estandarización de unidades de dimensiones y capacidades de presentación de equipos e instalaciones y reporte de información mensual de las horas de operación y capacidades reales de los procesos unitarios. Luego, respecto a las emisiones negativas mensuales, una justificación técnica y operacional de los procesos de la fuente correspondientes al mes en cuestión, proponiendo además modificar los meses seguidos presentando resultados netos de balance mensual negativos a dos meses para solicitar una auditoría externa, junto con solicitar una auditoría específica a balances de masa si esto ocurre en tres meses o más durante el periodo de un año.

### 8.7.1 Artículos sobre objetivo, aplicación territorial y definiciones

A partir de lo presentado en la Sección 8.1 se concluye que no hay razones para cambiar la normativa de estos artículos. Si bien es diferente a la normativa de EEUU, no existe incertidumbre respecto de a quienes aplican las normativas. Por esta razón, no se proponen cambios en los artículos del Título I que define estos elementos.

### 8.7.2 Artículos sobre límites máximos de emisión al aire y plazos de cumplimiento

#### 8.7.2.1 Alternativa 1: asegurar niveles actuales de emisión

Para concretar estos cambios sería necesario modificar los artículos 4°, 5° y 8° del Título II. A continuación, se exponen los artículos propuestos:

*Artículo 4º.- Límites de emisión en chimenea para fundiciones existentes: Las fundiciones existentes no deberán exceder los límites de emisión en la o las chimeneas de los siguientes procesos unitarios:*

*a) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de SO<sub>2</sub> inferior o igual a 600 ppm, partes por millón en volumen. El valor límite de emisión de SO<sub>2</sub> se verificará como concentración promedio horaria, durante cada hora de operación de la planta de ácido.*

b) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de As inferior o igual a 0,8 mg/Nm<sup>3</sup>; y una concentración de Hg inferior o igual a 0,1 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de As y Hg se verificará una vez al mes.

c) Los secadores y los hornos de limpieza de escorias deben emitir una concentración de MP inferior o igual a 50 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de MP se verificará una vez al mes. Adicionalmente, si cada uno de estos equipos emite una concentración de MP mayor o igual a 40 mg/Nm<sup>3</sup>, correspondiente a 80% del valor límite establecido, se deberá entregar un informe a las autoridades competentes que explique la causa de esa alta emisión junto con un plan de acciones para no superar dicho umbral en los siguientes meses.

d) Los hornos de limpieza de escorias deben emitir una concentración de As inferior o igual a 1 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de As se verificará una vez al mes. Adicionalmente, si los hornos de limpieza de escorias emiten una concentración de As mayor o igual a 0,8 mg/Nm<sup>3</sup>, correspondiente a 80% del valor límite establecido, se deberá entregar un informe a las autoridades competentes que explique la causa de esa alta emisión junto con un plan de acciones para no superar dicho umbral en los siguientes meses.

e) Las chimeneas de los hornos de refino deberán mantener un nivel de opacidad de los humos inferior o igual a 20%, según método de escala Ringelman o método 9, de Determinación visual de la opacidad de las emisiones de fuentes estacionarias, de acuerdo al Código de Regulaciones Federales (CFR) 40 de los Estados Unidos, Parte 60.

f) Las chimeneas de los sistemas de captura secundarios de los convertidores y/o los reactores deben emitir una concentración de MP inferior o igual a 11,6 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de MP se verificará una vez al mes.

Las condiciones normales N corresponden a: 25 °C y 1 atmósfera.

Artículo 5º.- Límites de emisión para otras fuentes industriales emisoras de arsénico existentes: Las otras fuentes industriales emisoras de arsénico existentes no deberán exceder los límites de emisión en la o las chimeneas del siguiente proceso unitario:

a) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de SO<sub>2</sub> inferior o igual a 400 ppm, partes por millón en volumen. El valor límite de emisión de SO<sub>2</sub> se verificará como concentración promedio horaria, durante cada hora de operación de la planta de ácido.

b) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de As inferior o igual a 0,8 mg/Nm<sup>3</sup>; y una concentración de Hg inferior o igual a 0,1 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de As y Hg se verificará una vez al mes.

Artículo 8º.- Límites de emisión para fuentes nuevas y plazo para el cumplimiento: Las fuentes emisoras nuevas deben cumplir con las siguientes disposiciones:

Durante cada año calendario:

- a) Emitir una cantidad inferior o igual al 2% en peso del azufre ingresado a la fuente emisora.
- b) Emitir una cantidad inferior o igual al 2% en peso del As ingresado a la fuente emisora.

*Límites de emisión en chimenea:*

a) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de SO<sub>2</sub> inferior o igual a 200 ppm, partes por millón en volumen. El valor límite de emisión de SO<sub>2</sub> se verificará como concentración promedio horaria, durante cada hora de operación de la planta de ácido.

b) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de As inferior o igual a 0,8 mg/Nm<sup>3</sup>; y una concentración de Hg inferior o igual a 0,1 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de As y Hg se verificará una vez al mes.

c) Los secadores y los hornos de limpieza de escorias deben emitir una concentración de MP inferior o igual a 30 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de MP se verificará una vez al mes. Adicionalmente, si cada uno de estos equipos emite una concentración de MP mayor o igual a 24 mg/Nm<sup>3</sup>, correspondiente a 80% del valor límite establecido, se deberá entregar un informe a las autoridades competentes que explique la causa de esa alta emisión junto con un plan de acciones para no superar dicho umbral en los siguientes meses.

d) Los hornos de limpieza de escorias deben emitir una concentración de As inferior o igual a 1 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de As se verificará una vez al mes. Adicionalmente, si los hornos de limpieza de escorias emiten una concentración de As mayor o igual a 0,8 mg/Nm<sup>3</sup>, correspondiente a 80% del valor límite establecido, se deberá entregar un informe a las autoridades competentes que explique la causa de esa alta emisión junto con un plan de acciones para no superar dicho umbral en los siguientes meses.

e) Las chimeneas de los hornos de refino deberán mantener un nivel de opacidad de los humos inferior o igual a 20%, según método de escala Ringelman o método 9, de Determinación visual de la opacidad de las emisiones de fuentes estacionarias, de acuerdo al Código de Regulaciones Federales (CFR) 40 de los Estados Unidos, Parte 60.

f) Las chimeneas de los sistemas de captura secundarios de los convertidores y/o los reactores deben emitir una concentración de MP inferior o igual 11,6 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de MP se verificará una vez al mes.

*Las condiciones normales N corresponden a 25 °C y 1 atmósfera.*

*Las fuentes emisoras nuevas deben cumplir con lo dispuesto en el presente artículo desde su entrada en operación.*

### 8.7.2.2 Alternativa 2: actualizar límites actuales a propuesta US-EPA

Para consolidar estos cambios sería necesario modificar los artículos 3°, 4°, 5° y 8° del Título II. A continuación, se exponen los artículos propuestos:

*Artículo 3º.- Límites de emisión anual para fundiciones existentes: Las fundiciones existentes no deberán exceder los siguientes límites máximos de emisión para SO<sub>2</sub> y As. Donde el límite de SO<sub>2</sub>*

se calcula como la suma de los balances mensuales por año calendario; el límite anual de As como la suma de los balances mensuales por año calendario; y el límite de As trianual como el balance las emisiones de los tres últimos años calendarios, considerando en este último las remociones por material de limpieza:

Tabla 1: Límites máximos de emisión de SO<sub>2</sub> y As para fuentes existentes.

Fuente emisora	Balance SO <sub>2</sub> [t/año]	Emisión As anual [t/año]	Balance As trianual [t/3 años]
Altonorte	24.000	139	340
Caletones	47.680	143	351
Chagres	14.400	39	95
Chuquicamata	49.700	524	1.285
Hernán Videla Lira	12.880	19	456
Potrerosillos	24.400	173	424
Ventanas	14.650	53	130

Simultáneamente, las fundiciones existentes deberán cumplir con un porcentaje de captura y fijación del azufre (S) y del arsénico (As) igual o superior a un 95%.

Para el primer año de vigencia de la norma las fuentes emisoras existentes deben calcular sus emisiones anuales de SO<sub>2</sub> y de As según la siguiente relación:

$$\text{Emisión} = (\text{Límite máximo de emisión} / 12) * \text{N}^{\circ} \text{ de meses restantes.}$$

Donde el N° de meses restantes corresponde a los meses contados desde la entrada en vigencia del decreto hasta diciembre de ese año.

Artículo 4º.- Límites de emisión en chimenea para fundiciones existentes: Las fundiciones existentes no deberán exceder los límites de emisión en la o las chimeneas de los siguientes procesos unitarios:

a) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de SO<sub>2</sub> inferior o igual a 600 ppm, partes por millón en volumen. El valor límite de emisión de SO<sub>2</sub> se verificará como concentración promedio horaria, durante cada hora de operación de la planta de ácido.

b) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de As inferior o igual a 0,8 mg/Nm<sup>3</sup>; y una concentración de Hg inferior o igual a 0,05 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de As y Hg se verificará una vez al mes.

c) Los secadores y los hornos de limpieza de escorias deben emitir una concentración de MP inferior o igual a 50 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de MP se verificará una vez al mes. Adicionalmente, si cada uno de estos equipos emite una concentración de MP mayor o igual a 40

mg/Nm<sup>3</sup>, correspondiente a 80% del valor límite establecido, se deberá entregar un informe a las autoridades competentes que explique la causa de esa alta emisión junto con un plan de acciones para no superar dicho umbral en los siguientes meses.

d) Los hornos de limpieza de escorias deben emitir una concentración de As inferior o igual a 1 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de As se verificará una vez al mes. Adicionalmente, si los hornos de limpieza de escorias emiten una concentración de As mayor o igual a 0,8 mg/Nm<sup>3</sup>, correspondiente a 80% del valor límite establecido, se deberá entregar un informe a las autoridades competentes que explique la causa de esa alta emisión junto con un plan de acciones para no superar dicho umbral en los siguientes meses

e) Las chimeneas de los hornos de refinado deberán mantener una concentración de MP inferior o igual a 5,8 mg/m<sup>3</sup>N, El valor límite de MP se verificará una vez al mes.

f) Las chimeneas de los sistemas de captura secundarios de los convertidores y/o los reactores deben emitir una concentración de MP inferior o igual a 11,6 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de MP se verificará una vez al mes.

Las condiciones normales N corresponden a: 25 °C y 1 atmósfera.

Artículo 5º.- Límites de emisión para otras fuentes industriales emisoras de arsénico existentes: Las otras fuentes industriales emisoras de arsénico existentes no deberán exceder los límites de emisión en la o las chimeneas del siguiente proceso unitario:

a) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de SO<sub>2</sub> inferior o igual a 400 ppm, partes por millón en volumen. El valor límite de emisión de SO<sub>2</sub> se verificará como concentración promedio horaria, durante cada hora de operación de la planta de ácido.

b) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de As inferior o igual a 0,8 mg/Nm<sup>3</sup>; y una concentración de Hg inferior o igual a 0,1 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de As y Hg se verificará una vez al mes.

Artículo 8º.- Límites de emisión para fuentes nuevas y plazo para el cumplimiento: Las fuentes emisoras nuevas deben cumplir con las siguientes disposiciones:

Durante cada año calendario:

- a) Emitir una cantidad inferior o igual al 2% en peso del azufre ingresado a la fuente emisora.
- b) Emitir una cantidad inferior o igual al 2% en peso del As ingresado a la fuente emisora.

Límites de emisión en chimenea:

a) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de SO<sub>2</sub> inferior o igual a 200 ppm, partes por millón en volumen. El valor límite de emisión de SO<sub>2</sub> se verificará como concentración promedio horaria, durante cada hora de operación de la planta de ácido.

b) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de As inferior o igual a 0,8 mg/Nm<sup>3</sup>; y una concentración de Hg inferior o igual a 0,1 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de As y Hg se verificará una vez al mes.

c) Los secadores y los hornos de limpieza de escorias deben emitir una concentración de MP inferior o igual a 30 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de MP se verificará una vez al mes. Adicionalmente, si cada uno de estos equipos emite una concentración de MP mayor o igual a 24 mg/Nm<sup>3</sup>, correspondiente a 80% del valor límite establecido, se deberá entregar un informe a las autoridades competentes que explique la causa de esa alta emisión junto con un plan de acciones para no superar dicho umbral en los siguientes meses.

d) Los hornos de limpieza de escorias deben emitir una concentración de As inferior o igual a 1 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de As se verificará una vez al mes. Adicionalmente, si los hornos de limpieza de escorias emiten una concentración de As mayor o igual a 0,8 mg/Nm<sup>3</sup>, correspondiente a 80% del valor límite establecido, se deberá entregar un informe a las autoridades competentes que explique la causa de esa alta emisión junto con un plan de acciones para no superar dicho umbral en los siguientes meses.

e) Las chimeneas de los hornos de refinado deberán mantener un nivel de opacidad de los humos inferior o igual a 20%, según método de escala Ringelman o método 9, de Determinación visual de la opacidad de las emisiones de fuentes estacionarias, de acuerdo al Código de Regulaciones Federales (CFR) 40 de los Estados Unidos, Parte 60.

f) Las chimeneas de los sistemas de captura secundarios de los convertidores y/o los reactores deben emitir una concentración de MP inferior o igual 11,6 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de MP se verificará una vez al mes.

Las condiciones normales N corresponden a 25 °C y 1 atmósfera. deben cumplir con lo dispuesto en el presente artículo desde su entrada en operación.

### 8.7.2.3 Alternativa 3: actualizar límites y agregar fuentes fugitivas de propuesta US-EPA

Para consolidar estos cambios sería necesario modificar los artículos 3°, 4°, 5° y 8° del Título II. A continuación, se exponen los artículos propuestos:

Artículo 3º.- Límites de emisión anual para fundiciones existentes: Las fundiciones existentes no deberán exceder los siguientes límites máximos de emisión para SO<sub>2</sub> y As. Donde el límite de SO<sub>2</sub> se calcula como la suma de los balances mensuales por año calendario; el límite anual de As como la suma de los balances mensuales por año calendario; y el límite de As trianual como el balance las emisiones de los tres últimos años calendarios, considerando en este último las remociones por material de limpieza:

Tabla 1: Límites máximos de emisión de SO<sub>2</sub> y As para fuentes existentes.

Fuente emisora	Balance SO2 [ton/año]	Emisión As anual [ton/año]	Balance As trianual [ton/3 años]
Altonorte	24.000	139	340
Caletones	47.680	143	351
Chagres	14.400	39	95
Chuquicamata	49.700	524	1.285
Hernán Videla Lira	12.880	19	46
Potrerosillos	24.400	173	424
Ventanas	14.650	53	130

Simultáneamente, las fundiciones existentes deberán cumplir con un porcentaje de captura y fijación del azufre (S) y del arsénico (As) igual o superior a un 95%.

Para el primer año de vigencia de la norma las fuentes emisoras existentes deben calcular sus emisiones anuales de SO2 y de As según la siguiente relación:

$$\text{Emisión} = (\text{Límite máximo de emisión} / 12) * \text{Nº de meses restantes.}$$

Donde el Nº de meses restantes corresponde a los meses contados desde la entrada en vigencia del decreto hasta diciembre de ese año.

Artículo 4º.- Límites de emisión en chimenea o techo para fundiciones existentes: Las fundiciones existentes no deberán exceder los límites de emisión en las chimeneas o en los techos de los siguientes procesos unitarios:

a) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de SO2 inferior o igual a 600 ppm, partes por millón en volumen. El valor límite de emisión de SO2 se verificará como concentración promedio horaria, durante cada hora de operación de la planta de ácido.

b) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de As inferior o igual a 0,8 mg/Nm3; y una concentración de Hg inferior o igual a 0,05 mg/Nm3. El valor límite de emisión de As y Hg se verificará una vez al mes.

c) Los secadores y los hornos de limpieza de escorias deben emitir una concentración de MP inferior o igual a 50 mg/Nm3. El valor límite de emisión de MP se verificará una vez al mes. Adicionalmente, si cada uno de estos equipos emite una concentración de MP mayor o igual a 40 mg/Nm3, correspondiente a 80% del valor límite establecido, se deberá entregar un informe a las autoridades competentes que explique la causa de esa alta emisión junto con un plan de acciones para no superar dicho umbral en los siguientes meses.

d) Los hornos de limpieza de escorias deben emitir una concentración de As inferior o igual 1 mg/Nm3. El valor límite de emisión de As se verificará una vez al mes. Adicionalmente, si los hornos de limpieza de escorias emiten una concentración de As mayor o igual a 0,8 mg/Nm3, correspondiente a 80% del valor límite establecido, se deberá entregar un informe a las

autoridades competentes que explique la causa de esa alta emisión junto con un plan de acciones para no superar dicho umbral en los siguientes meses.

e) Las chimeneas de los hornos de refinado deberán mantener una concentración de MP inferior o igual a 5,8 mg/m<sup>3</sup>N. El valor límite de MP se verificará una vez al mes.

f) Los techos de los reactores deben emitir un flujo de MP inferior o igual a 1,95 kg/hr. El valor límite de emisión de MP se verificará una vez al año.

g) Los techos de los convertidores deben emitir un flujo de MP inferior o igual a 0,77 kg/hr. El valor límite de emisión de MP se verificará una vez al año.

h) Los techos de los hornos de refinado deben emitir un flujo de MP inferior o igual a 0,73 kg/hr. El valor límite de emisión de MP se verificará una vez al año.

i) Las chimeneas de los sistemas de captura secundarios de los convertidores y/o reactores deben emitir una concentración de MP inferior o igual a 11,6 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de MP se verificará una vez al mes.

j) Los sistemas deben emitir una cantidad de MP inferior o igual a 300 gramos por tonelada de concentrado procesado, en promedio para cada día de operación. El valor límite de emisión de MP se verificará diariamente. Esto comprende los gases de escape de cualquier combinación de chimeneas, salidas de gases u otras aperturas en hornos, reactores u otros tipos de procesos utilizados para la producción de cobre anódico a partir de concentrados de cobre mediante técnicas pirometalúrgicas.

Las condiciones normales N corresponden a: 25 °C y 1 atmósfera.

Artículo 5º.- Límites de emisión para otras fuentes industriales emisoras de arsénico existentes: Las otras fuentes industriales emisoras de arsénico existentes no deberán exceder los límites de emisión en la o las chimeneas del siguiente proceso unitario:

a) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de SO<sub>2</sub> inferior o igual a 400 ppm, partes por millón en volumen. El valor límite de emisión de SO<sub>2</sub> se verificará como concentración promedio horaria, durante cada hora de operación de la planta de ácido.

b) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de As inferior o igual a 0,8 mg/Nm<sup>3</sup>; y una concentración de Hg inferior o igual a 0,1 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de As y Hg se verificará una vez al mes.

c) Los sistemas deben emitir una cantidad de MP inferior o igual a 300 gramos por tonelada de concentrado procesado, en promedio para cada día de operación. El valor límite de emisión de MP se verificará diariamente. Esto comprende los gases de escape de cualquier combinación de chimeneas, salidas de gases u otras aperturas en hornos, reactores u otros tipos de procesos utilizados para la producción de cobre anódico a partir de concentrados de cobre mediante técnicas pirometalúrgicas.

*Artículo 8º.- Límites de emisión para fuentes nuevas y plazo para el cumplimiento: Las fuentes emisoras nuevas deben cumplir con las siguientes disposiciones:*

*Durante cada año calendario:*

- a) Emitir una cantidad inferior o igual al 2% en peso del azufre ingresado a la fuente emisora.*
- b) Emitir una cantidad inferior o igual al 2% en peso del As ingresado a la fuente emisora.*

*Límites de emisión en chimenea:*

*a) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de SO<sub>2</sub> inferior o igual a 200 ppm, partes por millón en volumen. El valor límite de emisión de SO<sub>2</sub> se verificará como concentración promedio horaria, durante cada hora de operación de la planta de ácido.*

*b) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de As inferior o igual a 0,8 mg/Nm<sup>3</sup>; y una concentración de Hg inferior o igual a 0,1 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de As y Hg se verificará una vez al mes.*

*c) Los secadores y los hornos de limpieza de escorias deben emitir una concentración de MP inferior o igual a 30 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de MP se verificará una vez al mes. Adicionalmente, si cada uno de estos equipos emite una concentración de MP mayor o igual a 24 mg/Nm<sup>3</sup>, correspondiente a 80% del valor límite establecido, se deberá entregar un informe a las autoridades competentes que explique la causa de esa alta emisión junto con un plan de acciones para no superar dicho umbral en los siguientes meses.*

*d) Los hornos de limpieza de escorias deben emitir una concentración de As inferior o igual a 1 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de As se verificará una vez al mes. Adicionalmente, si los hornos de limpieza de escorias emiten una concentración de As mayor o igual a 0,8 mg/Nm<sup>3</sup>, correspondiente a 80% del valor límite establecido, se deberá entregar un informe a las autoridades competentes que explique la causa de esa alta emisión junto con un plan de acciones para no superar dicho umbral en los siguientes meses.*

*e) Las chimeneas de los hornos de refino deberán mantener un nivel de opacidad de los humos inferior o igual a 20%, según método de escala Ringelman o método 9, de Determinación visual de la opacidad de las emisiones de fuentes estacionarias, de acuerdo al Código de Regulaciones Federales (CFR) 40 de los Estados Unidos, Parte 60.*

*f) Los techos de los reactores deben emitir un flujo de MP inferior o igual a 1,95 kg/hr. El valor límite de emisión de MP se verificará una vez al año.*

*g) Los techos de los convertidores deben emitir un flujo de MP inferior o igual a 0,77 kg/hr. El valor límite de emisión de MP se verificará una vez al año.*

*h) Los techos de los hornos de refino deben emitir un flujo de MP inferior o igual a 0,73 kg/hr. El valor límite de emisión de MP se verificará una vez al año.*

*i) Los reactores de fusión deben emitir una cantidad de MP<sub>10</sub> inferior o igual a 15 gramos por tonelada de concentrado procesada. El valor límite de emisión de MP<sub>10</sub> se verificará una vez al año.*

j) Las chimeneas de los sistemas de captura secundarios de los convertidores y/o los reactores deben emitir una concentración de MP inferior o igual 11,6 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de MP se verificará una vez al mes.

k) Los sistemas deben emitir una cantidad de MP inferior o igual a 300 gramos por tonelada de concentrado procesada, en promedio para cada día de operación. El valor límite de emisión de MP se verificará diariamente. Esto comprende los gases de escape de cualquier combinación de chimeneas, salidas de gases u otras aperturas en hornos, reactores u otros tipos de procesos utilizados para la producción de cobre anódico a partir de concentrados de cobre mediante técnicas pirometalúrgicas.

*Las condiciones normales N corresponden a 25 °C y 1 atmósfera.*

*Las fuentes emisoras nuevas deben cumplir con lo dispuesto en el presente artículo desde su entrada en operación.*

### **8.7.3 Artículos sobre fiscalización y metodologías para verificar el cumplimiento**

A partir de la comparación realizada en la Sección 8.3, se concluye que no hay diferencias significativas entre los métodos de medición exigidos. Por esta razón, se decide no modificar los métodos establecidos en la norma actual. A pesar de lo anterior, sí se proponen cambios en el Artículo 14, específicamente sobre el porcentaje de cumplimiento de los límites de SO<sub>2</sub> horario (como se mencionó en la sección 8.7.2.2). Para las Alternativas 2 y 3 se propone aumentar las horas de funcionamiento que deben cumplir con el límite de SO<sub>2</sub> de un 95% a un 99% (ver Sección 8.5.4.1). Adicionalmente, para la Alternativa 3 que incluye nuevos puntos de medición de emisiones en el techo de las instalaciones, se propone utilizar la metodología CH-5 para medición de MP.

Se recomiendan buenas prácticas transversales, tal como disminuir el periodo para que los reportes técnicos mensuales estén disponibles públicamente en una plataforma online (SNIFA). También, la elaboración de la SMA de informes anuales reportando indicadores relevantes, tal como emisiones mensuales y anuales de As y S, porcentajes de captura y fijación, junto con mediciones isocinéticas de procesos unitarios regulados.

#### **8.7.3.1 Alternativa 1: asegurar los niveles actuales de emisión**

Para la alternativa 1 no hay cambios sustantivos a los artículos de este título, pero sí se deben ampliar los procesos donde se mide MP modificando el Artículo 14. A continuación, se expone el artículo propuesto:

*Artículo 14.- Metodologías de medición en chimenea: Las fuentes emisoras nuevas y existentes deben implementar las siguientes metodologías para verificar el cumplimiento de los límites máximos de emisión en chimenea:*

a) Para medir SO<sub>2</sub> en las plantas de ácido, se debe implementar y validar un sistema de monitoreo continuo, de acuerdo a lo indicado en la Parte 75, volumen 40 del Código de Regulaciones Federales (CFR) de la Agencia Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) o aquel protocolo que establezca la Superintendencia del Medio Ambiente.

Las fuentes emisoras existentes tendrán un plazo de un año para instalar y validar el sistema de monitoreo continuo de emisiones, contado desde la fecha de entrada en vigencia del presente decreto. Las fuentes emisoras nuevas, en tanto, deberán incorporar el sistema de monitoreo continuo desde su entrada en operación. El sistema de monitoreo continuo de emisiones será aprobado mediante resolución fundada por la Superintendencia del Medio Ambiente.

Los valores límites de emisión para SO<sub>2</sub> en plantas de ácido se evaluarán sobre la base de promedios horarios que se deberán cumplir el 95% de las horas de funcionamiento. El 5% de las horas restantes comprende horas de encendido, apagado o posibles fallas.

Los datos que se obtengan del monitoreo continuo deberán estar en línea con los sistemas de información de la Superintendencia del Medio Ambiente y con la Seremi del Medio Ambiente que corresponda.

b) Para medir As y Hg en las plantas de ácido y en los hornos de limpieza de escoria, se debe utilizar el método CH-29 denominado "Determinación de emisión de metales desde fuentes fijas", aprobado por el Ministerio de Salud.

c) Para medir MP, en las chimeneas provenientes de los secadores, hornos de fusión, hornos de escoria, convertidores, unidades combinadas de fusión y conversión, hornos de refinación de ánodo, se debe utilizar el método CH-5 denominado "Determinación de las emisiones de partículas desde fuentes estacionarias", aprobado por el Ministerio de Salud.

Las fuentes emisoras existentes tendrán un plazo de 12 meses para el cumplimiento de lo dispuesto en las letras b) y c) de este artículo, contados desde la fecha de entrada en vigencia del presente decreto. Las fuentes emisoras nuevas, en tanto, deberán darles cumplimiento desde su entrada en operación.

Las mediciones en chimenea deben ser realizadas por entidades de inspección autorizadas por la Superintendencia del Medio Ambiente. De la misma forma, la Superintendencia podrá requerir que se informe en otros periodos y frecuencias sobre los mismos u otros contaminantes o parámetros de interés.

Lo dispuesto en este artículo es sin perjuicio de las atribuciones de la Superintendencia del Medio Ambiente, establecidas en el artículo 3° letra ñ) de su ley orgánica.

### 8.7.3.2 Alternativa 2: actualizar los límites actuales a la propuesta de la US-EPA

Para realizar el cambio propuesto sobre las horas de funcionamiento donde se tiene que cumplir el límite de SO<sub>2</sub>, se tendría que modificar el Artículo 14 del Título III. A continuación, se expone el artículo propuesto:

*Artículo 14.- Metodologías de medición en chimenea: Las fuentes emisoras nuevas y existentes deben implementar las siguientes metodologías para verificar el cumplimiento de los límites máximos de emisión en chimenea:*

*a) Para medir SO<sub>2</sub> en las plantas de ácido, se debe implementar y validar un sistema de monitoreo continuo, de acuerdo a lo indicado en la Parte 75, volumen 40 del Código de Regulaciones Federales (CFR) de la Agencia Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) o aquel protocolo que establezca la Superintendencia del Medio Ambiente.*

*Las fuentes emisoras existentes tendrán un plazo de un año para instalar y validar el sistema de monitoreo continuo de emisiones, contado desde la fecha de entrada en vigencia del presente decreto. Las fuentes emisoras nuevas, en tanto, deberán incorporar el sistema de monitoreo continuo desde su entrada en operación. El sistema de monitoreo continuo de emisiones será aprobado mediante resolución fundada por la Superintendencia del Medio Ambiente.*

*Los valores límites de emisión para SO<sub>2</sub> en plantas de ácido se evaluarán sobre la base de promedios horarios que se deberán cumplir el 99% de las horas de funcionamiento. El 1% de las horas restantes comprende horas de encendido, apagado o posibles fallas.*

*Los datos que se obtengan del monitoreo continuo deberán estar en línea con los sistemas de información de la Superintendencia del Medio Ambiente y con la Seremi del Medio Ambiente que corresponda.*

*b) Para medir As y Hg en las plantas de ácido y en los hornos de limpieza de escoria, se debe utilizar el método CH-29 denominado "Determinación de emisión de metales desde fuentes fijas", aprobado por el Ministerio de Salud.*

*c) Para medir MP, en las chimeneas provenientes de los secadores, hornos de fusión, hornos de escoria, convertidores, unidades combinadas de fusión y conversión, hornos de refinación de ánodo, se debe utilizar el método CH-5 denominado "Determinación de las emisiones de partículas desde fuentes estacionarias", aprobado por el Ministerio de Salud.*

*Las fuentes emisoras existentes tendrán un plazo de 12 meses para el cumplimiento de lo dispuesto en las letras b) y c) de este artículo, contados desde la fecha de entrada en vigencia del presente decreto. Las fuentes emisoras nuevas, en tanto, deberán darles cumplimiento desde su entrada en operación.*

*Las mediciones en chimenea deben ser realizadas por entidades de inspección autorizadas por la Superintendencia del Medio Ambiente. De la misma forma, la Superintendencia podrá requerir que se informe en otros periodos y frecuencias sobre los mismos u otros contaminantes o parámetros de interés.*

*Lo dispuesto en este artículo es sin perjuicio de las atribuciones de la Superintendencia del Medio Ambiente, establecidas en el artículo 3º letra ñ) de su ley orgánica.*

### **8.7.3.3 Alternativa 3: actualizar límites y agregar fuentes fugitivas de propuesta US-EPA**

Además de los cambios presentados en la Alternativa 2, para esta alternativa es necesario declarar el método para medir las emisiones fugitivas de techo. En específico, también se tendría que modificar el Artículo 14º del Título III. A continuación, se expone el artículo propuesto:

*Artículo 14.- Metodologías de medición en chimenea: Las fuentes emisoras nuevas y existentes deben implementar las siguientes metodologías para verificar el cumplimiento de los límites máximos de emisión en chimenea:*

*a) Para medir SO<sub>2</sub> en las plantas de ácido, se debe implementar y validar un sistema de monitoreo continuo, de acuerdo a lo indicado en la Parte 75, volumen 40 del Código de Regulaciones Federales (CFR) de la Agencia Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) o aquel protocolo que establezca la Superintendencia del Medio Ambiente.*

*Las fuentes emisoras existentes tendrán un plazo de un año para instalar y validar el sistema de monitoreo continuo de emisiones, contado desde la fecha de entrada en vigencia del presente decreto. Las fuentes emisoras nuevas, en tanto, deberán incorporar el sistema de monitoreo continuo desde su entrada en operación. El sistema de monitoreo continuo de emisiones será aprobado mediante resolución fundada por la Superintendencia del Medio Ambiente.*

*Los valores límites de emisión para SO<sub>2</sub> en plantas de ácido se evaluarán sobre la base de promedios horarios que se deberán cumplir **el 99%** de las horas de funcionamiento. **El 1%** de las horas restantes comprende horas de encendido, apagado o posibles fallas.*

*Los datos que se obtengan del monitoreo continuo deberán estar en línea con los sistemas de información de la Superintendencia del Medio Ambiente y con la Seremi del Medio Ambiente que corresponda.*

*b) Para medir As y Hg en las plantas de ácido y en los hornos de limpieza de escoria, se debe utilizar el método CH-29 denominado "Determinación de emisión de metales desde fuentes fijas", aprobado por el Ministerio de Salud.*

c) Para medir MP, en las chimeneas provenientes de los secadores, hornos de fusión, hornos de escoria, convertidores, unidades combinadas de fusión y conversión, hornos de refinación de ánodo, y en los techos de los reactores, convertidores y hornos de refino, se debe utilizar el método CH-5 denominado "Determinación de las emisiones de partículas desde fuentes estacionarias", aprobado por el Ministerio de Salud.

Las fuentes emisoras existentes tendrán un plazo de 12 meses para el cumplimiento de lo dispuesto en las letras b) y c) de este artículo, contados desde la fecha de entrada en vigencia del presente decreto. Las fuentes emisoras nuevas, en tanto, deberán darles cumplimiento desde su entrada en operación.

Las mediciones en chimenea deben ser realizadas por entidades de inspección autorizadas por la Superintendencia del Medio Ambiente. De la misma forma, la Superintendencia podrá requerir que se informe en otros periodos y frecuencias sobre los mismos u otros contaminantes o parámetros de interés.

Lo dispuesto en este artículo es sin perjuicio de las atribuciones de la Superintendencia del Medio Ambiente, establecidas en el artículo 3º letra ñ) de su ley orgánica.

#### **8.7.4 Artículos sobre prácticas operacionales para reducir emisiones al aire**

Respecto del Título IV que establece prácticas operacionales, el único cambio propuesto está asociado a la obligación de utilizar sistemas de captura secundarios en los convertidores. Esta modificación se propone para las alternativas 2 y 3, e implicaría una adición al artículo 15 de la norma chilena, que se muestra a continuación. Sin perjuicio de lo anterior, se recomienda que los informes queden disponibles en un repositorio común, junto con los antecedentes de las comunicaciones con la SMA pertinentes. Asimismo, se recomienda poner a disposición de la ciudadanía los indicadores a ser reportados bajo el punto g) del artículo 16 de dicha norma, en los informes técnicos correspondientes consolidados para todas las fundiciones, para todos los meses desde la entrada en vigencia de la normativa.

##### **8.7.4.1 Alternativas 1, 2 y 3**

*Artículo 16.- Sobre los informes y sus plazos: Los titulares de las fuentes emisoras deberán remitir a la Superintendencia del Medio Ambiente y a la Seremi del Medio Ambiente correspondiente, informes mensuales que den cuenta sobre el cumplimiento de la presente norma y un informe anual que consolide la información del año calendario.*

*Los contenidos y el formato de presentación del informe mensual y anual serán establecidos por la Superintendencia del Medio Ambiente. Sin perjuicio de lo indicado, los informes se deberán presentar en papel y en medio electrónico, y deberán incluir a lo menos la siguiente información:*

- a) Resultados de los balances de masa mensual y del balance de masa anual cuando corresponda.*
- b) Medición en chimenea para cada contaminante de cada proceso regulado.*

- c) *Porcentaje de captura y fijación de SO<sub>2</sub> y As en base mensual y anual.*
- d) *Base de datos de las emisiones horarias de SO<sub>2</sub> expresadas en ppm, de cada planta de ácido.*
- e) *Base de datos de la producción de ácido en toneladas/hora.*
- f) *Emisiones de Hg medido en la o las chimeneas de las plantas de ácido y emisiones de MP dentro del límite del sistema de las fuentes existentes, en base mensual y anual.*
- g) *Los siguientes indicadores de desempeño ambiental en base mensual y anual:*
- *Kilogramos de SO<sub>2</sub> por tonelada de cobre fino (Kg/ton de Cu fino)*
  - *Kilogramos de SO<sub>2</sub> por tonelada de ácido sulfúrico al 100% (Kg/ton de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)*
  - *Gramos de As por tonelada de cobre fino (g/ton de Cu fino)*
  - *Kilogramos de CO<sub>2</sub> por tonelada de cobre fino (Kg/ton de Cu fino)*
- h) *Composición química del concentrado como promedio y máximo mensual, para los siguientes elementos: plomo, mercurio, cadmio y níquel.*
- i) *Tipo y consumo mensual de todos los combustibles fósiles utilizados dentro del límite del sistema.*
- j) *Registro mensual de las horas de operación de la fuente emisora y de las horas de operación, encendido y detención de cada proceso regulado.*
- k) *Registro de fechas de detección y reemplazo de mangas de los filtros de manga en un anexo del informe mensual respectivo.*
- l) *Registro de todo evento que implique la detención de algún equipo de control de emisiones al aire.*
- m) *En particular, el informe mensual del mes de enero de cada año debe incluir un diagrama de proceso y una descripción de todas las chimeneas dentro del límite del sistema. La descripción debe contener como mínimo:*
- *identificación de todos los procesos que evacuan parte o el total de sus emisiones por chimenea, identificando también estas últimas con sus coordenadas UTM (elipsoide WGS84), diámetro (m), altura (m), caudal (Nm<sup>3</sup>/h), temperatura (Celsius), presión (atm) y velocidad de los gases de salida (m/s). En caso de evacuar una parte de los gases emitidos por chimeneas utilizadas para esos fines, se debe describir en qué situaciones, y duración de este tipo de descargas.*
  - *consignar en el diagrama de proceso una identificación de todos los equipos de control de emisión de MP y SO<sub>2</sub> y de su eficiencia de remoción garantizada o indicada por el fabricante.*
  - *programa de mantenimiento y calendario de los principales equipos de proceso y de control, en particular: de las plantas de ácido, de los hornos de fusión, de los hornos de conversión, secadores, hornos de limpieza de escoria y de todos los equipos de control de emisiones.*
- n) *Emisiones de MP medido para cualquier combinación de chimeneas provenientes de los secadores, hornos de fusión, hornos de escoria, convertidores, unidades combinadas de fusión y conversión, hornos de refinación de ánodo, en base mensual y anual.*

*El titular de la fuente emisora remitirá el primer informe a partir de enero del año siguiente a la aprobación de la metodología específica de cada fuente emisora por parte de la Superintendencia del Medio Ambiente. Posteriormente, los informes mensuales se presentan dentro de los veintiún días del mes siguiente al período que se informa. Mientras que el informe anual, correspondiente al año calendario, se debe presentar junto al informe del mes de diciembre.*

### **8.7.1 Nuevo artículo sobre requerimientos tecnológicos**

Para consolidar las recomendaciones respecto de la exigencia de sistemas de captura secundaria en convertidores y la prohibición de convertidores en lotes para las nuevas fuentes, se propone generar un nuevo artículo con exigencias tecnológicas.

#### **TITULO V**

#### **Requerimientos tecnológicos**

**Artículo 17°. - Exigencias tecnológicas: Todas las fuentes emisoras deberán contar con un sistema de captación de gases secundarios en sus convertidores de cobre.**

**Artículo 18°. - Prohibiciones tecnológicas: Todas las fuentes emisoras nuevas tendrán prohibido utilizar convertidores en lotes (tipo batch) en sus instalaciones.**

## 9. Conclusiones

El presente estudio se desarrolló para dar cumplimiento al objetivo de entregar antecedentes para la revisión de la Norma de emisión para fundiciones de cobre y otras fuentes emisoras de arsénico. Para ello se identificaron, sistematizaron y analizaron antecedentes de las regulaciones internacionales existentes, del escenario de las fundiciones y otras fuentes en el contexto nacional e internacional, se identificaron potenciales tecnologías de abatimiento de los contaminantes y se estimó sus potenciales de mitigación. Lo anterior, se conjugó con un análisis de la evolución de la calidad del aire en las zonas afectadas por las emisiones de las fundiciones y otras fuentes de arsénico, así como una actualización de los efectos sobre la salud de estos contaminantes sobre la población. En base a todos los antecedentes anteriores se propusieron tres escenarios razonables de actualización de la actual norma.

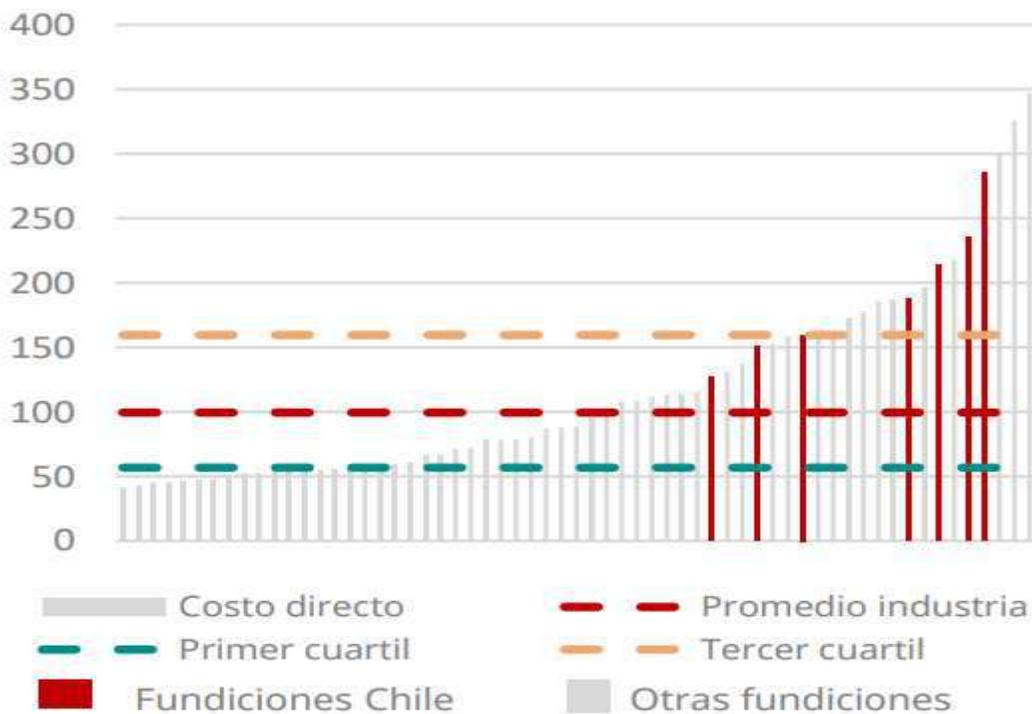
Respecto al actual **escenario de las fundiciones y otras fuentes emisoras de arsénico** chilenas, actualmente Chile es de los mayores productores de cobre desde fundiciones, alcanzando un 6% de la producción global (Ministerio de Minería, 2021). Esta producción se concentra en las siete fundiciones del país las cuales, por un lado, contribuyen con empleos y un amplio mercado de servicios complementarios, pero que también tienen externalidades negativas entre las cuales se destacan las emisiones de contaminantes con impactos dañinos sobre la salud de las comunidades, el patrimonio y ecosistemas. El aporte de cada fundición en términos de producción es diferente, observándose que las fundiciones más pequeñas tienen una capacidad de procesamiento en torno 400 mil toneladas al año (HVL y Ventanas), mientras que la de mayor capacidad (Caletones), alcanza 1,4 millones de toneladas anuales. Esta diferencia responde al diseño de cada una de las fundiciones, las cuales cuentan con importantes diferencias tecnológicas, tanto en el proceso de fusión y tratamiento de escorias, como en los sistemas de captura y abatimiento de las emisiones.

A las fundiciones se suma la planta de tostación de Ministro Hales como la única otra fuente emisora de arsénico según la definición de la Norma. La planta de tostación tiene una capacidad nominal de 550 mil toneladas de producción de calcinas, siendo una de las plantas de tostación de mayor tamaño del mundo. Sus calcinas, con un contenido de arsénico significativamente menor que los concentrados que procesa, son procesadas en fundiciones locales, especialmente en Chuquicamata, mientras que sus excedentes pueden ser exportados.

En el contexto internacional, Chile si bien se mantiene como uno de los principales fundidores de cobre, ha perdido participación respecto del mercado total, pasando desde cerca del 15% a principio de siglo a menos de 10% en los últimos años. Esta reducción se explica, por una parte, por la falta de inversión en nuevas fundiciones o en aumento de la capacidad de las actuales y, principalmente, por el aumento sostenido que ha tenido China en este mercado. Este estancamiento no ha sucedido en la producción de concentrados chilenos, donde se observa que el año 2020, más de dos tercios de la producción de concentrado no pasó por las fundiciones chilenas, mientras que en la década del 2000 este dato estaba entre un 50% y 60%, desde donde

ha aumentado de forma constante en los últimos años. A futuro, dado que se espera un crecimiento en la producción del concentrado de cobre mayor que el aumento en la producción de cobre refinado en el país, se espera que llegue hasta un 77% para el 2031 (COCHILCO, 2020). Esto a pesar de que se espera que aumente la producción de sulfuros de cobre en el país.

En parte, la falta de expansión de la capacidad de producción en fundiciones guarda relación con los altos costos de las fundiciones chilenas. En la Figura 9-1 se observa que los costos de todas las fundiciones chilenas superan la media global, con 4 de las 7 fundiciones teniendo costos que superan el tercer cuartil. Este efecto se podría explicar por mayores costos en mano de obra, energía, así como leyes de cobre más bajas, falta de inversión en nuevas tecnologías, entre otras.



**Figura 9-1 Costos directos de fundición (USD/t de concentrado), 2020**

Fuente: Anteproyecto PNM (Ministerio de Minería, 2021)

Respecto al desempeño ambiental, se observa que en comparación con la **regulación internacional** la situación chilena mejoró de forma significativa a partir de la publicación de la Norma de Emisión. A nivel internacional se observa que es común la aplicación de límites de emisión a las emisiones puntuales en las distintas chimeneas, principalmente en contaminantes asociados a la fundición de cobre como SO<sub>2</sub>, Arsénico, otros metales y MP. Se observa que la regulación chilena se diferencia al resto de las legislaciones al establecer límites de emisiones anuales diferenciados por fundición, lo cual recoge las distintas realidades de cada fundición, como la composición de los concentrados.

En este contexto, un análisis comparativo permite observar que la actual legislación se asemeja a la legislación de los Estados Unidos, incluyendo incluso otros límites como límite de emisiones anuales o exigencias respecto a las eficiencias de captura y fijación. Por otro lado, se observa que algunas exigencias de esta normativa no se encuentran en la actual norma de emisión, como la obligación de instalación de capturas secundarias en los convertidores o límites de emisión para estas emisiones secundarias. Asimismo, actualmente se encuentra en proceso una actualización de la norma de emisión para fundiciones en Estados Unidos (US-EPA, 2022), proceso que también se ha analizado, observándose la incorporación de nuevas exigencias como límites de emisión en los hornos de refino, o límites de emisión a las emisiones fugitivas.

En la Norma chilena se establecieron límites de emisión de contaminantes para distintos procesos unitarios, límites máximos de emisión anual de As y SO<sub>2</sub>, así como mínimos de eficiencia de captura y abatimiento de As y S. Junto con esto se establecieron las exigencias de monitoreo y reporte, asimismo se establecen las responsabilidades de la SMA como ente responsable por el control y fiscalización. De esta forma la Norma, estableció límites *eficientes*, en vista de los antecedentes disponibles a la fecha, delegando en los titulares de las fuentes emisoras la decisión de qué tecnologías o cambios procedimentales aplicar, sujeto a que cumplan con las exigencias.

Los límites comenzaron a aplicar con fechas diferenciadas en las fundiciones, con un primer grupo<sup>112</sup>, que ya contaba con plantas de ácido de doble contacto (más eficientes en el control de las emisiones de SO<sub>2</sub>), que debía dar cumplimiento a tres años de la publicación de la norma, es decir, en diciembre de 2016. Por su parte, el segundo grupo<sup>113</sup> debía cumplir con las exigencias dos años después que el primer grupo, es decir, diciembre de 2018. Es relevante considerar que hay fundiciones que aún no alcanzan una operación en régimen durante un período extenso, especialmente las fundiciones del segundo grupo, por lo que algunos de los resultados obtenidos del análisis de datos están influenciados y la calidad del aire podría empeorar al aumentar los niveles de procesamiento de algunas fundiciones como Chuquicamata o Potrerillos.

Desde la implementación de Norma de emisiones se han implementado diferentes medidas de mitigación de las emisiones, que han resultado en la reducción de las emisiones de los contaminantes lo cual se refleja en la **evolución de la calidad del aire** en las zonas en torno a la fundición. En la Tabla 9-1 se presenta un resumen de los cambios en las concentraciones observadas para localidades con población representativas de las diferentes zonas en torno a la población.

---

<sup>112</sup> Fundiciones Altonorte, Ventanas y Chagres.

<sup>113</sup> Fundiciones Chuquicamata, Potrerillos, HVL y Caletones

**Tabla 9-1 Variaciones de las concentraciones de calidad del aire entre antes y después de la norma**

Fundición	Localidad	As	SO2	MP
<b>Chuquicamata<sup>a</sup> + Planta de tostación Ministro Hales</b>	Calama	-81%	-88%	2%
<b>Altonorte<sup>b</sup></b>	La Negra	-4%	-77%	5%
<b>Potrerillos<sup>a</sup></b>	Salvador	-29%	-90%	-32%
<b>HVL<sup>a</sup></b>	Copiapó	119%	35%	-23%
<b>Ventanas<sup>b</sup></b>	Quintero	-43%	-24%	-5%
<b>Chagres<sup>b</sup></b>	Catemu	32%	-61%	-5%
<b>Caletones<sup>a</sup></b>	Coya	-68%	11%	-24%

a. La norma entró en vigor en diciembre de 2018 para estas fundiciones

b. La norma entró en vigor en diciembre de 2016 para estas fundiciones

Nota: La media pre-norma corresponde a la media de las concentraciones medias de los tres años anteriores al inicio de la norma.

Nota 2: La media post norma corresponde a la media de las concentraciones medias de los tres años posteriores al año siguiente del inicio de la norma.

Nota 3: Se privilegió las estaciones de monitoreo con EMRP y registros para los tres contaminantes. En caso de que ninguna cumpliera estas condiciones, se seleccionaron estaciones según su ubicación cercana a la población. En particular se consideró: Calama: CD 23 de Marzo, SML, CD 23 de Marzo; Altonorte: Inacal, La Negra, Inacal; Potrerillos: Cine Inca, CAP, Cine Inca; HVL: Paipote; Ventanas: Quintero; Chagres: Catemu; Caletones: Coya Población

Fuente: Elaboración propia

Se observa que, en cuanto al Arsénico, se tienen mejoras que incluso superan el 80% en el caso de Chuquicamata. Al respecto, cabe destacar que este valor se ve beneficiado por el extenso proceso de puesta en marcha de los cambios tecnológicos asociados a la Norma de emisión, que han implicado una menor producción, lo que resulta en una menor emisión y la consecuente mejora en la calidad del aire. De esta forma, se espera que el cambio final, si bien sea de una magnitud relevante, sea menor que el 80% registrado. Una situación similar ocurre con la fundición Potrerillos, con la salvedad de que su reducción de producción fue menor. En Ventanas y Caletones, se observan importantes mejoras en los niveles de arsénico asociado a las tecnologías implementadas. Por su parte en HVL y Catemu se observa un empeoramiento en la calidad del aire, ambos casos responden a años puntuales en que las concentraciones observadas fueron significativamente más altas que los otros años. En el caso de HVL, el año 2020 se observan concentraciones cuyas medias superan los años anteriores. Si bien, por problemas metodológicos no se cuenta con una estimación confiable de las emisiones por medio de balance de masa, una estimación por medio de la intensidad de emisiones arroja emisiones mayores a las emisiones observadas en los años anteriores, lo cual coincide con las concentraciones más altas observadas. En el caso del Chagres, se observa que el año 2018 se cuenta con concentración mayores de arsénico, las cuales no quedan explicadas por una mayor estimación de emisiones mayor, o por condiciones meteorológicas. Sin perjuicio de lo anterior, se observa que, en los años 2019 y 2020, se alcanzan concentraciones que se encuentran dentro del rango +5% respecto de las medias en el periodo pre-norma.

Respecto al SO<sub>2</sub>, se observan cambios relevantes en las condiciones en la mayoría de las zonas de estudio. Nuevamente vale la pena destacar que los resultados para Calama y Salvador se ven beneficiados por emisiones anormalmente bajas debido a una menor producción durante el periodo de ajuste tras los cambios tecnológicos implementados para dar cumplimiento a la

Norma de emisión. Por su parte, se observan empeoramientos de la calidad del aire tanto en Copiapó como en Caletones. En el caso de Copiapó, se observa que consistentemente todas las estaciones de la zona dan cuenta de un deterioro de la calidad del aire asociado al SO<sub>2</sub>, lo cual podría responder a un posible aumento de las emisiones en línea con la hipótesis de aumento de emisiones de arsénico. Por su parte, en el caso de Caletones, se observa que las concentraciones aumentan levemente y que al comparar con otras estaciones en las zonas se observan situaciones con una mejora en el rango de 40%-60%. Dado lo anterior, el aumento podría considerarse como un efecto puntual en la estación seleccionada (Coya Población) ya sea por un efecto meteorológico o durante el proceso de medición.

Respecto a las variaciones del MP, se observa que sólo algunas fundiciones presentan cambios más allá del rango +/-10%. Lo anterior ocurre dado que, a diferencia del caso del As y el SO<sub>2</sub>, existe una amplia variedad de fuentes de emisión de MP<sub>10</sub> con emisiones significativas que afectan las concentraciones observadas. Es de interés la comparación entre el As y el MP, pues el arsénico es una fracción del MP, y se esperaría que, de no haber otras fuentes con efecto relevante, ambos indicadores tuvieran una magnitud similar. Este es justamente el caso que se observa en Potrerillos, donde ambos indicadores dan cuenta de una reducción en torno al 30% de las concentraciones de contaminantes en la zona. Bajo esta lógica, se podría suponer que la situación en las zonas donde se observa una reducción de arsénico podría ser peor en términos de concentraciones de MP de no haber habido una norma de emisión.

Vale la pena considerar que la proyección tendencial, apunta a un aumento de las emisiones de las fundiciones en la medida que aumenta la producción esperada. Este aumento de la producción no se reparte de forma homogénea entre las diferentes fundiciones, sino que se concentra en aquellas fundiciones que en los últimos años han operado con una capacidad reducida. De esta forma, se espera que los aumentos de emisiones sean principalmente en las zonas de Calama y Salvador, resultando en un aumento de las concentraciones de estos contaminantes en dichas zonas. Aun así, se espera una mejora calidad del aire significativa respecto de la situación base, con variaciones entre -40% y -50% para Calama en As y SO<sub>2</sub>, y en torno a -25% y -80% para As y SO<sub>2</sub> en Salvador.

Estas variaciones en la calidad del aire tienen impactos sobre los riesgos en salud de la población. En esta línea, se actualizó la **información disponible respecto de los efectos adversos de los contaminantes y sus metodologías de estimación**. Para esto se revisaron antecedentes desde el 2011, asociados a los impactos de los contaminantes regulados por la norma de emisión sobre la salud humana. En los artículos revisados, se observa que la evidencia ha robustecido la relación entre la exposición a los contaminantes y efectos ya conocidos, y en la misma línea, se han estimado nuevos coeficientes de riesgos. Dentro de los efectos sobre la salud humana, se destacan aumento del riesgo de muertes prematuras (MP, SO<sub>2</sub>), aumento del riesgo incremental de cáncer (As, MP), aumento de casos de morbilidad por causas respiratorias (MP, SO<sub>2</sub>, Hg), aumento de morbilidad por causas cardíacas (MP) y efectos sobre el sistema nervioso (Hg).

Como una forma de contribuir con antecedentes locales, se optó por estimar los beneficios unitarios para la reducción de una tonelada de cada uno de los contaminantes. Estos beneficios unitarios, se ven influenciados por dos factores: los efectos valorizados y la población expuesta. El primero de estos factores, tiene el principal efecto sobre los beneficios unitarios y da cuenta de la diferencia entre los contaminantes y su impacto en el riesgo de impacto a la salud humana. De esta forma, mientras el MP tiene múltiples efectos valorizados, siendo el de mayor magnitud la mortalidad prematura, los otros contaminantes tienen limitados efectos valorizados. Por ejemplo, si bien el arsénico se asocia a un aumento en el riesgo de cáncer, para los niveles de concentración atmosféricas observados los beneficios son acotados en magnitud. En lo anterior, influye también la falta de metodologías que permitan una valorización de otros efectos sobre la salud y el medio ambiente, por ejemplo, de la deposición de arsénico atmosféricos sobre suelos, alimentos y agua, lo cual a su vez impacta la salud humana. El segundo factor, la población expuesta, explica en parte la diferencia observada entre las localidades, dado que el número de personas expuestas en cada localidad varía de forma considerable. Es importante discutir, que, si bien la reducción de una tonelada de contaminante podría tener una variación mayor en el riesgo individual de la población, al multiplicarla por el número de la población, podría resultar que los beneficios totales sean menores.

Respecto a los resultados, estos están limitados por la disponibilidad de información. En particular, información respecto a los FEC para los distintos contaminantes es una información a la que los resultados son sensibles y que en algunos casos no se encuentra disponible. Si bien el presente estudio consideraba una propuesta para los FEC para arsénico, la aproximación de los demás contaminantes depende de la disponibilidad de información en estudios disponibles en las zonas. De estos antecedentes se observó que la mayor brecha de información se asociaba a los FEC asociados al SO<sub>2</sub>. En este contexto, sólo se encontraron antecedentes para el FEC que aproximan la contribución de las emisiones de SO<sub>2</sub> en las concentraciones observadas de MP2,5 sólo para las zonas en torno a Chuquicamata y Ventanas. Dado que los efectos cuantificados del MP2,5 sobre la salud humana son más y con mayores costos sociales que los de concentraciones de SO<sub>2</sub>, cerrar esta brecha de información permitiría contar con resultados más robustos del real beneficio de reducir las emisiones de SO<sub>2</sub>.

Junto con la estimación de los beneficios se identificaron 12 **medidas de mitigación** con posibles impactos en la reducción de emisiones en algunas de las fuentes emisoras de arsénico. Estas medidas se concentran en la captura y tratamiento de emisiones fugitivas que, de acuerdo a las estimaciones hechas por proceso unitario, corresponden a la mayor parte de las emisiones de este tipo de fuentes. La excepción a esto corresponde a la planta de tostación de Ministro Hales, donde por la naturaleza del tostador, las emisiones fugitivas son marginales. La identificación de las medidas de mitigación se realizó siguiendo las prácticas utilizadas por la US-EPA, es decir, primero se identificaron medidas de mitigación implementadas en las distintas fundiciones durante la última década, y se complementó con otras opciones de mitigación consideradas en estudios internacionales.

El enfoque anterior tiene la ventaja de priorizar medidas probadas en el contexto local, además de permitir la recopilación de antecedentes de costos basados en la experiencia local. Respecto a la revisión de nuevas medidas, se destaca que, en el proceso de la nueva propuesta para la norma de emisión de fundiciones en Estados Unidos, se recabaron múltiples antecedentes, los cuales fueron revisados para identificar el estado del arte en cuanto a posibles técnicas de mitigación. Los costos de este tipo de medidas también provienen de estos antecedentes, por lo que es posible que haya algunas diferencias con la realidad nacional.

Para las medidas identificadas se simuló su aplicación de forma de estimar potenciales de reducción, así como recabar antecedentes respecto de sus costos. Al respecto cabe destacar que, en este tipo de ejercicios, se busca aproximar los costos y eficiencias, mientras que en la práctica la realidad de cada una de las fundiciones es particular y compleja. En este sentido lo que se busca es dar antecedentes de los parámetros que influyen en la eficacia de las medidas, sin pretender entregar una estimación exacta para lo cual se requieren estudios de ingeniería de detalle, y acceso a datos logísticos y operacionales que son propiedad de cada una de las fundiciones.

En vista de lo anterior, se consideraron **tres escenarios regulatorios** crecientes en ambición para la actualización de la norma de emisión. Estos escenarios consideran, por un lado, soluciones a algunas de las problemáticas identificadas, y por otro, opciones para avanzar en la protección de la salud humana y del medio ambiente. Si bien en los escenarios, los cuales se resumen en la Sección 8.6 se presentan como un conjunto de medidas, cabe destacar que muchas de ellas son independientes y podrían ser abordadas por separado. De esta forma, es posible seleccionar elementos de los diferentes escenarios para dar forma a nuevos escenarios regulatorios.

Adicionalmente a las mejoras necesarias en cuanto a la implementación de la metodología de los balances de masa en los casos con emisiones negativas, así como las recomendaciones en pos de robustecer la transparencia para la ciudadanía, las propuestas para la revisión de las normas de emisión son:

- Ajuste de los actuales límites de emisión para procesos unitarios (secadores, hornos de escoria, plantas de ácido), de forma de garantizar que se mantengan sus niveles actuales de sobre cumplimiento.
- Nuevo límite de emisión para chimenea de plantas de ácido existentes (Hg), en línea con los valores reportados por las fundiciones.
- Revisión de los límites anuales de emisiones de arsénico, separando en límites anuales, verificables a partir de la suma de los balances mensuales (sin considerar material de limpieza) y límites trianuales, a partir de la suma de los balances anuales (considerando material de limpieza). Lo anterior para considerar de mejor forma el efecto significativo que tiene el material de limpieza en aquellas fundiciones con mantenciones con una frecuencia no anual.

- Nuevos límites de emisión para hornos de refinación (MP), en lugar de límites de opacidad, en línea con lo actualmente considerado en la nueva propuesta de la norma de emisión de EEUU (US-EPA, 2022).
- Aumentar el número de horas que se debe cumplir con los límites establecidos de SO<sub>2</sub> en plantas de ácido, acercándose a la nueva propuesta de la norma de emisión de EEUU (US-EPA, 2022), en donde se exige su cumplimiento en todo momento.
- Obligación de reportar todas las emisiones que salgan de chimenas de los procesos relevantes y obligación de generar un plan de acción cuando se supere el 80% de la norma en ciertos procesos.
- Establecer límites para las emisiones de sistemas de captura y tratamiento secundarios, así como establecer la obligación de captura de estos flujos en los CPS.
- Límite de tasa de emisión de material particulado para emisiones fugitivas, en línea con lo propuesto por la nueva propuesta de la norma de emisión de EEUU (US-EPA, 2022), como una forma de controlar las emisiones de componentes tóxicos como arsénico y mercurio.
- Prohibición de convertidores por lotes (tipo *batch*) en nuevas fundiciones, una que restricción que se encuentra vigente en Estados Unidos para todas las fundiciones construidas después de 1998 (US-EPA, 2002a).
- Agregar un límite de MP10 en los reactores de fusión de las fuentes nuevas y a nivel de sistema para cada proceso relevante.

Considerando todos los antecedentes anteriores, se valora la actual Norma de emisión como un instrumento que llevó a una actualización de los sistemas de captura y tratamiento de las emisiones producidas por las fundiciones de cobre y otras fuentes emisoras de arsénico. Estas fuentes emisoras se diferencian de otras fuentes emisoras, por una intensa liberación de contaminantes como el SO<sub>2</sub> y As, las cuales ocurren como parte del proceso de las fundiciones. Los concentrados tratados en las fundiciones traen estos contaminantes, y se observan diferencias relevantes entre los concentrados tratados en las diferentes fuentes, en particular para el Arsénico. De esta forma se observa que mientras los concentrados tratados en la planta de tostación de Ministro Hales cuentan con concentraciones promedio cercanas a 6%, desde HVL hacia el sur tratan concentrados con contenidos promedios de arsénico menor a 0,15%.

Las distintas realidades de las fuentes de arsénico fueron integradas en la actual normativa, diferenciando límites anuales de emisión que consideran características de los concentrados como las capacidades de producción, mientras que al mismo tiempo se establecen criterios de uniformes respecto al desempeño tecnológico de las fundiciones. Esto último se refleja tanto en las exigencias respecto a la eficiencia de captura y fijación, como los límites a las fuentes puntuales establecidos entre los artículos 4° a 8°.

Estas limitaciones han sido exitosas, lo que se ha reflejado en una mejora de la calidad del aire durante el periodo de tiempo analizado en 6 de las 7 fundiciones. En el caso particular de HVL ha empeorado la calidad del aire en As y SO<sub>2</sub>, ambos contaminantes relacionados con la operación

de la fundición HVL, particularmente durante el año 2020, donde se observan los peores valores de Arsénico de la serie analizada (2010-2020). Esto se agrava con la falta de información respecto de las emisiones estimadas por medio de balances de masa, dado que la metodología específica para la fundición no cumple con los estándares de la SMA.

Adicionalmente, la Norma ha disponibilizado un alto volumen de información que viene a complementar la información que estaba disponible al momento de realizar la primera norma. Además de los balances de masa, la Norma ha permitido el reporte de los parámetros incluidos en el balance de masa, los resultados de CEMS, mediciones isocinéticas y análisis de los concentrados. Asimismo, durante el desarrollo del presente estudio esta información pudo ser complementada por los titulares quienes brindaron antecedentes que fueron considerados en la confección de este estudio.

Considerando lo anterior, los escenarios normativos vienen a dar cuenta de los espacios de mejora observados considerando la actual operación de las fuentes emisoras de arsénico, así como la comparación de la regulación nacional con la internacional. De la misma forma, se observan espacios para avanzar en la estandarización de la información, de forma de facilitar la comparación entre las fundiciones y disponibilizar información para el público, como una forma de robustecer la transparencia del proceso.

Dentro de las limitaciones del análisis por falta de información, ya mencionadas anteriormente, se destaca el hecho de que para 4 de las 7 fundiciones las exigencias entraron en obligación en su totalidad a partir de diciembre del 2018. De esta forma, se cuenta con una serie de tiempo acotada, con datos de operación tras la implementación en la totalidad de las medidas implementadas, parte de la cual se superpone con procesos de puesta en marcha de las mismas medidas. En este sentido, si bien en el presente informe se utilizó la mejor información disponible para el equipo consultor, es posible que las condiciones futuras de operación en régimen sean diferentes a las descritas en el presente informe. Sin perjuicio de lo anterior, se espera que los cambios en términos unitarios sean de una magnitud menor.

## 10. Referencias

- Agencia de Sostenibilidad Energética. (2015). Fundición. Retrieved from <https://www.energiaenmineria.cl/procesos/fundicion/>
- AGS. (2006). TRGS 900 “Arbeitsplatzgrenzwerte.” Retrieved from <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-900.html>
- AGS. (2016). Die Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 905). Retrieved from [https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-905.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-905.pdf?__blob=publicationFile)
- AngloAmerican. (2021). Antecedentes para proceso de revisión Decreto Supremo 28 de 2013 que establece Norma de Emisión para fundaciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico.
- Arancibia Cruz, A., Aros Meneses, H., & Olgún Contreras, G. (2008). Mejoramiento proceso de limpieza de escoria en Fundición de Concentrado Chuquicamata. Retrieved from [http://opac.pucv.cl/pucv\\_txt/txt-8500/UCI8576\\_01.pdf](http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-8500/UCI8576_01.pdf)
- ASQIQ. (2006). Announcement No.49 of the ASQIQ, the Ministry of Commerce, the State Env. Protection Administration Releasing the Content Ceilings of Arsenic and other Harmful Elements in of Arsenic and other Harmful Elements in Imported Copper Concentrats [Expired]. Retrieved from <http://www.lawinfochina.com/display.aspx?lib=law&id=9478&CGid=&EncodingName=big5>
- Banco Mundial. (1998). Pollution prevention and abatement handbook. <https://doi.org/10.1596/0-8213-3638-x>
- Benites, J., & Ivannia, M. (2016). PREFACTIBILIDAD TÉCNICA CARGUÍO HORNO FUNDICIÓN CODELCO VENTANAS. Retrieved from <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/43723/3560901063964UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Botta, B. E., & Yamasaki, S. (2020). POLICIES , REGULATORY FRAMEWORK AND ENFORCEMENT FOR AIR QUALITY MANAGEMENT : THE CASE OF JAPAN – ENVIRONMENT WORKING PAPER N ° 156. Retrieved from [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/WKP\(2020\)3&docLanguage=En](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/WKP(2020)3&docLanguage=En)
- Bundesrat. (2002). Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes–Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft). <https://doi.org/10.1155/2013/704806>
- Bundesrat. (2020). Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes–Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft). Retrieved from [https://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2020/0701-0800/767-20.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2020/0701-0800/767-20.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- Cerón Amigo, S. (2019). DESARROLLO DE MODELO DE COSTOS DE OPERACIÓN DE LA LÍNEA DE PROCESAMIENTO FUNDICIÓN Y REFINERÍA DEL COBRE PARA EVALUACIÓN ECONÓMICA. Retrieved from <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/171015/Desarrollo->

- de-modelo-de-costos-de-operación-de-la-línea-de-procesamiento-fundición-y-refinería.pdf?sequence=1
- Cochilco. (2017). Sulfuros primarios: desafíos y oportunidades. *Registro Propiedad Intelectual N° 2833439, DEPP 17/20*, 1–40. Retrieved from [https://www.cochilco.cl/ListadoTemtico/sulfuros-primarios\\_desafíos-y-oportunidades.pdf](https://www.cochilco.cl/ListadoTemtico/sulfuros-primarios_desafíos-y-oportunidades.pdf)
- Cochilco. (2021). *Proyección de la producción de cobre en Chile 2021-2032*.
- COCHILCO. (2015). Tecnologías en fundiciones de cobre. *Cochilco*.
- COCHILCO. (2017). Copper concentrates: smelting technologies update and cucons market. Retrieved from <https://www.cochilco.cl/Presentaciones-Ingls/Copper-Concentrates-2017.pdf>
- COCHILCO. (2020). *Proyección de la producción de cobre en Chile 2020 – 2031*.
- COCHILCO. (2021). Exportación de concentrados de cobre: caracterización de condiciones comerciales. Retrieved from <https://www.cochilco.cl/Mercado-de-Metales/2021-06-02-Exportación-de-concentrados-de-cobre-Caracterización-de-condiciones-comerciales.pdf>
- CODELCO. (2017). Nueva planta de gases de cola de Codelco Ventanas logra reducir un 64% sus emisiones en dióxido de azufre. Retrieved from [https://www.codelco.com/nueva-planta-de-gases-de-cola-de-codelco-ventanas-logra-reducir-un-64/prontus\\_codelco/2017-07-06/154605.html](https://www.codelco.com/nueva-planta-de-gases-de-cola-de-codelco-ventanas-logra-reducir-un-64/prontus_codelco/2017-07-06/154605.html)
- CODELCO. (2019). FUNDICIÓN “Recién salido del horno” (CODELCO Educa). Retrieved from [https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005205/fundicion\\_media\\_t\\_cnico\\_060119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005205/fundicion_media_t_cnico_060119.pdf)
- CODELCO. (2020a). INFORME DE MUESTREO ISOCINÉTICO DE MATERIAL PARTICULADO (CH 5). CODELCO CHILE, División El Teniente FUNDICIÓN CALETONES. Retrieved from <https://ssa.sma.gob.cl/Documento/Descargar/307928>
- CODELCO. (2020b). *Propuesta metodológica de estimación de emisiones de material particulado solicitado en DS n°105/2018 del Ministerio de Medio Ambiente*.
- CODELCO. (2021a). Antecedentes generales para el proceso de revisión de la norma de emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico contenida en el DS28 de 2013 del MMA.
- CODELCO. (2021b). *Informe anual de material particulado año 2020*.
- Comisión Europea. (2008). REGLAMENTO (CE) 1272/2008 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 16 de diciembre de 2008 sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008R1272&from=FR>
- COPRIM. (2012). *Evaluación de costos de escenarios regulatorios para una norma de emisión de fundiciones de cobre*.
- Coursol, P., Mackey, P. J., Kapusta, J. P. T., & Valencia, N. C. (2015). Energy consumption in copper smelting: A new Asian horse in the race. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1380-1>
- Csavina, J., Field, J., Taylor, M. P., Gao, S., Landázuri, A., Betterton, E. A., & Sáez, A. E. (2012). A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations. *Science of the Total Environment*, 433(July), 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.013>
- Cullen, W. R. (2014). Chemical mechanism of arsenic biomethylation. *Chemical Research in*

- Toxicology*, 27(4), 457–461. <https://doi.org/10.1021/tx400441h>
- Díaz Marinovic, J. (2012). Cinética de conversión de mata de cobre y distribución de impurezas en lecho empacado.
- EMEP/EEA. (2019a). 2.C.7.a Copper production. In *Air pollutant emissio inventory guidebook 2019* (pp. 1–22).
- EMEP/EEA. (2019b). Air Pollutant Emission Inventory Guidebook Guidebook 2019 (1.A.3.b ). *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019*, 8(9), 1–58. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Environment Canada. (2006). Code de pratiques écologiques pour les fonderies et affineries de métaux communs. Retrieved from [https://www.canada.ca/content/dam/eccc/migration/main/lcpe-cepa/documents/codes/famc-bmsr/famc-bmsr\\_fra.pdf](https://www.canada.ca/content/dam/eccc/migration/main/lcpe-cepa/documents/codes/famc-bmsr/famc-bmsr_fra.pdf)
- Environment Canada. (2015). Rapport d'étape 2015 : Planification de la prévention de la pollution par les fonderies et affineries de métaux communs et les usines de traitement du zinc.
- Environmental Council of Zambia. (1997). Air Pollution Control (Licensing and Emission Standards) Regulations. Third Schedule (Regulation 4). Retrieved from <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/zam48235.pdf>
- EPA. (1998). Particulate Matter Controls - Chapter 1: Baghouses and Filters.
- European Commission-JRC. (2017). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries - Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)*. *Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and contro*. Retrieved from [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/NFM/JRC107041\\_NFM\\_bref2017.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/NFM/JRC107041_NFM_bref2017.pdf)
- Fastmarkets. (2019). China launches official consultation on stricter arsenic threshold for copper conc imports. Retrieved from <https://www.metalbulletin.com/Article/3888286/China-launches-official-consultation-on-stricter-arsenic-threshold-for-copper-conc-imports.html>
- Fischhoff, B., & Furby, L. (1988). Measuring values: A conceptual framework for interpreting transactions with special reference to contingent valuation of visibility. *Journal of Risk and Uncertainty* 1988 1:2, 1(2), 147–184. <https://doi.org/10.1007/BF00056166>
- Fonderie Horne. (2019). *Plan d'action pour la réduction des émissions atmosphériques. Mesures supplémentaires à court et long terme visant à réduire*. Retrieved from [https://www.fonderiehorne.ca/fr/Documents/Plan\\_action\\_Fonderie\\_Horne\\_VF-20191215.pdf](https://www.fonderiehorne.ca/fr/Documents/Plan_action_Fonderie_Horne_VF-20191215.pdf)
- Fundación Chile. (2015). Desde el cobre a la innovación. Roadmap Tecnológico 2015-2035.
- García-Aleix, J. R., Delgado-Saborit, J. M., Verdú-Martín, G., Amigó-Descarrega, J. M., & Esteve-Cano, V. (2014). Trends in arsenic levels in PM10 and PM2.5 aerosol fractions in an industrialized area. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(1), 695–703. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1950-0>
- GEOAIRE. (2012). Informe Final Evaluación de Beneficios de una Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre, (09), 2–107.
- Glad, J. A., Brink, L. L., Talbott, E. O., Lee, P. C., Xu, X., Saul, M., & Rager, J. (2012). The relationship of ambient ozone and PM2.5 levels and asthma emergency department visits: Possible influence of gender and ethnicity. *Archives of Environmental and Occupational Health*,

- 67(2), 103–108. <https://doi.org/10.1080/19338244.2011.598888>
- Government of Canada. (1999). Canadian Environmental Protection Act. Retrieved from <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/C-15.31/index.html>
- Government of Canada. (2007). L'arsenic et ses composés - LSIP1 (ARCHIVÉE). Retrieved from <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/sante-environnement-milieu-travail/rapports-publications/contaminants-environnementaux/loi-canadienne-protection-environnement-liste-substances-interet-prioritaire-rapport-evaluation-arsenic-composes.html>
- Government of Canada. (2013). Guidance Document for Reporting of Releases from the Base Metals Smelting Sector (Archivado). Retrieved from <https://ec.gc.ca/planp2-p2plan/default.asp?lang=En&n=C9E1176A-BDF5-4F51-BF26>
- Government of Canada. (2021). Liste des substances toxiques : annexe 1 (Dernière mise à jour de l'annexe 1, le 12 mai 2021). Retrieved from <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/registre-environnemental-loi-canadienne-protection/listes-substances/toxiques/annexe-1.html>
- Government of Quebec. (1979). Clean Air Regulation (RAA). Environment Quality Act (última actualización: abril 2021). Retrieved from <http://legisquebec.gouv.qc.ca/en/showdoc/cr/q-2,r.4.1>
- GreenLab. (2018). Estudio de metodologías para la evaluación de normas de calidad y complemento a estimación de beneficios en salud derivados de la contaminación atmosférica.
- GreenLab. (2020). *Actualización de tasas de incidencia base de mortalidad y morbilidad para contaminación atmosférica y creación de un modelo automático para la actualización*. Retrieved from <http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=8484a611-8fa9-4695-acea-c847e7b828c0&fname=200221-ATICA2-InformeFinal.pdf&access=public>
- Guarda, N. (2015). *Efecto del enfriamiento controlado del consumo de energía y la recuperación de valiosos en el procesamiento de escorias de fusión de cobre*. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.bpj.2015.06.056><https://academic.oup.com/bioinformatics/article-abstract/34/13/2201/4852827><http://semisupervised-3254828305/semisupervised.ppt><http://dx.doi.org/10.1016/j.str.2013.02.005><http://dx.doi.org/10.1016/j.str.2013.02.005>
- Hg. Toxicology details: (2021). In Micromedex (Columbia Basin College Library ed.) [Electronic version].micromedex.pdf. (n.d.).
- Hong, Y. S., Song, K. H., & Chung, J. Y. (2014). Health effects of chronic arsenic exposure. *Journal of Preventive Medicine and Public Health*, 47(5), 245–252. <https://doi.org/10.3961/jpmph.14.035>
- Huang, R., Pan, H., Zhou, M., Jin, J., Ju, Z., Ren, G., ... Chen, X. (2021). Potential liver damage due to co-exposure to As, Cd, and Pb in mining areas: Association analysis and research trends from a Chinese perspective. *Environmental Research*, 201(June), 111598. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111598>
- IARC. (2012). Arsenic, Metals, Fibers and Dusts, Vol 100 C, A review of human carcinogens. *IARC Monographs*, 100(Arsenic, metals, fibres, and dusts), 407–443. Retrieved from

- <https://www.iarc.fr/>
- INE. (2019). *Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos 2019*. Retrieved from [https://geoarchivos.ine.cl/File/pub/Cd\\_Pb\\_Al\\_Cs\\_2019.pdf](https://geoarchivos.ine.cl/File/pub/Cd_Pb_Al_Cs_2019.pdf)
- International Copper Study Group. (2021). *The World Copper Factbook 2021*. Retrieved from [http://www.icsg.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=2&Itemid=78](http://www.icsg.org/index.php?option=com_content&task=view&id=2&Itemid=78)
- Jomova, K., Jenisova, Z., Feszterova, M., Baros, S., Liska, J., Hudecova, D., ... Valko, M. (2011). Arsenic: Toxicity, oxidative stress and human disease. *Journal of Applied Toxicology*, 31(2), 95–107. <https://doi.org/10.1002/jat.1649>
- JRC. (2017). Best Available Techniques ( BAT ) Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries. Retrieved from [https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-01/JRC107041\\_NFM\\_bref2017.pdf](https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-01/JRC107041_NFM_bref2017.pdf)
- Kloog, I., Coull, B. A., Zanobetti, A., Koutrakis, P., & Schwartz, J. D. (2012). Acute and chronic effects of particles on hospital admissions in New-England. *PLoS ONE*, 7(4), 2–9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034664>
- Krewski, D., Jerrett, M., Burnett, R. T., Ma, R., Hughes, E., Shi, Y., ... Tempalski, B. (2009). Extended follow-up and spatial analysis of the American Cancer Society study linking particulate air pollution and mortality. *Health Effects Institute*, (140). Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19627030>
- Lagos, G., Peters, D., Salas, J. C., Parra, R., & Pérez, V. (2021). Análisis económico de las cadenas globales de valor y suministro del cobre refinado en países. *Comisión Económica Para América Latina y El Caribe (CEPAL)*.
- Lane, D. J., Cook, N. J., Grano, S. R., & Ehrig, K. (2016). Selective leaching of penalty elements from copper concentrates: A review. *Minerals Engineering*, 98, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.08.006>
- Larouche, P. (2001). Minor Elements in Copper Smelting and Electrorefining. Retrieved from [https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=TC-QMM-33978&op=pdf&app=Library&oclc\\_number=898141121](https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=TC-QMM-33978&op=pdf&app=Library&oclc_number=898141121)
- Lepeule, J., Laden, F., Dockery, D., & Schwartz, J. (2012). Chronic exposure to fine particles and mortality: An extended follow-up of the Harvard six cities study from 1974 to 2009. *Environmental Health Perspectives*, 120(7), 965–970. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104660>
- Lewis, A. S., Reid, K. R., Pollock, M. C., & Campleman, S. L. (2012). Speciated arsenic in air: Measurement methodology and risk assessment considerations. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 62(1), 2–17. <https://doi.org/10.1080/10473289.2011.608620>
- Mackey, T. S., Hart, J. S., & Hart, J. S. (1993). A Comparison of U.S. and Japanese Environmental Laws Governing Emissions from Major Industrial Facilities. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/303904369.pdf>
- Maggs, R. (2000). A Review of Arsenic in Ambient Air in the UK. Retrieved from <https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/empire/arsenic00/arsenic.htm>
- Mar, T. F., Koenig, J. Q., & Primomo, J. (2010). Associations between asthma emergency visits and particulate matter sources, including diesel emissions from stationary generators in Tacoma, Washington. *Inhalation Toxicology*, 22(6), 445–448. <https://doi.org/10.3109/08958370903575774>

- Martin, R., Dowling, K., Pearce, D., Sillitoe, J., & Florentine, S. (2014). Health effects associated with inhalation of airborne arsenic arising from mining operations. *Geosciences (Switzerland)*, 4(3), 128–175. <https://doi.org/10.3390/geosciences4030128>
- MCH. (2019). Fundiciones chilenas: Mal negocio o necesidad estratégica. Retrieved from <https://www.mch.cl/columnas/fundiciones-chilenas-mal-negocio-necesidad-estrategica/>
- MDDELCC. (2014). Guide d'application du Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (chapitre Q-2, r 4.1), Québec. Retrieved from <https://www.environnement.gouv.qc.ca/air/atmosphere/RAA-guide-application.pdf>
- MDDELCC. (2016). *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales – Cahier 4 – Échantillonnage des émissions atmosphériques en provenance de sources fixes* (Vol. 2015). Retrieved from [https://www.ceaeq.gouv.qc.ca/documents/publications/echantillonnage/emiss\\_atm\\_fixes\\_C4.pdf](https://www.ceaeq.gouv.qc.ca/documents/publications/echantillonnage/emiss_atm_fixes_C4.pdf)
- MDDELCC. (2018). Orientations et références techniques pour la deuxième attestation d'assainissement. Retrieved from <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/programmes/prri/index.htm>.
- MEP. (2009). HJ 540-2009 Ambient air and waste gas. Determination of arsenic. Silver diethyldithiocarbamate spectrophotometric method. Retrieved from <https://www.chinesestandard.net/Related.aspx/HJ540-2009>
- MEP. (2010). Emission standard of pollutants for copper, nickel, cobalt industry. Retrieved from [https://english.mee.gov.cn/Resources/standards/Air\\_Environment/Emission\\_standard1/201102/t20110212\\_200602.shtml](https://english.mee.gov.cn/Resources/standards/Air_Environment/Emission_standard1/201102/t20110212_200602.shtml)
- MEP. (2016). HJ 540-2016 (HJ540-2016) Stationary source emission - Determination of arsenic-Silver diethyldithiocarbamate spectrophotometric method. Retrieved from <https://www.chinesestandard.net/Related.aspx/HJ540-2016>
- MHLW, & MLIT. (2017). Regulation for Enforcement of the Air Pollution Control Act (enmienda del año 2017). Retrieved from <http://www.japaneselawtranslation.go.jp/law/detail/?id=3563&vm=04&re=02>
- Ministerio de Minería. (2021). Anteproyecto Minería 2050: Política Nacional Minera.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, E. (n.d.). Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. Retrieved from <https://prtr-es.es/Dioxinas-y-Furanos-PCDDPCDF,15634,11,2007.html>
- Ministry of the Environment. (1968). Air Pollution Control Act (Japan). Retrieved from <http://www.japaneselawtranslation.go.jp/law/detail/?id=3561&vm=02&re=>
- MMA. (2013a). Decreto 28- Establece Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico.
- MMA. (2013b). *Guía Metodológica para la elaboración de un análisis general de impacto económico y social (AGIES) para instrumentos de gestión de calidad del aire*.
- MoE. (1998a). Regulatory Measures against Air Pollutants Emitted from Factories and Business Sites and the Outline of Regulation. Retrieved from <https://www.env.go.jp/en/air/qa/air.html>
- MoE. (1998b). Regulatory Measures against Air Pollutants Emitted from Factories and Business Sites and the Outline of Regulation - Emission Standards for Toxic Substances. Retrieved

- from <https://www.env.go.jp/en/air/aq/air/air5.html>
- MoE. (1998c). Regulatory Measures against Air Pollutants Emitted from Factories and Business Sites and the Outline of Regulation - K-value Regulation for Sulfur Oxides. Retrieved from [https://www.env.go.jp/en/air/aq/air/air3\\_table.html](https://www.env.go.jp/en/air/aq/air/air3_table.html)
- MoE. (2016). Modification on Air Pollution Control Act, entry into force of Mercury emission regulation. Retrieved from [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/WKP\(2020\)3&docLanguage=En](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/WKP(2020)3&docLanguage=En)
- Moolgavkar, S. H. (2000). Air pollution and hospital admissions for diseases of the circulatory system in three U.S. Metropolitan areas. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 50(7), 1199–1206. <https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464162>
- Ni. Toxicology details: (2021). In Micromedex (Columbia Basin College Library ed.) [Electronic version].micromedex.pdf. (n.d.).
- NO2. Toxicology details: (2021). In Micromedex (Columbia Basin College Library ed.) [Electronic version].micromedex.pdf. (n.d.).
- OECD. (1999). The Use of Voluntary Approaches in Japan - An Initial Survey. Retrieved from [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?doclanguage=en&cote=ENV/EPOC/GEEI\(98\)28/final](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?doclanguage=en&cote=ENV/EPOC/GEEI(98)28/final)
- Ostro, B. D. (1987). Air pollution and morbidity revisited: A specification test. *Journal of Environmental Economics and Management*, 14(1), 87–98.
- Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea. (2010). Directiva 2010/75/UE, sobre las emisiones industriales. *Diario Oficial de La Unión Europea*. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0075>
- Pb. Toxicology details: (2021). In Micromedex (Columbia Basin College Library ed.) [Electronic version].micromedex.pdf. (n.d.).
- Pérez, K., Toro, N., Gálvez, E., Robles, P., Wilson, R., & Navarra, A. (2021). Environmental, economic and technological factors affecting Chilean copper smelters – A critical review. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.007>
- PNUMA. (2013). Convenio de Minamata sobre el Mercurio. Retrieved from <https://www.mercuryconvention.org/en>
- Ponce, M. A., Oyaneder, R. V., & Pastén, P. S. (2018). Desarrollo De Una Estrategia De Mantenimiento Que Permita Elaborar Un Plan De Mantenimiento Para Equipos De Planta De Tratamiento De Gases De Proyecto Normativo En Planta De Fundición De Cobre Según Aplicación Del Ds 28/2013. Retrieved from <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/47411/3560900259612UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sanchez-Rodas, D., Sanchez De La Campa, A., Oliveira, V., & De La Rosa, J. (2012). Health implications of the distribution of arsenic species in airborne particulate matter. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 108, 112–114. <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2011.11.023>
- Saxena, P., & Sonwani, S. (2019). *Criteria Air Pollutants and their Impact on Environmental Health*. *Criteria Air Pollutants and their Impact on Environmental Health*. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-9992-3>

- Schwartz, J., Zanobetti, A., & Bateson, T. (2003). Morbidity and mortality among elderly residents of cities with daily PM measurements. *Revised Analyses of Time-Series Studies of Air Pollution and Health*, 25–58.
- Shandong Tianli Energy Co. (n.d.). Secador Rotatorio. Retrieved from [https://es.tianlienergy.com/product/PRODUCTS\\_63697/Rotary\\_Dryer.html](https://es.tianlienergy.com/product/PRODUCTS_63697/Rotary_Dryer.html)
- Sheppard, L. (2003). Ambient Air Pollution and Nonelderly Asthma Hospital Admissions in Seattle, Washington, 1987-1994. In: *Revised Analyses of Time-Series Studies of Air Pollution and Health*. Health Effects Institute: Boston, 227–230.
- Slaughter, J. C., Kim, E., Sheppard, L., Sullivan, J. H., Larson, T. V., & Claiborn, C. (2005). Association between particulate matter and emergency room visits, hospital admissions and mortality in Spokane, Washington. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 15(2), 153–159. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500382>
- SMA. (2015). RE 694- Protocolo para validación de metodologías para balance de masa de arsénico y azufre en fuentes emisoras de acuerdo al DS 28/2013 MMA.
- SO2. Toxicology details: (2021). In Micromedex (Columbia Basin College Library ed.) [Electronic version].micromedex.pdf. (n.d.).
- Suter II, G. W. (2016). Ecological Risk Assessment. <https://doi.org/10.1201/9781420012569>
- Theloke, J., Kummer, U., Nitter, S., Fegtle, T., & Friedrich, R. (2008). Überarbeitung der Schwermetallkapitel im CORINAIR Guidebook zur Verbesserung der Emissionsinventare und der Berichterstattung im Rahmen der Genfer Luftreinhaltkonvention Forschungsprojekt, (April), 149.
- Thomas, D. J. (2021). Arsenic methylation – Lessons from three decades of research. *Toxicology*, 457(April), 152800. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2021.152800>
- Universidad de Chile. (2010). *Antecedentes Técnicos y Económicos Para Elaborar una Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre*. Departamento de Ingeniería de Minas .
- US-EPA. (n.d.). Health Effects Notebook for Hazardous Air Pollutants. Retrieved from <https://www.epa.gov/haps/health-effects-notebook-hazardous-air-pollutants>
- US-EPA. (1976). Subpart P — Standards of Performance for Primary Copper. Retrieved from <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/part-60/subpart-P>
- US-EPA. (1984). Health assessment document for inorganic arsenic. *United States Environmental Protection Agency*.
- US-EPA. (1986). 40 CFR 61 National Emission Standards For Hazardous Air Pollutants; Standards For Inorganic Arsenic (Subpart O).
- US-EPA. (1987). EPA’s Emission Standards for Low-Arsenic Primary Copper Smelters. Retrieved from <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/9100J627.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1986+Thru+1990&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=>
- US-EPA. (1993). Visible Emissions EPA Methods Field Manual. Retrieved from <https://www3.epa.gov/ttnemc01/methods/VEFieldManual.pdf>
- US-EPA. (1995). Primary Copper Smelting. *AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors Volume I: Stationary Point and Area Sources*. Retrieved from

- <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch12/final/c12s03.pdf>
- US-EPA. (2002a). 40 CFR 63 National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Primary Copper Smelting. Final Rule. Retrieved from <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2002-06-12/pdf/02-12773.pdf#page=1>
- US-EPA. (2002b). Subpart QQQ — National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Primary Copper, 37–61.
- US-EPA. (2007). Subpart EEEEE — National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants (NESHAP) for Primary Copper Smelting Area Sources (última modificación: 2015). Retrieved from <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2015-title40-vol15/pdf/CFR-2015-title40-vol15-part63-subpartEEEEEE.pdf>
- US-EPA. (2013). 42 U.S.C. Sec. 7412 - Hazardous air pollutants. Retrieved from <https://www.govinfo.gov/content/pkg/USCODE-2013-title42/html/USCODE-2013-title42-chap85-subchapl-partA-sec7412.htm>
- US-EPA. (2020). Method 5 - Particulate Matter (PM). Retrieved from <https://www.epa.gov/emc/method-5-particulate-matter-pm>
- US-EPA. (2021a). List of Designated Reference and Equivalent Methods. Retrieved from [https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/designated\\_reference\\_and\\_equivalent\\_methods.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/designated_reference_and_equivalent_methods.pdf)
- US-EPA. (2021b). Residual Risk Assessment for the Primary Copper Smelting Source Category in Support of the 2021 Risk and Technology Residual Risk Assessment for the Primary Copper Smelting Source Category in Support of the 2021 Risk and Technology Review Proposed Rule, (February).
- US-EPA. (2022). National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants: Primary Copper Smelting Residual Risk and Technology Review and Primary Copper Smelting Area Source Technology Review (Proposed rule). Retrieved from <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OAR-2020-0430-0001>
- US-EPA, & French, C. (2020). *Evaluation of Beyond-the-floor and Ample Margin of Safety Control Options and Costs for Process Fugitive Emissions from Smelting Furnaces and Converters, and for Point Source Emissions from Anode Refining Furnaces and for the Combined Emissions S*. Retrieved from <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OAR-2020-0430-0060>
- US-EPA, & Jones, D. L. (2019). *Ample Margin of Safety Analysis for Point Sources in the II&S Industry*. Retrieved from <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OAR-2020-0430-0052>
- US-EPA, & Laney, M. (2021). Technology Review for the Primary Copper Smelting Source Category, 1–23.
- US Department of Energy. (2013). Energy and Environmental Profile of the U.S. Mining Industry. (5) Copper. Retrieved from <https://www.energy.gov/sites/default/files/2013/11/f4/copper.pdf>
- US Department of Health and Human Services. (n.d.). Agency for Toxic Substances and Disease Registry.
- USGS. (2000). Copper Statistics and Information. Annual Publications. Copper. “2002” (Excel File with years 1998 to 2002). Retrieved from <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals->

- information-center/copper-statistics-and-information
- USGS. (2002). Copper smelter locations and characteristics. Map and table of world copper smelters (Excel "CSTable"). Retrieved from <https://data.doi.gov/dataset/map-and-table-of-world-copper-smelters>
- USGS. (2010). Copper Statistics and Information. Annual Publications. Copper "2010 " (Excel file with years 2006 to 2010). Retrieved from <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/copper-statistics-and-information>
- USGS. (2018). Copper Statistics and Information. Annual Publications. Copper "2018 tables-only release". (Excel file with years 2014 to 2018). Retrieved from <https://www.usgs.gov/centers/nmic/copper-statistics-and-information>
- USGS. (2021a). Map and table of world copper smelters. Retrieved from <https://data.doi.gov/dataset/map-and-table-of-world-copper-smelters>
- USGS. (2021b). *Mineral Commodity Summaries 2021: U.S. Geological Survey*. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>
- V. Toxicology details: (2021). In Micromedex (Columbia Basin College Library ed.) [Electronic version].micromedex.pdf. (n.d.).
- Valdés, C. (2021). Minería y cambio climático: Conoce los desafíos y el importante rol que enfrenta la industria nacional. Retrieved from <https://www.emol.com/noticias/Tendencias/2021/08/31/1031300/summit-mineria-fundacion-chile.html>
- Vallejos, J. P. P., & Olivares, J. M. (2017). Problemática de las fundiciones de cobre en Chile y Lean management como metodología de gestión. Retrieved from <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/145188/Problemática-de-las-fundiciones-de-cobre-en-Chile-y-Lean-Management-como-metodología-de-gestión.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- WHO. (2000a). *Air Quality Guidelines* (Second Edi).
- WHO. (2000b). Air Quality Guidelines for Europe. Retrieved from <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107335>
- WHO. (2006). Air Quality Guidelines. Global update 2005. <https://doi.org/10.1007/BF02986808>
- WHO. (2021). WHO global air quality guidelines. Retrieved from <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>
- Wilson, A. M., Wake, C. P., Kelly, T., & Salloway, J. C. (2005). Air pollution, weather, and respiratory emergency room visits in two northern New England cities: an ecological time-series study. *Environmental Research*, 97(3), 312–321. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2004.07.010>
- Zanobetti, A., Franklin, M., Koutrakis, P., & Schwartz, J. (2009). Fine particulate air pollution and its components in association with cause-specific emergency admissions. *Environmental Health : A Global Access Science Source*, 8, 58. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-8-58>
- Zhang L. et al. (2020). Global impact of atmospheric arsenic on health risk: 2005 to 2015. Retrieved from <https://www.pnas.org/content/117/25/13975>
- Zhao, B., Cui, Z., & Wang, Z. (n.d.). A New Copper Smelting Technology - Bottom Blown Oxygen Furnace Developed at Dongying Fangyuan Nonferrous Metals. Retrieved from <https://books.google.cl/books?hl=fr&lr=&id=EVbaDhyYx5MC&oi=fnd&pg=PA3&ots=ZcOsA>

\_BVOp&sig=jKmv4HUO9LwzYtLzAvns34WTpig&redir\_esc=y#v=onepage&q&f=false  
Zhou, F., Xie, J., Zhang, S., Yin, G., Gao, Y., Zhang, Y., ... Fan, G. (2018). Lead, cadmium, arsenic, and mercury combined exposure disrupted synaptic homeostasis through activating the Snk-SPAR pathway. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 163(July), 674–684. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.116>

## 11. Anexos

### 11.1 Anexo 1: Resultados de investigaciones científicas sobre efectos adversos del arsénico

#### 11.1.1 Resumen de resultados de investigaciones científicas sobre efectos adversos a las personas o a los recursos naturales para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico

A continuación, se presenta un resumen de cada una de las publicaciones clasificadas por tema. (Tabla 11-1) En los anexos digitales<sup>114</sup> se encuentra el detalle de las publicaciones (título, DOI).

**Tabla 11-1 Resumen del número de publicaciones por temas**

Tema	Número de publicaciones
Evaluación de riesgos	28
Reviews	25
Estudios genéticos	8
Monitoreo biológico	8
Cáncer	6
Neurotoxicidad	5
Toxicidad	4
Exposición prenatal	4
Sistema inmunológico	4
Sistema cardiovascular	2
Reproducción	3
Evaluación función hepática	2
Sistema endocrino	2
Otros efectos	2
Tecnología de mitigación	1

Fuente: Elaboración propia

#### 11.1.2 Evaluaciones de riesgos

1.- Zhang et al, 2020 determinaron la distribución del As a nivel global a través de un inventario de las emisiones de As atmosférico a nivel global, con el cual estimaron el riesgo de cáncer en la población de diferentes países, encontrando que para 2005, las concentraciones más altas de arsénico en el aire se encontraron en Chile y el este de China.

2.- Kenessary et al, 2019 evaluaron el grado de contaminación del aire de Kazajstán y definieron los niveles de riesgo para la salud de la población. El monitoreo del aire ambiental se llevó a cabo

<sup>114</sup> Anexo F – Revisión Efectos Post 2011

en 26 ciudades. Los resultados indicaron que se han determinado niveles inaceptables de riesgo carcinogénico para grupos profesionales y toda la población por la exposición al As entre otros contaminantes.

3.- Francová et al, 2020 analizaron muestras de suelo y material particulado obtenidas de la región altamente industrializada para la evaluación de la toxicidad de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, As. Utilizaron pruebas in vitro que simulaban fluidos gástricos y pulmonares para evaluar el riesgo de exposición para los seres humanos. Se pudo reconocer el riesgo potencial para el grupo de edad observado (niños de 3 años), particularmente en los casos de As, Pb y Cd tanto para la exposición oral como por inhalación. El arsénico mostró una alta bioaccesibilidad, ingesta diaria y alta concentración en el material particulado.

4.- Jiřík et al, 2016 recopilaron todos los datos disponibles sobre la contaminación del aire en Ostrava y realizaron una evaluación de los riesgos para la salud resultantes de exposiciones históricas a contaminantes del aire. Se utilizaron todas las fuentes de información disponibles y para la evaluación de riesgos para la salud se empleó la relación entre la exposición y los efectos biológicos de los contaminantes publicados por la OMS y la US-EPA. Durante el período estudiado, las concentraciones medias anuales de arsénico, no posicionaron al metaloide como el mayor contribuyente al riesgo cancerígeno.

5.- Mrazovac et al, 2020 determinaron la concentración, distribución espacial y riesgos para la salud humana de As, Cd, Pb y Ni en MP10 en una cuenca minera y de fundición. Las evaluaciones de riesgo para la salud no cancerígenas calculadas mostraron que la ingestión era la vía de exposición principal para los oligoelementos analizados. Se encontró que los riesgos no cancerígenos y cancerígenos en niños y adultos en el área de minería y fundición se encuentran dentro de rangos aceptables.

6.- Candeias et al, 2020 recogieron muestras de polvo de carreteras de calles representativas (suburbanas y urbanas) de la ciudad de Viana do Castelo, Portugal. Algunos de los resultados muestran que el arsénico en la calle suburbana representa un riesgo para la salud humana de  $1.58 \times 10^{-4}$ .

7.- Aynul et al, 2016 llevaron a cabo una investigación de las concentraciones ambientales, las fuentes y el riesgo potencial para la salud humana de los contaminantes atmosféricos peligrosos (HAP) o tóxicos del aire en la ciudad de Edmonton durante un período de cinco a cinco años. Los valores de riesgo carcinogénico y las emisiones de la industria de metales estuvieron por encima del nivel aceptable de la USEPA ( $1 \times 10^{-6}$ ), pero por debajo de un riesgo tolerable ( $1 \times 10^{-4}$ ) y el punto de referencia ( $1 \times 10^{-5}$ ).

8.- Wang et al, 2018 investigaron las características espacio-temporales y los riesgos para la salud humana de 12 metales pesados (Al, As, Be, Cd, Cr, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Se y Tl) en MP2.5 en la provincia de Zhejiang. Los riesgos no cancerígenos fueron bajos. Sin embargo, existían riesgos potenciales no cancerígenos de Tl, As y Sb para los niños y Tl para los adultos por exposición a la

ingestión. Los riesgos carcinogénicos de As, Be, Cd, Cr, Pb y Ni a través de la exposición por inhalación fueron menores que el nivel aceptable ( $1 \times 10^{-4}$ ) para niños y adultos.

9.- Teoldi et al, 2017 aplicaron un enfoque multidisciplinario para estimar los efectos adversos sobre la salud de los habitantes del norte de Italia. Los análisis químicos cuantificaron los niveles en el aire de metales, dioxinas, PCB, HAP y algunos macro contaminantes, incluidas las partículas totales, finas y gruesas en el aire. Estos resultados se utilizaron como insumo para la evaluación de riesgos para la salud y se utilizaron bioensayos in vitro para evaluar los posibles efectos adversos en el tracto respiratorio debido a los contaminantes orgánicos adsorbidos en el material particulado en el aire. Se identificaron alertas críticas de los niveles de arsénico, níquel, benceno, partículas finas y gruesas encontradas en la zona investigada, que pueden inducir efectos adversos graves en la salud humana. Estos hallazgos se confirmaron mediante bioensayos con células. También se evaluó la carcinogenicidad de los extractos orgánicos de las partículas recolectadas como una herramienta innovadora para establecer los posibles efectos crónicos de los contaminantes inhalados.

10.- Sun et al, 2017 mediante el análisis de 55 muestras de polvo de calles obtenidas de un sector industrial de China, evaluaron los posibles efectos cancerígenos y no cancerígenos en la salud de niños y adultos debido a la exposición al polvo de la calle. De acuerdo con el método del Cociente de Riesgo (HQ), la ingestión de partículas de polvo representa un riesgo primario para niños y adultos, seguido del contacto dérmico y la inhalación de todos los metales investigados excepto el Hg, para los cuales la inhalación de su vapor elemental constituye un riesgo ligeramente mayor que ingestión. En el caso de los niños, la exposición a Pb, As, Cd, Cr, Hg y Sb se consideró como los que más contribuyen a los riesgos para la salud no relacionados con el cáncer, mientras que As y Cr representan un mayor riesgo de cáncer para los niños. En el caso de los adultos, los valores de los indicadores de riesgo para los efectos cancerosos y no cancerosos obtenidos se encontraban dentro del umbral de seguridad. En comparación con otros lugares dentro y fuera de China, la exposición al arsénico es prominente para la población, lo que indica que se debe tomar más atención y acciones preventivas.

11.- Sun et al, 2014 recolectaron las partículas suspendidas totales (TSP) y las partículas finas (MP2.5) en verano e invierno para evaluar el fraccionamiento y los riesgos para la salud humana asociados con el As y los metales pesados (Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cr, Cd y Mn). Los contenidos de los elementos en TSP y MP2.5 variaron mucho con la temporada. Basado en el procedimiento de extracción secuencial, la distribución elemental en TSP y MP2.5 difiere dramáticamente. Fracciones lábiles y biodisponibles de Zn, Pb, El As y el Cu en las partículas atmosféricas fueron más del 60%. Sobre la base de las fracciones biodisponibles, los riesgos cancerígenos provienen principalmente de la ingestión de Pb en MP2.5. Para el riesgo no cancerígeno, la acumulación de elementos múltiples por inhalación y/o exposición por ingestión puede afectar tanto a niños como a adultos, mientras que la ingestión de un solo elemento como As, Pb y Co puede representar riesgos para los niños.

12.- Rivas et al, 2015 evaluaron la contaminación del aire interior y exterior en 39 escuelas de Barcelona detectando altos niveles de partículas finas (MP2.5), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), carbono negro equivalente (EBC), concentración numérica de partículas ultrafinas (UFP) y metales traza relacionados con el tráfico en los patios de recreo de las escuelas y en ambientes interiores. El MP2.5 casi duplicó (factor de 1.7) los niveles habituales de fondo urbano (UB) reportados para Barcelona debido a las contribuciones de MP2.5 provenientes de la escuela secundaria. Los niveles de elementos minerales son inusualmente altos en MP2.5 debido a la descomposición de partículas minerales durante las actividades del patio de recreo. Además, los componentes antropogénicos del MP (como el OC y el arsénico) se depositan en seco / húmedo en esta materia mineral. Por lo tanto, MP2.5 no puede considerarse un buen trazador de emisiones de tráfico en las escuelas a pesar de estar influenciado por ellas. Los niveles en interiores de estos contaminantes provenientes del tráfico son muy similares a los detectados en exteriores, lo que indica una fácil penetración de los contaminantes atmosféricos.

13.- Das et al, 2020 estimaron la deposición de MP2.5 unido a metales peligrosos en diferentes órganos después de la inhalación de material particulado y para estimar los riesgos asociados. Se determinaron las fracciones bioaccesibles de tres metales cancerígenos asociados a MP (As, Pb y Cd) utilizando los valores de los metales en fluidos pulmonares simulados. Las deposiciones de metales en diferentes órganos se calcularon utilizando un modelo integrado que consta de modelos HRT y PBPK. El cálculo indicó que la deposición mayor o significativa de metal Pb se produce en tejidos, como huesos, músculos y sangre. La mayoría de las deposiciones de Cd ocurren en los pulmones mientras que la mayoría de las deposiciones de As ocurren en los pulmones, músculos y piel. La mayor parte de la deposición de metales estudiados se encontró en pulmón (45% para arsénico y 70% para cadmio de su contenido biodisuelto). Las exposiciones combinadas de MP2,5 y metales se encontró asociada a un índice de peligro basado en interacciones mayor que 1 durante varios meses del año, lo que indica una posibilidad de riesgo para la salud. Se observó un cociente de riesgo (HQ) <1 para la ingestión y las vías dérmicas, lo que indica que no hay motivo de preocupación. Los resultados indican la necesidad de realizar un seguimiento periódico y estimar las dosis de deposición y los riesgos de exposición de los metales asociados a las partículas en los pulmones y otros órganos para proteger la salud humana.

14.- Taati et al, 2021 Investigaron las concentraciones, variabilidad, fuentes y riesgo para la salud humana de los oligoelementos mediante la recolectaron de 38 muestras de polvo atmosférico alrededor del área industrial de Arak. Basado en el índice de acumulación geográfica (I geo), los oligoelementos se clasificaron entre niveles prácticamente no contaminados y niveles moderados de contaminación. El mapa de riesgo potencial (RI) mostró que aproximadamente el 86% del área de estudio para todos los elementos traza estaba en la clase de riesgo moderado. Los riesgos carcinogénicos de la exposición por inhalación a Cd, As, Ni y Co fueron más bajos que el límite de riesgo permisible que recomienda la EPA (10<sup>-6</sup>). Al excluir el As, el índice de peligro (HI) fue más bajo que el nivel seguro (HI <1) para todos los oligoelementos, mientras que los valores HQ de As para niños y adultos fueron 17,1 y 1,6, respectivamente, lo que indica un riesgo potencial para los niños.

15.- Sah et al, 2019 recolectaron muestras de MP2.5 de un área urbana cerca de una carretera nacional en Agra, India y se extrajeron secuencialmente en cuatro fracciones diferentes: soluble en agua (F1), reducible (F2), oxidable (F3) y fracción residual (F4) para fraccionamiento químico de arsénico (As), cadmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), níquel (Ni) y plomo (Pb). Los metales se analizaron mediante ICP/OES. Los resultados indicaron que Cd y Co tenían los índices de biodisponibilidad más altos. Con base en las fracciones biodisponibles, se evaluaron los riesgos cancerígenos y no cancerígenos a través de la exposición por inhalación para bebés, niños pequeños, niños, hombres y mujeres. El índice de peligro para los metales potencialmente tóxicos fue 2.50, que fue más alto que el límite de seguridad (1). Sin embargo, el riesgo carcinogénico combinado para bebés, niños pequeños, niños, hombres y mujeres fue marginalmente más alto que el criterio de precaución ( $10^{-6}$ ).

16.- Li et al, 2018 determinaron experimentalmente las concentraciones de 16 elementos en el polvo de la carretera de Changchun, China. Se recolectaron un total de 100 muestras y se analizaron por ICP-OES. La evaluación del nivel de contaminación calculada por el índice de geoacumulación mostró que el nivel de contaminación varió de no contaminado a contaminación extrema, mientras que los cálculos del factor de enriquecimiento (EF) mostraron que los valores de EF mostraron una tendencia decreciente: Cd > Hg > As > Pb > Cu > Co > Zn > Ni > Cr > V > Mn > Mg > Fe > Sr > Ba. La ingestión fue la mayor vía de exposición de los seres humanos a la ingesta de oligoelementos al calcular la dosis diaria promedio (ADD) de tres vías (ingestión, inhalación y contacto dérmico). Según los resultados de la evaluación de riesgos para la salud, los riesgos no cancerígenos fueron insignificantes al igual que el riesgo total de cáncer (ECR) también fue más bajo que el nivel aceptable ( $10^{-6}$  -  $10^{-4}$ ) tanto para adultos como para niños.

17.- Jumpponen et al, 2013 midieron la exposición múltiple de los trabajadores de mantenimiento y remoción de cenizas al polvo inhalable, metales y sílice cristalina durante sus tareas laborales en centrales eléctricas de biomasa. Los trabajadores estuvieron expuestos a altas concentraciones de polvo inhalable dentro de las calderas de biomasa. El riesgo para la salud asociado a la exposición más evidente de las exposiciones múltiples a metales fue el del cáncer, seguido de los trastornos del sistema nervioso central, la irritación del tracto respiratorio inferior y, finalmente, la irritación del tracto respiratorio superior.

18.- Cao et al, 2013 sobre la base de muestreos de campo y encuestas basadas en cuestionarios en la zona de plantas productoras de carbón más grande de China, evaluaron los riesgos para la salud de los niños y los niveles de exposición a As, Se y metales pesados (Pb, Cd, Cr, Ni, Co, Zn, Cu, Mn, V y Sb) en el agua, suelo, polvo, aire y alimentos. Se recolectaron y analizaron muestras de sangre humana para indicar los niveles de exposición. Los riesgos no cancerígenos para los niños se debieron principalmente a Cr, Mn, Pb, As y Sb, cuyos niveles eran de 3 a 10 veces superiores a los niveles aceptables ( $1,0 \times 10^{-6}$ ). Los riesgos carcinogénicos para los niños fueron de 30 a 200 veces más altos que el nivel seguro ( $1,0 \times 10^{-6}$  -  $1,0 \times 10^{-4}$ ), lo que podría atribuirse a la contaminación por Cr, As y Ni. Los riesgos estimados provienen principalmente de la vía que involucra la ingestión de alimentos producidos localmente, representando más del 85%

en total para la mayoría de los elementos. En el caso de As, las vías de exposición a la ingestión de alimentos y la inhalación de aire contribuyeron aproximadamente al 50%, respectivamente. Los altos riesgos de este estudio destacan la atención que se presta a la salud de los niños que viven en las proximidades de las actividades de producción de carbon y la importancia de las evaluaciones de riesgos para la salud de múltiples vías específicas del lugar y la seguridad alimentaria para proteger a los niños potencialmente expuestos.

19.- Cao et al, 2015 estudiaron 12 metales y metaloides (Pb, Cd, As, Cr, Zn, Cu, Ni, Mn, Co, Se, Sb, V), MP10, agua potable, alimentos, suelo y polvo interior en este estudio. Los riesgos acumulativos y agregados de estos entre los niños locales se evaluaron luego mediante un muestreo de campo y una encuesta por cuestionario. Los resultados mostraron que los ambientes estaban fuertemente contaminados. Para la mayoría de los metales (oides), la ingestión de alimentos representó más del 80% de la dosis de exposición diaria total. Los riesgos no cancerígenos fueron hasta 30 veces superiores al nivel aceptable debido a la ingestión de alimentos a través de Pb, Cr, Cu, Zn, As, Se, Cd y Sb, y la inhalación de MP10 a través de Cr y Mn. Mientras que, los riesgos de cáncer se atribuyeron principalmente al Cr a través de la ingestión de alimentos y al As a través de la ingestión de alimentos y polvo, y aproximadamente 100 veces el nivel máximo aceptable de  $1.0 \times 10^{-4}$ .

20.- Ma et al, 2019 estudiaron la bioaccesibilidad oral y los riesgos para la salud de los niños de los metales (oides) (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) en el suelo / polvo interior de escuelas y hogares de Lanzhou, China. Se aplicó el método de prueba de extracción de bioaccesibilidad simple para evaluar la bioaccesibilidad, y el riesgo para la salud de los niños se evaluó mediante índice de peligro y riesgo carcinogénico incremental de por vida. El contenido de metales (oides) y la bioaccesibilidad en las muestras de polvo en interiores fueron significativamente más altos que los de las muestras de suelo correspondientes ( $p < 0,05$ ). Ni los riesgos no cancerígenos ni cancerígenos excedieron el intervalo de tolerancia para niños. Ambos se atribuyeron principalmente a As y al polvo de interiores de la escuela considerando las fuentes. Por lo tanto, mantener el saneamiento interior sería una medida eficaz para reducir los posibles efectos en la salud de los niños del polvo interior.

21.- Du, et al, 2019 realizaron mediciones a largo plazo de oligoelementos unidos a MP2.5 desde el 2014 hasta 2015 en la ciudad urbana de Jinan, en China. Se utilizó un modelo de factorización matricial positiva (MPF) y una evaluación de riesgos para la salud para evaluar las fuentes y los riesgos para la salud de estos elementos, respectivamente. En comparación con la mayoría de las megaciudades chinas, había niveles más altos de arsénico, manganeso, plomo, cromo y zinc en esta ciudad. La combustión de carbón, la industria de la fundición, las emisiones de vehículos y el polvo del suelo se identificaron como las fuentes primarias de todos los elementos medidos. Los riesgos acumulativos no cancerígenos y cancerígenos de los elementos tóxicos excedieron los niveles de seguridad en 8-15 y 10-18 veces, respectivamente. El arsénico era el elemento crítico con mayor riesgo para la salud. La combustión de carbón causó el mayor riesgo entre las cuatro fuentes.

22.- Millan-Martínez et al, 2021 estudiaron los niveles de contaminantes gaseosos (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>) y MP10 en un complejo polígono industrial del suroeste de durante el período 1996-2017. Los resultados de la composición química de MP10 se caracterizan por altas concentraciones de los componentes de la corteza derivados de la resuspensión natural y local. El arsénico se encuentra como la principal anomalía geoquímica (media anual de 7 ng/m<sup>3</sup>), superando la meta anual europea de 6 ng/m<sup>3</sup>, lo que supone un riesgo para la población cercana. Se ha identificado una fuente de emisión de fundición de Cu en La Rábida y Huelva. Se ha descrito por primera vez en La Rábida una segunda fuente correspondiente a las emisiones por manipulación de sulfuros polimetálicos en una zona portuaria. Además, los resultados de la especiación de arsénico han identificado tres escenarios diferentes de impactos de As en función de la dirección del viento dominante, los episodios de SO<sub>2</sub> y la eficiencia de extracción de As: impacto de la fundición de Cu, impacto de los sulfuros polimetálicos a granel y un impacto mixto de ambos.

23.- Sánchez-Rodas et al, 2011 tomaron muestras de partículas en suspensión entre 2001 y 2008 en un emplazamiento urbano en el suroeste de España. Se encontró arsénico en las muestras debido a la presencia de una fundición de cobre cercana, a veces en concentraciones por encima del valor objetivo de 6 ng/m<sup>3</sup> propuesto por las regulaciones de la UE (media anual de 4.6 a 10.4 ng/m<sup>3</sup> As en MP10 y de 3,0 a 9,1 ng As ng/m<sup>3</sup> en MP2,5). Los resultados obtenidos mostraron que el arsénico se acumula preferentemente (70-80%) en las partículas de menor diámetro (MP2.5 versus MP10), lo que representa una amenaza para la salud humana debido a la mayor capacidad de las partículas más finas para ingresar al organismo a través del sistema respiratorio. Además, la toxicidad de las especies de arsénico inorgánico depende también del estado de oxidación, siendo el As (III) más tóxico que el As (V). El análisis de especiación realizado con Cromatografía Líquida de Alto Rendimiento-Generación de Hidruros-Espectrometría de Fluorescencia Atómica (HPLC-HG-AFS) con muestras recolectadas entre 2006 y 2008, mostró que As (V) representó la principal especie de arsénico, pero As (III) también fue encontrado en concentración significativa, que representa un 5-10% del contenido total de arsénico. Los resultados también indican que el As (III) más tóxico tiende a concentrarse preferentemente en la fracción más fina MP2.5 en comparación con el As (V), lo que representa un riesgo adicional para la salud de la población local.

24.- Sánchez de la Campa et al, 2011 consideraron una serie a largo plazo (2001-2008) de análisis químicos de material particulado atmosférico MP10 y MP2,5 recogido en la ciudad de España. El impacto de las columnas de emisión de una de las fundiciones de Cu más grandes del mundo sobre la calidad del aire en la ciudad de Huelva se evidencia por los altos niveles diarios y horarios de As, otros elementos potencialmente tóxicos (por ejemplo, Cu, Zn, Cd, Se, Bi y Pb) en material particulado, así como los altos niveles de algunos contaminantes gaseosos. Los niveles medios de arsénico en la fracción MP10 fueron más altos que el valor objetivo establecido por la Directiva europea 2004/107 / EC (6 ng/m<sup>3</sup> de As). Concentraciones máximas por hora de As y otros metales y elementos ( Zn, Cu, P y Se) analizados por PIXE pueden alcanzar niveles máximos por hora de hasta 326 ng/m<sup>3</sup> de As y otros metales.

25.- Parviainen et al, 2019 evaluaron las concentraciones de metales en líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en las áreas urbanas impactadas por la presencia industrial (una fundición de Cu, una planta de fertilizantes fosfatados, una planta de energía y refinerías de petróleo). Se analizaron los oligoelementos (V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, As, Cd, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Er, Tm, Yb, Lu, Pb, Th, U) usando espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente; y para los elementos principales (Ca, K, Mg, P y S) mediante espectrometría de emisión óptica de plasma acoplada inductivamente después de la digestión ácida. La composición metálica del bioindicador presenta patrones de distribución espacial con concentraciones extremadamente elevadas (Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sb, Ba, Pb, U y S) en los alrededores de los polígonos industriales a <1 km. Distancia. Se evidenció una correlación positiva entre el material particulado ambiental y en las fuentes de contaminación apunta a la fundición de Cu como la principal fuente de contaminación.

26.- García-Aleix et al, 2014 analizaron las concentraciones de material particulado y contenido de arsénico en MP10 y MP2.5 en un sector industrial de Europa durante los años 2005-2010. Las concentraciones de MP10 y su contenido de arsénico variaron de 27 a 46  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y de 0,7 a 6  $\text{ng}/\text{m}^3$  en el área industrial, respectivamente, y de 25 a 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y de 0,7 a 2,8  $\text{ng}/\text{m}^3$  en el área urbana, respectivamente. Las concentraciones de MP2.5 y su contenido de arsénico varían de 12 a 14  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y de 0.5 a 1.4  $\text{ng}/\text{m}^3$  en el área de fondo urbano, respectivamente. La mayor parte del contenido de arsénico está presente en la fracción fina, con relaciones de MP2.5 / MP10 en el rango de 0.65-0.87. El MP10, MP2.5 y su contenido de arsénico muestran una fuerte disminución en los últimos años asociada a la recesión económica, que afectó severamente la producción de materiales cerámicos en el área de estudio. La fuerte disminución de la producción debido a la crisis económica combinada con varias mejoras tecnológicas en los últimos años, como la sustitución del boro, que contiene impurezas de As como materia prima, han reducido las concentraciones de MP10, MP2.5 y As en el aire a tal punto que Actualmente cumple con la normativa europea existente.

27.- Huang et al, 2014 analizaron la contaminación de metales y metaloides (Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sn, Sb, Hg y Pb ) presentes en polvo de carretera y polvo de filtros de aire acondicionado en entornos urbanos interiores y exteriores de Guangzhou. Se descubrió que el zinc es el elemento más abundante en el polvo de las carreteras y en las MP2.5 doméstico, mientras que la concentración de Pb es la más alta en el polvo de los filtros de aire acondicionado. El factor de enriquecimiento (EF) se utilizó para evaluar la influencia de la actividad humana en la contaminación de metales y metaloides La ingestión y la inhalación fueron las dos vías de exposición aplicadas para la evaluación de riesgos. La prueba de extracción de base fisiológica (PBET) se utilizó para estimar las bioaccesibilidad oral de los elementos en el polvo de la carretera y del filtro de aire acondicionado. La fracción respiratoria bioaccesible de elementos en el MP2.5 doméstico se extrajo con una solución de simulación de pulmón. Los resultados mostraron que el polvo del filtro de aire acondicionado doméstico era más peligroso para la salud humana que el polvo de la carretera, especialmente para los niños. Se descubrió que el arsénico es el elemento más riesgoso según la evaluación de riesgos.

28.- Secrest et al, 2016 midieron las exposiciones de 24 horas en MP2.5 de 20 mujeres rurales en las provincias del norte y sur de China que usaban combustible sólido (como carbón o biomasa). Se terminó el potencial oxidativo de las exposiciones a MP2.5 utilizando ensayos acelulares (basados en ditiotreitól) y celulares (basados en macrófagos). Realizaron análisis factoriales y de correlación utilizando los componentes químicos de MP2.5 para identificar las fuentes de exposición a MP2.5 y sus marcadores químicos. Los resultados indicaron que las exposiciones promedio de las mujeres a MP2.5 fue de 249  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 83.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en Mongolia Interior y Sichuan, respectivamente. El polvo, la combustión de biomasa y la combustión de carbón se identificaron como las principales fuentes de exposición a MP2.5. Los marcadores de polvo (hierro, aluminio) se asociaron significativamente con el potencial oxidativo intrínseco, mientras que los marcadores de combustión de carbón (arsénico, azufre sin sulfato) y biomasa (carbón negro, cadmio) no se asociaron con el potencial oxidativo. Los autores concluyen que el polvo fue en gran parte responsable del potencial oxidativo intrínseco de la exposición a MP2.5 de las mujeres rurales chinas, mientras que la combustión de biomasa y carbón no se asociaron significativamente con el potencial oxidativo intrínseco.

### 11.1.3 Reviews

1.- Zimta et al, 2019 realizaron una revisión de la literatura sobre las alteraciones celulares y moleculares causadas por la exposición a As o Cd, centrándose en la transformación maligna de las células epiteliales normales después de una intoxicación prolongada con As y Cd. El cáncer de mama y de próstata son dos de las neoplasias malignas más comunes en todo el mundo. Ambos cánceres pueden convertirse en subtipos dependientes o independientes de hormonas y están asociados a la exposición ambiental en el contexto de una predisposición hereditaria. As y Cd se han relacionado con la aparición de ambos cánceres, con la excepción de As, que carece de una asociación definitiva con la carcinogénesis de mama. Los dos elementos ejercen un efecto opuesto que depende de la exposición aguda frente a la crónica. Se demostró que altas dosis de As o Cd inducen la muerte celular en la exposición experimental aguda, mientras que la exposición crónica desencadena la proliferación y la viabilidad celular, que ya no está limitada por el acortamiento de los telómeros y la apoptosis. Las células expuestas crónicamente también aumentan su capacidad de invasión y potencial tumorigénico. Este conocimiento podría potencialmente aumentar la conciencia pública sobre los riesgos para la salud que enfrenta la población humana que vive o trabaja en un ambiente contaminado y los fumadores. La exposición humana al As y Cd debe minimizarse tanto como sea posible. Las políticas de atención médica dirigidas a personas que pertenecen a estas categorías de riesgo deben incluir el análisis de: daño al ADN, estrés oxidativo, alteraciones moleculares y nivel sistémico de metales pesados y minerales esenciales.

2.- Abdul et al, 2015 realizaron una revisión en la que describieron los efectos del arsénico en el cuerpo humano con un enfoque principal en una variedad de sistemas de órganos con las respectivas enfermedades. Adicionalmente, También se han explorado los mecanismos subyacentes del desarrollo de enfermedades en cada sistema de órganos debido al arsénico.

Sorprendentemente, el arsénico ha podido inducir cambios epigenéticos (en el útero) y mutaciones genéticas (una de las principales causas de cáncer) en el cuerpo. También se discuten brevemente la aparición de varios efectos sobre la salud inducidos por el arsénico que involucran áreas emergentes como la epigenética y el cáncer, junto con sus respectivos mecanismos.

3.- Modabbernia et al, 2016 realizaron una revisión con el propósito de presentar una nueva hipótesis sobre la posible relación entre la exposición temprana a los metales y la psicosis. Revisaron las limitaciones de la investigación disponible y discutieron enfoques novedosos para superar las barreras metodológicas anteriores. Encontraron que los estudios mecanicistas sugieren una posible asociación entre el exceso de plomo, manganeso, cadmio, arsénico o cobre y deficiencia de zinc, y varias alteraciones bioquímicas relacionadas con la psicosis, como niveles alterados de neurotransmisores, excitotoxicidad e inflamación. Destacan los autores que la exposición al metal a menudo se midió después del desarrollo de la enfermedad y rara vez se determinó durante los períodos críticos de desarrollo y que la mayoría de los estudios no lograron describir el momento exacto de la exposición y el cambio en la exposición a lo largo del tiempo.

4.- Zheng et al, 2017 realizaron una revisión sistemática de los estudios epidemiológicos que evaluaron la asociación de exposiciones ambientales con medidas de función y enfermedad renal en poblaciones pediátricas. Se encontraron 50 estudios que cumplieron con los criterios de búsqueda y se incluyeron en la revisión. Las exposiciones ambientales revisadas incluyeron plomo, cadmio, mercurio, arsénico, fluoruro, aflatoxina, melamina, tabaco ambiental, bisfenol A, procedimientos dentales, ftalatos, ácido ferfluorooctanoico, triclosán y talio / uranio. La mayoría de los estudios evaluaron la exposición química ambiental a través de biomarcadores, pero cuatro estudios evaluaron la exposición a través de la proximidad a la fuente de emisión. Hubo evidencia mixta de asociación entre exposiciones a metales y otras exposiciones ambientales no metálicas y enfermedad renal pediátrica y otros biomarcadores de enfermedad renal. La evaluación de la causalidad se ve obstaculizada por el pequeño número de estudios para cada tipo de exposición ambiental, así como por la falta de calidad de los estudios y la limitada evidencia prospectiva. Los autores concluyen que necesario realizar estudios epidemiológicos bien diseñados de la exposición a sustancias químicas ambientales y los resultados de las enfermedades renales.

5.- Zhang et al, 2013 revisaron los datos publicados sobre longitud de telómeros (TL) en relación con la exposición ambiental y ocupacional a varios productos químicos. Las exposiciones ambientales y ocupacionales asociadas con TL más cortos incluyen la contaminación del aire relacionada con el tráfico (es decir, material particulado, carbón negro y benceno y tolueno), hidrocarburos aromáticos policíclicos, N-nitrosaminas, pesticidas, plomo, exposición en talleres mecánicos de automóviles y exposición a residuos peligrosos. El arsénico, los contaminantes orgánicos persistentes (COP) y la exposición a corto plazo a las partículas están asociados con una TL más prolongada. Los autores discutieron las posibles razones de las diferencias en los resultados, incluidos los problemas relacionados con el tiempo y la dosis, el diseño del estudio y los posibles mecanismos involucrados en la regulación de los telómeros.

6.- Roggenbeck et al, 2016 debido a que existe una considerable variabilidad interindividual en la susceptibilidad a enfermedades y toxicidad inducidas por el arsénico, y las razones de tales diferencias no se comprenden completamente, a través de su revisión muestran las proteínas de membrana (incluidos los transportadores de fosfato, los canales de acuagliceroporina, las proteínas portadoras de solutos y los transportadores de casetes de unión a ATP) que se ha demostrado experimentalmente contribuyen al paso de especies de arsénico inorgánico, metilado y/o glutatiónilado a través de las membranas celulares. Además, describen lo que se sabe sobre los transportadores de arsénico en órganos involucrados en la absorción, distribución y metabolismo y cómo las vías de transporte contribuyen a la eliminación del arsénico.

7.- Khazaei et al, 2020 realizaron una revisión para sintetizar los factores ambientales y ecológicos de la incidencia y la mortalidad del cáncer de estómago. Los resultados de 34 artículos revisados revelaron que la exposición al arsénico del suelo, el carbón y otras instalaciones mineras a rajo abierto, vivir cerca de incineradores e instalaciones para la recuperación o disposición de residuos peligrosos, instalaciones para la producción de cemento, cal, yeso y óxido de magnesio, la proximidad a fuentes de la industria del metal, el hierro en la dieta, el asbesto ingerido, la agricultura, el arsénico en el suelo, la altitud, los organoclorados y la exposición ambiental al cadmio y al plomo tienen asociaciones positivas con la incidencia de cáncer de estómago o la muerte. La mayoría de los factores ecológicos y ambientales, como vivir cerca de las industrias mineras, la eliminación de desechos peligrosos, las fuentes de la industria del metal y la exposición ambiental al cadmio y al plomo están relacionadas positivamente con la mortalidad y la incidencia de cáncer de estómago. Sin embargo, los rayos UV-B solares, el índice de calor y el zinc de la dieta pueden tenerse en cuenta como factores protectores contra la mortalidad y la incidencia de cáncer de estómago.

8.- Suvarapu et al, 2017 revisaron la determinación de metales pesados en la atmósfera en diferentes áreas del mundo desde 2006. Los resultados mostraron que la mayoría de los investigadores se concentraron en metales tóxicos, como Cr, Cd, Ni, As y plomo. Algunos estudios utilizaron materiales vegetales como bio monitores de los niveles atmosféricos de metales pesados. Algunos Investigadores encontraron altas concentraciones de metales pesados alrededor de las áreas industriales en comparación con las áreas residenciales y / o comerciales. La mayoría de los estudios informaron que las principales fuentes de material particulado y metales pesados en la atmósfera son las emisiones industriales, las emisiones vehiculares y los aerosoles secundarios.

9.- Yager et al, 2015 realizaron una búsqueda de la literatura para respaldar la evaluación de la contribución de las cenizas volantes de alimentos y carbón a la exposición al As inorgánico. Se encontraron pocos estudios que investigaran la biodisponibilidad asociada con cenizas de carbón que contienen As o partículas que contienen As en el aire; La biodisponibilidad estimada en estos estudios osciló entre el 11% y el 50%. Las implicaciones y la utilidad potencial de la biodisponibilidad de As Inorgánico asociada con la exposición por inhalación para la evaluación de riesgos para la salud humana siguen siendo desconocidas en este momento.

10.- Wallace et al, 2020 en esta revisión enfatizan en gran medida el efecto de los metales tóxicos en las actividades de los microARN (miARN) humanos y cómo esto contribuye a la progresión de enfermedades como el cáncer y los trastornos neurodegenerativos. El mecanismo de acción tóxico se consideró clásicamente como la capacidad de desregular el estado redox, la producción de mediadores inflamatorios y la alteración de la función mitocondrial. Recientemente, una creciente evidencia mostró que los metales pesados podrían ejercer su toxicidad a través de miARN, moléculas cortas, monocatenarias y no codificantes que funcionan como reguladores positivos/negativos de la expresión génica. La alteración aberrante del miARN endógeno se ha implicado directamente en diversas condiciones fisiopatológicas y vías de señalización, lo que conduce en consecuencia a diferentes tipos de cáncer y enfermedades humanas. Además, la capacidad reguladora de genes de los miARN es particularmente valiosa en el cerebro, un órgano complejo con neuronas que demuestran una capacidad significativa para adaptarse a los estímulos ambientales. En consecuencia, los miARN desregulados identificados en pacientes que padecen enfermedades neurológicas podrían servir como biomarcadores para el diagnóstico temprano y el seguimiento de la progresión de la enfermedad.

11.- Koedrith et al, 2011 analizan los modos de acción predominantes y numerosos marcadores moleculares implicados en la formación de tumores por la exposición ambiental y ocupacional a compuestos metálicos como el arsénico, cadmio, cromo, cobalto, plomo, mercurio y níquel. Se presta atención a la generación de radicales libres inducida por metales, el fenómeno del estrés oxidativo, el daño al ADN, los lípidos y las proteínas, las vías de transducción de señales sensibles con funciones importantes en el crecimiento y desarrollo celular y las funciones de los sistemas antioxidantes enzimáticos y de reparación del ADN. Interacción de antioxidantes no enzimáticos (carotenoides, flavonoides, glutatión, selenio, vitamina C, vitamina E y otros) con marcadores de estrés oxidativo celular (catalasa, glutatión peroxidasa y superóxido dismutasa), así como ciertos factores reguladores, incluido AP-1, NF- $\kappa$ B, Ref-1 y p53 también se revisan. La desregulación de las vías protectoras, incluida la red de antioxidantes celulares contra los radicales libres, así como la deficiencia de reparación del ADN, está relacionada con la estimulación oncogénica. Estas observaciones proporcionan evidencia de que los factores reguladores emergentes que responden al estrés oxidativo y las proteínas de reparación del ADN son factores predictivos putativos para el inicio y la progresión del tumor.

12.- Kossowska et al, 2013 establecen en su revisión que la aplicación de técnicas proteómicas en estudios epidemiológicos puede permitir la selección de nuevos biomarcadores de exposición ambiental y ocupacional a metales pesados. En estudios de exposición humana a Pb, Cd y As solos y en una mezcla, todavía faltan marcadores que señalen las sutiles lesiones tempranas que ocurren en el cuerpo humano. Es apropiado desarrollar técnicas de alto rendimiento y utilizar materiales no invasivos. Las técnicas que se utilizan actualmente en los estudios epidemiológicos clásicos permiten la selección de marcadores únicos de cambios de exposición a niveles crónicos de dosis bajas de mezclas. Sin embargo, La aplicación de técnicas proteómicas en tales estudios puede permitir la selección de nuevos biomarcadores de exposición ambiental y ocupacional a metales pesados caracterizados por una alta sensibilidad y especificidad.

13.- Wise et al, 2017 describen de manera general la novena conferencia sobre toxicidad y carcinogénesis de metales celebrada en octubre de 2016 en Lexington, Kentucky. Desde 2000, esta reunión bianual reúne a expertos en el campo para discutir la investigación actual y futura en un esfuerzo por avanzar en la investigación relacionada con la toxicidad de los metales y la carcinogénesis. En esta revisión, resumimos los principales temas discutidos y proporcionamos información sobre la investigación actual en el campo y una descripción de la dirección en la que está progresando el campo.

14.- Moody et al, 2018 realizaron una revisión para resumir la literatura epidemiológica reciente que examina la relación entre la exposición ambiental al As, Cd o Pb con la enfermedad renal crónica. Incluyeron estudios revisados por pares publicados en inglés entre enero de 2013 y abril de 2018 para As y Cd, y todas las fechas anteriores a abril de 2018 para Pb. Incluyeron diseños de estudios de cohortes, de casos y controles o transversales que cumplieron los criterios de inclusión. Los estudios de exposición al As informaron consistentemente una asociación positiva con la incidencia de enfermedad renal crónica. los estudios de exposición al Pb fueron mixtos. Encontramos poca evidencia de asociación entre la exposición al Cd y la ERC. Los autores señalan que se necesitan estudios de cohortes prospectivos adicionales de mejor diseño.

15.- Venkatratnam et al, 2021 proporcionan un resumen completo de la literatura que respalda las asociaciones entre el As inorgánico, factores nutricionales, modificaciones epigenéticas y resultados de salud. Los estudios incluyen aquellos llevados a cabo en poblaciones humanas, in vivo e in vitro, que en conjunto brindan evidencia suficiente para respaldar que el estado nutricional puede influir en el metabolismo de As inorgánico, así como diversos efectos en la salud. Los datos también respaldan que existe una interacción compleja entre la exposición a As inorgánico y las alteraciones epigenéticas. Debido a que la exposición a As inorgánico es un desafío de salud pública global y persistente, la necesidad de promover enfoques nutri-epigenéticos es esencial para mejores enfoques preventivos y terapéuticos.

16.- Buha et al, 2021 realizaron una revisión con el objetivo de resumir el conocimiento más avanzado sobre la interrelación funcional entre los metales tóxicos y la señalización del Factor nuclear eritroide 2-factor 2 relacionado (Nrf2). La relación entre la exposición ambiental a metales pesados y el desarrollo de diversas enfermedades humanas se ha relacionado por la capacidad para inducir la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) a través de acciones directas e indirectas y causar estrés oxidativo en varios órganos. Teniendo en cuenta que la señalización de Nrf2 representa una vía importante para mantener el equilibrio antioxidante, investigaciones recientes indican que puede desempeñar un papel doble según el contexto biológico específico. Por un lado, Nrf2 representa un mecanismo protector potencial crucial en la toxicidad inducida por metales, pero por otro lado, también puede ser un desencadenante de carcinogénesis inducida por metales en condiciones de exposición prolongada y activación continua.

17.- García-Niño et al, 2014 centraron esta revisión en la función protectora de la curcumina contra la lesión hepática inducida por metales pesados dado que los agentes antioxidantes y quelantes se utilizan generalmente para el tratamiento de la intoxicación por metales pesados. La curcumina ha demostrado, en estudios clínicos y preclínicos, numerosas actividades biológicas, incluida la eficacia terapéutica contra diversas enfermedades humanas y efectos antihepatotóxicos contra toxinas ambientales u ocupacionales. La curcumina reduce la hepatotoxicidad inducida por arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo y mercurio, previene la lesión histológica, la peroxidación de lípidos y el agotamiento del glutatión (GSH), mantiene el estado de las enzimas antioxidantes del hígado y protege contra la disfunción mitocondrial. El efecto preventivo de la curcumina sobre los efectos nocivos inducidos por metales pesados se ha atribuido a sus propiedades depuradoras y quelantes, y / o a la capacidad de inducir la vía Nrf2 / Keap1 / ARE. Sin embargo, se necesita investigación adicional para proponer la curcumina como un agente protector potencial contra el daño hepático inducido por metales pesados.

18.- Balali-Mood et al, 2021 revisaron la acción mecanicista de estos metales pesados de acuerdo con los estudios disponibles en animales y humanos. La bioacumulación de estos metales conduce a una diversidad de efectos tóxicos en una variedad de tejidos y órganos corporales. Los metales pesados interrumpen los eventos celulares, incluidos el crecimiento, la proliferación, la diferenciación, los procesos de reparación de daños y la apoptosis. La comparación de los mecanismos de acción revela vías similares para que estos metales induzcan toxicidad, incluida la generación de ROS, el debilitamiento de la defensa antioxidante, la inactivación de enzimas y el estrés oxidativo. Por otro lado, algunos de ellos tienen unión selectiva a macromoléculas específicas. Algunos metales tóxicos entre ellos el arsénico, provocan inestabilidad genómica. Los defectos en la reparación del ADN que siguen a la inducción de estrés oxidativo y el daño del ADN por los tres metales se han considerado como la causa de su carcinogenicidad. Incluso con el conocimiento actual de los peligros de los metales pesados, la incidencia de intoxicaciones sigue siendo considerable y requiere un tratamiento preventivo y eficaz.

19.- Rahman et al, 2019 proporcionan una descripción completa del impacto relativo de los elementos As, Cd, Cr (VI), Hg y Pb en nuestro entorno total que pueden ejercer efectos tóxicos en concentraciones muy bajas. Estos elementos tienen efectos de deterioro severo en varios microorganismos, plantas y animales. La exposición humana a los estos elementos puede provocar graves daños a la salud y deficiencias corporales, e incluso determinadas extremidades pueden provocar la muerte.

20.- Shen et al, 2016 realizaron un meta análisis para analizar los factores que influyen en la metilación del arsénico. Las concentraciones de los siguientes metabolitos del arsénico aumentan después de la exposición al arsénico: arsénico inorgánico , monometil arsénico (MMA), dimetil arsénico (DMA) y arsénico total. Además, los porcentajes de As inorgánico y MMA también aumentan, mientras que el porcentaje de DMA, índice de metilación primaria, y el índice de metilación secundaria disminuyen. Fumar, beber y la vejez pueden reducir la metilación del arsénico, y la metilación del arsénico es más eficaz en las mujeres que en los hombres. Los

resultados de este análisis pueden proporcionar información sobre el papel de la metilación oxidativa del arsénico en el proceso de envenenamiento por arsénico.

21.- Hong et al, 2014 realizó una revisión en la cual establece que el arsénico es un elemento único con distintas características físicas y toxicidad cuya importancia en la salud pública es bien reconocida. La toxicidad del arsénico varía según sus diferentes formas. Si bien se ha confirmado la carcinogenicidad del arsénico, no se comprenden bien los mecanismos detrás de las enfermedades que ocurren después de una exposición aguda o crónica al arsénico. Se ha confirmado que el arsénico inorgánico es un carcinógeno humano que puede inducir cáncer de piel, pulmón y vejiga. También hay informes de su asociación significativa con el cáncer de hígado, próstata y vejiga. Estudios recientes también han sugerido una relación con la diabetes, los efectos neurológicos, los trastornos cardíacos y los órganos reproductivos, pero se requieren más estudios para confirmar estas asociaciones. La mayor parte de la investigación hasta la fecha ha examinado la incidencia de cáncer después de una alta exposición a altas concentraciones de arsénico. Sin embargo, numerosos estudios han informado varios efectos sobre la salud causados por la exposición crónica a bajas concentraciones de arsénico.

22.- Martin et al, 2014 revisaron la contribución de la fundición, la combustión de carbón, la extracción de roca dura y sus productos de desecho asociados al arsénico atmosférico. También informaron sobre la comprensión actual de los efectos en la salud del arsénico inhalado, citando los resultados de varios estudios toxicológicos, biomédicos y epidemiológicos. Las exposiciones por inhalación a polvos y aerosoles que contienen arsénico, tanto en entornos laborales como ambientales, se han relacionado definitivamente con una mayor absorción sistémica, así como con resultados de salud cancerígenos y no cancerígenos. Por lo tanto, es cada vez más importante identificar las poblaciones humanas y las subpoblaciones sensibles en riesgo de exposición, y comprender mejor los modos de acción de la toxicidad pulmonar por arsénico y la carcinogénesis.

23.- Lewis et al, 2012 llevaron a cabo una revisión de la información disponible sobre la especiación de arsénico en el aire. La evaluación incluyó el tipo de especies medidas y la abundancia relativa, así como un análisis de las limitaciones de los métodos analíticos actuales. A pesar de las diferencias inherentes en los procedimientos, la mayoría de las técnicas separaron eficazmente las especies de arsénico en las muestras de aire. El análisis actual demostró que, a pesar de la limitada comparabilidad entre los estudios debido a las diferencias en los factores estacionales, la duración del estudio, los métodos de recolección de muestras y los métodos analíticos, la investigación realizada hasta la fecha es adecuada para demostrar que el arsénico en el aire se encuentra principalmente en forma inorgánica. Las concentraciones promedio informadas de As (III) y As (V) variaron hasta 7,4 y 10,4 ng/m<sup>3</sup>, respectivamente, siendo el As (V) más prevalente que el As (III) en la mayoría de los estudios. Las concentraciones de los compuestos orgánicos de arsénico metilado son insignificantes (en el rango de pg/m<sup>3</sup>). Sin embargo, debido a la variabilidad en los métodos de estudio y la metodología de medición, los autores no pudieron determinar la variación en la composición del arsénico en función de la fuente o la fracción de materia particulada (PM). Los autores concluyen que es importante

sincronizar la recolección de muestras, preparación y técnicas analíticas con el fin de generar datos más útiles para la evaluación del riesgo de inhalación de arsénico.

24.- Thomas 2021 establece que entre 1990 y 2020, nuestra comprensión de la importancia de la biometilación del arsénico cambió de manera notable. Al comienzo de este período, la conversión de arsénico inorgánico en metabolitos mono y di-metilados se consideraba principalmente como un proceso que alteraba el comportamiento cinético del arsénico. Al aumentar la tasa de eliminación del arsénico, la formación de metabolitos metilados redujo la exposición a esta toxina; es decir, la metilación era desintoxicación. Para 2020, estaba claro que al menos algunos de los efectos tóxicos asociados con la exposición al As dependían de la formación de metabolitos metilados que contienen arsénico trivalente. Debido a que el estado de oxidación trivalente del arsénico está asociado con una mayor potencia como citotoxina y clastógeno, estos hallazgos fueron consistentes con cambios relacionados con la metilación en el comportamiento dinámico del arsénico. Es decir, la metilación fue activación. Nuestra comprensión actual del papel de la metilación como modificador de los comportamientos cinéticos y dinámicos del arsénico es producto de la investigación a nivel molecular, celular, orgánico y poblacional. Esta información proporciona una base para refinar nuestras estimaciones de riesgo asociado con la exposición a largo plazo al arsénico inorgánico en medios ambientales, alimentos y agua. Este informe resume el crecimiento de nuestro conocimiento de la metilación del arsénico catalizada enzimáticamente durante este período y considera las perspectivas de nuevos descubrimientos.

25.- Cosselman et al, 2015 en su revisión establece que la exposición ambiental es un factor de riesgo importante pero subestimado que contribuye al desarrollo y la gravedad de la enfermedad cardiovascular (ECV). El corazón y el sistema vascular son muy vulnerables a una serie de agentes ambientales: la contaminación del aire ambiental y los metales arsénico, cadmio y plomo están muy extendidos y son los más estudiados. Al igual que los factores de riesgo tradicionales, como el tabaquismo y la diabetes mellitus, estas exposiciones promueven la enfermedad y la mortalidad mediante el aumento o el inicio de procesos fisiopatológicos asociados con las ECV, incluido el control de la presión arterial, el metabolismo de carbohidratos y lípidos, la función vascular y la aterogénesis. Aunque la residencia en áreas altamente contaminadas se asocia con altos niveles de riesgo cardiovascular, los efectos adversos sobre la salud cardiovascular también ocurren a niveles de exposición por debajo de los estándares regulatorios actuales. Teniendo en cuenta la prevalencia generalizada de la exposición, incluso las contribuciones modestas al riesgo de ECV pueden tener un efecto sustancial en la salud de la población. Las estrategias clínicas y de salud pública basadas en la evidencia destinadas a reducir las exposiciones ambientales de los niveles actuales podrían reducir sustancialmente la carga de muerte y discapacidad relacionadas con las enfermedades cardiovasculares en todo el mundo.

#### 11.1.4 Estudios genéticos

1.- Hu et al, 2017 encontraron que el  $As_2O_3$ , un tóxico metálico ambiental, regulaba al alza las modificaciones generales de muchas proteínas celulares mediante SUMO2/3. Las proteínas sumoiladas de células tratadas con arsénico que expresan constitutivamente His6-SUMO2 fueron derribadas por resina Ni-IDA en condiciones desnaturalizantes. El análisis de espectrometría de masas reveló más de 100 proteínas que fueron potencialmente modificadas por sumoilación. Mus81, una endonucleasa de ADN involucrada en la reparación de la recombinación homóloga, se encontraba entre las proteínas identificadas cuya sumoilación aumentó después del tratamiento con  $As_2O_3$ . Además, mostramos que K10 y K524 eran 2 residuos de lisina esenciales para la sumoilación de Mus81. Además, demostraron que la sumoilación de Mus81 es importante para la congregación cromosómica mitótica normal y que las células que expresan mutantes Mus81 resistentes a SUMO mostraron respuestas comprometidas al daño del ADN después de la exposición a toxinas metálicas como Cr (VI) y arsénico.

2.- Zhu et al, 2020 descubrieron en primer lugar el comportamiento diferente de las especies de arsénico dentro del ambiente PM 2.5 recolectados durante el día y la noche, invierno y verano. La variación diurna de las especies de arsénico en las partículas se correlaciona significativamente con la presencia de óxidos metálicos, específicamente, óxidos ferrosos, de titanio y zinc, que podrían jugar un papel clave en el proceso de fotooxidación de As (III) a As (V) con los parámetros meteorológicos y factores regionales excluidos. Posteriormente, se detectó la fotoconversión del arsenito en filtros de fibra de vidrio cargados con metal bajo luz visible. Se encontró que el radical superóxido fotogenerado era predominantemente responsable de la oxidación de As (III). Con el fin de revelar las diferencias de toxicidad inducidas por la oxidación de As (III), las células HepG2 se expusieron a varias soluciones de mezcla de arsénico. Encontraron que las actividades de las enzimas antioxidantes se suprimen al aumentar la relación As (III) / As (V) en total, seguido de la acumulación de nivel de ROS intracelular. El consumo de glucosa y el contenido de glucógeno también mostraron una reducción obvia en las células estimuladas por insulina. En comparación con los niveles de expresión de IRS-1, AKT y GLUT4, GLUT2 podría ser más vulnerable a la exposición al arsénico y provocar anomalías en el metabolismo de la glucosa en las células HepG2. Tomados en conjunto, estos hallazgos aclaran que el riesgo para la salud que representa la exposición por inhalación al aire contaminado por As podría aliviarse debido a la conversión fotoimpulsada en presencia de óxidos metálicos. GLUT2 podría ser más vulnerable a la exposición al arsénico y provocar anomalías en el metabolismo de la glucosa en las células HepG2.

3.- Wang et al, 2021 observaron que el  $NaAsO_2$  podría inducir estrés oxidativo en células epiteliales bronquiales humanas (HBE). Esto fue acompañado por una inhibición de la desmetilación del ADN mediada por TET (Ten-eleven translocation). Los resultados posteriores mostraron que el ARNip de TET1 y TET2 condujeron a una mayor inhibición del genoma 5hmC y un mayor nivel de estrés oxidativo en las células HBE tratadas con  $NaAsO_2$ . Por el contrario, el ácido l-ascórbico mejoró las proteínas TET y reguló positivamente 5hmC, lo que antagonizó el estrés oxidativo inducido por  $NaAsO_2$ . Además, los TET regularon positivamente la metilación del promotor de los genes antioxidantes 8-oxoguanina ADN glicosilasa (OGG1) y glutatión S-

transferasa Pi 1 (GSTP1). Tomados en conjunto, los resultados indican que el arsénico indujo la inhibición de la desmetilación del ADN mediada por TET, que indujo la hipermetilación del promotor, inhibiendo la expresión de OGG1 y GSTP1 y aumentando el estrés oxidativo en las células pulmonares in vitro. El ácido l-ascórbico alivió eficazmente el estrés oxidativo inducido por el arsénico al restaurar la función de la TET.

4.- Lag et al, 2016 compararon 8 iones metálicos diferentes con respecto a las respuestas de citocinas, citotoxicidad y mecanismos de señalización en un modelo de células epiteliales de pulmón humano (BEAS-2B). Entre los iones metálicos probados, hubo grandes diferencias con respecto al potencial proinflamatorio. La exposición a Cd (2+), Zn (2+) y As (3+) indujo la liberación de CXCL8 e IL-6 en concentraciones inferiores a 100  $\mu$ M, y Mn (2+) y Ni (2+) en concentraciones superiores a 200  $\mu$ M. Por el contrario, VO4 (3-), Cu (2+) y Fe (2+) no indujeron ningún aumento significativo de estas citocinas. Una matriz de expresión de 20 genes inflamatorios relevantes también mostró una marcada regulación positiva de CXCL10, IL-10, IL-13 y CSF2 por uno o más de los iones metálicos. Los metales más potentes, Cd (2+), Zn (2+) y As (3+) indujeron los niveles más altos de actividad oxidativa, y ROS pareció ser central en sus respuestas CXCL8 e IL-6. La activación de MAPK p38 parecía ser un mediador crítico. Sin embargo, la vía de NF- $\kappa$ B parecía estar implicada predominantemente sólo en las respuestas de CXCL8 e IL-6 inducidas por Zn (2+) y As (3+). Por lo tanto, los metales más potentes Cd (2+), Zn (2+) y As (3+) parecían inducir un patrón similar para las respuestas de citocinas, y con algunas excepciones, a través de mecanismos de señalización similares.

5.- Cui et al, 2011 diseñaron el presente estudio para probar la hipótesis de que los miARN regulados por arsenito juegan un papel fundamental en la toxicidad inducida por arsénico. Estudios recientes informaron que el arsénico se dirige a las células endoteliales que recubren los vasos sanguíneos, y la activación o disfunción de las células endoteliales puede ser la base de la patogenia de las enfermedades inducidas por el arsénico y la toxicidad del desarrollo. Los huevos fertilizados se inyectaron a través del saco vitelino con arsenito de sodio 100 nM en las etapas 6, 9 y 12 de Hamburger-Hamilton (HH), y se recolectaron en la etapa 18 de HH. Para identificar los miARN y ARNm individuales que pueden regular la red genética, Los perfiles de expresión de embriones de pollo se analizaron mediante análisis de microarrays. Los análisis de microarrays revelaron que la expresión de un conjunto de miARN cambió después de la administración de arsenito, especialmente miARN-9, 181b, 124, 10b y 125b, que exhibieron una disminución masiva en la expresión. Los análisis integradores de los datos de microarrays revelaron que varios miARN, incluidos miR-9 y miR-181b, podrían apuntar a varios genes clave involucrados en la toxicidad del desarrollo inducida por el arsénico. Un ensayo de indicador de luciferasa confirmó la neuropilina-1 (Nrp1) como un objetivo de mir-9 y mir-181b. Los datos del ensayo de migración transwell y del ensayo de formación de tubos indicaron que miR-9 y mir-181b inhibieron la migración de células EA.hy926 inducida por arsénico y la formación de tubos al dirigirse a NRP1

6.- Wen et al, 2011 usaron espectrometría de absorción atómica de generación de hidruros para determinar tres especies de arsénico en la orina de trabajadores que habían estado trabajando

en plantas de arsénico, y calcularon índices de metilación primaria y secundaria. Los daños del exón 5, 6, 8 del gen p53 se determinaron mediante el método desarrollado por Sikorsky, et al. Los resultados muestran que las concentraciones de cada especie de arsénico urinario y los índices de daño del exón 5 y 8 del gen p53 en la población expuesta fueron significativamente más altos, pero el SMI fue significativamente más bajo que en el grupo de control. Se encontró una correlación estrechamente positiva entre el índice de daño del exón 5 y PMI, MMA, DMA, pero hubo una correlación estrechamente negativa entre el índice de daño del exón 5 y SMI. Esos hallazgos sugirieron que existía daño en el ADN de los exones 5 y 8 del gen p53 en la población expuesta ocupacionalmente al arsénico. Para el exón 5, los factores importantes pueden incluir el modelo de transformación metabólica del arsénico, las concentraciones de MMA y DMA, y el MMA puede ser de gran importancia.

7.- Vattanasit et al, 2014 desarrollaron un estudio que tuvo como objetivo investigar los efectos de la PM sobre la inducción del daño oxidativo del ADN y la inflamación mediante el uso de linfocitos in vitro y en humanos expuestos a PM en el medio ambiente. Se trataron linfoblastos humanos (RPMI 1788) con DEP (SRM 2975) a diversas concentraciones (25-100  $\mu\text{g} / \text{ml}$ ) para comparar el alcance de las respuestas con las células epiteliales alveolares (A549). La generación de ROS se determinó en cada fase del ciclo celular de las células tratadas con DEP para investigar la influencia de la etapa del ciclo celular en la inducción del estrés oxidativo. El daño oxidativo del ADN se determinó mediante la medición de 8-hidroxi-desoxiguanosina (8-OHdG), mientras que las respuestas inflamatorias se determinaron mediante la expresión del ARNm de interleucina-6 y -8 (IL-6 e IL-8), proteína de la célula Clara (CC16) y proteína A (SP-A) tensioactivo pulmonar. Los resultados mostraron que las células RPMI 1788 y A549 tenían un patrón similar de respuestas dependientes de la dosis a DEP en términos de absorción de partículas, generación de ROS con el nivel más alto encontrado en la fase G2 / M, formación de 8-OHdG e inducción de IL-6 y Expresión de IL-8. El estudio en humanos se realizó en 51 sujetos sanos que residen en áreas congestionadas por el tráfico. Se evaluaron los efectos de la exposición a PM2.5 y PAH unidos a partículas y metales tóxicos sobre los niveles de 8-OHdG en el ADN de los linfocitos, la expresión de IL-8 en los linfocitos y la CC16 en suero. Los niveles de 8-OHdG se correlacionaron con los niveles de exposición de PM2.5 ( $P < 0.01$ ) y PAHs ( $P < 0.05$ ), pero este no fue el caso con IL-8. El suero CC16 mostró correlaciones significativamente negativas con los niveles de B [a] P equivalente ( $P < 0.05$ ), pero una correlación positiva con Pb ( $P < 0.05$ ). En conclusión, un patrón similar de las respuestas dependientes de la dosis a DEP en los linfoblastos y las células pulmonares sugiere que los linfocitos circulantes podrían usarse como sustituto para evaluar el daño oxidativo del ADN inducido por PM y las respuestas inflamatorias en el pulmón. La exposición humana a la PM conduce al daño oxidativo del ADN, mientras que la inflamación inducida por la PM no fue concluyente y debería investigarse más a fondo.

8.- Cantone et al, 2011 investigaron si los componentes metálicos de la MP determinaban las modificaciones de las histonas activadoras en 63 trabajadores del acero con una exposición bien caracterizada a la MP rica en metales. Los antecedentes indican que las investigaciones epidemiológicas han vinculado la exposición a al material particulado (PM) del aire ambiental y ocupacional con un mayor riesgo de cáncer de pulmón. En este estudio determinaron la

dimetilación de la histona 3 lisina 4 (H3K4me2) y la acetilación de la histona 3 lisina 9 (H3K9ac) en histonas de leucocitos sanguíneos. Se estimó la exposición a componentes metálicos inhalables (aluminio, manganeso, níquel, zinc, arsénico, plomo, hierro) y a las partículas totales de cada sujeto de estudio. Tanto H3K4me2 como H3K9ac aumentaron en asociación con los años de empleo en la planta. H3K4me2 aumentó en asociación con los niveles de níquel en el aire, arsénico y hierro. H3K9ac mostró asociaciones positivas no significativas con los niveles de níquel en el aire, arsénico y hierro. Las exposiciones acumuladas al níquel y arsénico, definidas como el producto de años de empleo por los niveles de metal en el aire, se correlacionaron positivamente con ambos H3K4me2 (níquel:  $\beta = 0,16$ ; IC del 95%, 0,01-0,3; arsénico:  $\beta = 0,16$ ; IC del 95% , 0,03-0,29) y H3K9ac (níquel:  $\beta = 0,27$ ; IC del 95%, 0,01-0,54; arsénico:  $\beta = 0,28$ ; IC del 95%, 0,04-0,51). Como conclusión los autores indican que las modificaciones de las histonas son un mecanismo epigenético novedoso inducido en sujetos humanos por la exposición prolongada al níquel y arsénico inhalables.

### 11.1.5 Monitoreo biológico

1.- Garnier et al, 2020 examinaron y analizaron todas las evaluaciones de la toxicidad del arsénico inorgánico realizadas por agencias de salud nacionales o internacionales durante las últimas 3 décadas. Estas evaluaciones se completaron con la recuperación de literatura desde enero de 2016 hasta diciembre de 2019. El mejor indicador de biomonitoreo para la exposición a As inorgánico (iAs) es la suma de iAs en orina, concentraciones de ácido monometilarsónico (MMA) y ácido dimetilarsónico (DMA) (SA). El límite superior del intervalo de confianza del percentil 95 de la distribución de este parámetro en la población adulta general residente en Francia es de 10  $\mu\text{g}$  por g de creatinina, y se recomienda como valor límite para la definición de sobreexposición. En niños menores de 12 años se requieren valores límite específicos, pero aún no están disponibles. En su ausencia, los SA deben superar los 10  $\mu\text{g}/\text{g}$  de creatinina y los 11  $\mu\text{g}/\text{L}$  para que se considere que indican una probable sobreexposición a los iAs. No existen indicadores biológicos útiles de los efectos tempranos de iAs. Los efectos cutáneos no cancerígenos del arsénico inorgánico (hiperpigmentación y queratosis) deben considerarse como los primeros efectos deletéreos de la exposición ambiental repetida a iAs

2.- Vimercati et al, 2017 diseñaron un estudio para evaluar la exposición al arsénico y al cromo en la población general sin exposición ocupacional a estos metales, residente en la zona industrial de Taranto, sur de Italia, mediante técnicas de seguimiento biológico. Midió los niveles de cromo, arsénico inorgánico y metabolitos metilados en las muestras de orina de 279 sujetos que residen en Taranto y áreas vecinas. Aplicaron un cuestionario estructurado estandarizado que investigaba los hábitos de estilo de vida y controlaba los factores de confusión. Los datos del monitoreo biológico mostraron altas concentraciones urinarias de ambos metales pesados investigados, particularmente Cr. Sobre esta base, será necesario realizar un programa de seguimiento ambiental organizado, teniendo en cuenta todas las vías de exposición para correlacionar las concentraciones ambientales de estos metales con los resultados del biomonitoreo.

3.- Xi et al, 2011 analizaron los perfiles de metabolitos de arsénico (As) en orina de trabajadores en plantas de fundición de cobre y acero especial y explorar la posible exposición ocupacional al As, así como el riesgo individual de arsenicosis. Reclutaron a un total de 95 trabajadores varones de dos plantas, ubicadas en la parte noreste de China. La información sobre cada tema se obtuvo mediante cuestionario. Se determinaron las concentraciones de arsénico inorgánico (iAs), ácido monometilarsónico (MMA), ácido dimetilarsínico (DMA) en orina y en el aire en los lugares de trabajo. Las concentraciones de As en el aire en los sitios de fundición de cobre fueron significativamente más altas que en los sitios de fundición de acero. Los trabajadores de la fundición de cobre tenían concentraciones significativamente más altas de iAs, MMA, DMA en la orina con ajuste de creatinina, pero un valor más bajo del índice de metilación primaria (PMI) que el de los trabajadores de las plantas de fundición de acero. Se comparó la mayor proporción de la forma inorgánica pero la menor proporción de la forma DMA de los trabajadores de la fundición de cobre con la de los trabajadores de la fundición de acero, y la concentración de DMA en la orina de los trabajadores de la fundición de acero aumentó significativamente de forma lineal con el consumo de mariscos. Se encontró que siete trabajadores de una fundición de cobre tenían hiperqueratosis o hiperpigmentación, y su orina mostró un porcentaje de iAs más alto pero un% de DMA y un PMI más bajos en comparación con otros trabajadores sin dermatosis por As al mismo nivel de exposición. Los autores concluyen que la liberación de polvo de As producido en la extracción y fundición de mineral crudo es la principal fuente de contaminación de As en la planta de fundición de cobre. La capacidad de metilación del As disminuye con el aumento del nivel de exposición al As, y el daño cutáneo causado por el As se asocia con la disminución de la capacidad de metilación.

4.- Yao et al, 2021 diseñaron este estudio con el objetivo de clasificar la población de la Encuesta Nacional de Examen de Salud y Nutrición (NHANES) en diferentes subgrupos de exposición utilizando métodos modernos de agrupación no supervisados basados en plomo, cadmio, mercurio y arsénico medidos en orina o sangre total, y para evaluar la asociación entre los grupos de exposición identificados y doce importantes criterios de valoración de salud. Analizaron una subcohorte de 9.662 sujetos que participaron en los 6 ciclos (2003-2004 a 2013-2014) del estudio NHANES. Los niveles en orina de 3 metales pesados (arsénico total, plomo, cadmio) y los niveles en sangre de 3 metales pesados (plomo, cadmio y mercurio) se analizaron utilizando un enfoque de dos pasos. En el primer paso, estratificaron la población en subgrupos utilizando agrupaciones no supervisadas (k-medoides) en función de los niveles de metales en la orina o en la sangre. Luego, examinamos la asociación entre 12 criterios de valoración de salud y subgrupos de exposición identificados mientras controlamos por edad, sexo, raza/etnia, educación, tabaquismo, IMC y creatinina urinaria. Los resultados mostraron que el algoritmo k-medoides agrupó la población de NHANES en 2 grupos según los niveles de metales pesados en sangre o en orina. Las concentraciones de los tres metales pesados fueron significativamente diferentes entre los grupos identificados en sangre ( $p < 2.2e-16$ ) o en orina ( $p = 0$ ). El grupo con concentraciones más altas se definió como el grupo de "alta exposición", mientras que el grupo con concentraciones más bajas se definió como el grupo de "baja exposición". El análisis de asociación con los resultados de salud sugirió que el grupo de alta exposición según los niveles

de metales en sangre o en orina tuvo una mortalidad total significativamente mayor (1,63-1,64 veces mayor,  $p < 0,0001$ ), mortalidad causada por neoplasias malignas (2,05-2,62 veces mayor,  $p < 0,0002$ ), gamma-glutamil transferasa (GGT) (1,03-1,05 veces mayor,  $p < 0,0001$ ). Además, el grupo de alta exposición en función de los niveles en sangre también se asoció significativamente con la Presión arterial sistólica (PAS), la muerte relacionada con la hipertensión, la enfermedad cardíaca y la enfermedad crónica de las vías respiratorias inferiores, mientras que el grupo de alta exposición en función de las concentraciones urinarias tuvo una mayor mortalidad relacionada con la nefritis. Conclusiones: Los grupos de alta exposición, caracterizados por concentraciones más altas de metales, tenían tasas significativamente más altas de GGT, PAS, Presión arterial diastólica y mortalidad, lo que sugiere los efectos perjudiciales de la exposición a estos metales pesados. La estratificación de la población de NHANES basada en patrones de exposición proporciona un método informativo para estudiar el impacto de la exposición a metales en los resultados de salud.

5.- Lovreglio et al, 2012 realizaron un estudio para evaluar los aspectos críticos relacionados con el uso de arsénico inorgánico (iAs) urinario, incluidos As<sub>3</sub>, As<sub>5</sub>, ácido monometilarsónico (MMA) y ácido dimetilarsínico (DMA), como biomarcador de dosis interna para monitorear la exposición ambiental y ocupacional a sustancias inorgánicas de As, considerando la influencia de la dieta y el agua potable en la excreción de iAs. El diseño estipuló la recolección de muestras de orina semanales de 6 sujetos masculinos durante 5 meses consecutivos. En los sujetos con iAs superiores al Índice de exposición biológica (IEB) de 35 ug/L, se realizó la especiación de arsénico urinario mediante HPLC-ICP-MS. La exposición al As en el aire se evaluó mensualmente utilizando muestreadores ambientales personales que se usaron durante 8 horas. A lo largo del estudio, los participantes completaron un diario de alimentación por día, que también detallaba los tipos de agua que bebían. La exposición al As en el aire estuvo invariablemente por debajo del límite de detección, igual a 1 ng/m<sup>3</sup>. Se recogieron un total de 77 muestras de orina. El iAs siempre fue detectable y fue mayor en 7 muestras de orina, obtenidas de 5 de los 6 sujetos examinados que el IEB. Entre los alimentos con alto contenido de As, la ingesta de mariscos y pescados dentro de las 72 horas anteriores a la entrega de la muestra parece ser la fuente principal de las concentraciones de iAs, mientras que la ingesta de arroz o agua potable no mostró influencia sobre este marcador biológico. En cambio, beber vino dentro de las 24 horas anteriores a la recolección de la muestra de orina puede causar un aumento significativo en la excreción de iAs. Los autores concluyen que en poblaciones que consumen grandes cantidades de pescado y marisco, el uso de iAs para monitorear la exposición ocupacional y ambiental al As inorgánico parece presentar algunos problemas, y la especiación del As urinario puede ser esencial al menos en casos con mediciones de As por encima del límite biológico. valores. En cualquier caso, un registro diario de alimentación por día hoja de dieta que informe todos los alimentos ingeridos dentro de los 3 días posteriores a la recolección de orina parece ser una herramienta indispensable para garantizar una interpretación correcta de los resultados.

6.- Interdonato et al, 2014 evaluaron los niveles de metales pesados en 226 niños de 12 a 14 años, residentes en zonas de Milazzo-Valle del Mela que cuenta con la presencia de plantas industriales y la refinería de petróleo. También se inscribió una población de control de la misma

edad (n = 29) que vivía a 45 km de la zona industrial. Se analizaron arsénico, cadmio, cromo, mercurio, níquel y vanadio en muestras de orina de 24 h, mientras que se evaluó la concentración de plomo en muestras de sangre. También se aplicó un cuestionario sobre estilo de vida y percepción de riesgo. Los adolescentes tenían niveles de cadmio significativamente más altos en comparación con los controles ( $P < 0,0001$ ) o los valores de referencia de la Encuesta Ambiental Europea de Alemania y la Encuesta Nacional Estadounidense de Examen de Salud y Nutrición. Además, los niños tenían una mayor percepción de vivir en un entorno de alto riesgo. Los datos actuales, por primera vez, indican claramente que los adolescentes que viven en Milazzo-Valle del Mela tienen una mayor concentración corporal de cadmio, lo que puede ser perjudicial para la salud humana. Estos resultados merecen especial atención por parte del gobierno local y regional para iniciar programas de prevención en esta población susceptible.

7.- Yang et al, 2019 investigaron las asociaciones de 23 niveles de metales con la función renal. Implementaron un estudio transversal en cuatro regiones rurales de la provincia de Hunan. Determinaron los niveles de metales en plasma y orina mediante ICP-MS. Se utilizó la regresión logística de dos niveles para investigar las asociaciones de los metales con la tasa de filtración glomerular estimada (eGFR) con ajuste por factores de confusión. De un total de 3.553 participantes se identificaron cinco metales (arsénico y molibdeno en plasma; cobre, rubidio y estroncio en orina) que se asociaron significativamente con la función renal. Los participantes en el cuartil más alto de arsénico y molibdeno en plasma tenían un riesgo de 17,95 (IC del 95%: 6,35-50,76) y 24,23 (IC del 95%: 7,42-79,19) de eGFR anormal, respectivamente, en comparación con el cuartil más bajo. Los cuartiles más altos de cobre, rubidio y estroncio en orina se asociaron con 3,70 (IC del 95%: 1,92-7,14), 0,16 (IC del 95%: 0,07-0,37) y 0,08 (IC del 95%: 0,03-0,21) veces mayor de riesgo de anomalías eGFR. El análisis de sensibilidad reveló que los niveles plasmáticos de arsénico, molibdeno y cobre, rubidio y estroncio en orina mantuvieron asociaciones similares con eGFR anormales. Los autores concluyen que el arsénico y molibdeno en plasma y el cobre en orina son factores de riesgo para la función renal anormal, mientras que el rubidio y el estroncio en orina son factores protectores de la función renal.

8.- Gardner et al, 2013 desarrollaron un estudio de cohorte prospectivo basado en 1,505 parejas de madres e hijos en las zonas rurales de Bangladesh, analizando las asociaciones entre la exposición temprana al arsénico, el cadmio y el plomo, evaluadas a través de las concentraciones en la orina materna e infantil, y el peso y la estatura de los niños hasta 5 años de edad, durante el período 2001-2009. Las exposiciones simultáneas y prenatales se evaluaron mediante un análisis de regresión lineal, mientras que la exposición longitudinal se evaluó mediante una regresión lineal de efectos mixtos. Se encontró una asociación inversa entre el peso y la altura de los niños, las puntuaciones z ajustadas por edad y la velocidad de crecimiento a los 5 años y la exposición simultánea a cadmio y arsénico. En el análisis longitudinal, las diferencias atribuibles con ajuste multivariable en el peso de los niños a la edad de 5 años fueron de -0,33 kg (intervalo de confianza (IC) del 95%: -0,60, -0,06) para una exposición alta ( $\geq$  percentil 95) a arsénico y -0,57 kg (IC del 95%: -0,88, -0,26) para una exposición alta a cadmio, en comparación con los niños con la exposición más baja (percentil  $\leq 5$ ). Las diferencias atribuibles ajustadas multivariablemente en la altura fueron de -0,50 cm (IC del 95%: -1,20; 0,21) para la exposición alta a arsénico y de -1,6

cm (IC del 95%: -2,4; -0,77) para la exposición alta a cadmio. Las asociaciones fueron evidentes principalmente entre las niñas. Los efectos negativos sobre el crecimiento de los niños a la edad de 5 años atribuibles al arsénico y al cadmio fueron de magnitud similar a la diferencia entre niñas y niños en términos de peso (0,67 kg, IC del 95%: -0,82, -0,53) y altura (-1,3 cm, IC del 95%: -1,7, -0,89).

### 11.1.6 Cáncer

1.- Zeng et al, 2020 se recolectaron un total de 106 muestras de piel durante los últimos 20 años. Según la presencia o ausencia de una alta exposición a arsénico, los participantes se dividieron en grupos de exposición a arsénico (72) y de referencia (34). Además, el grupo de exposición al arsénico se dividió en el grupo sin cáncer (31, incluida la hiperpigmentación e hiperqueratosis de la piel) y el grupo de cáncer de piel (41, incluida la enfermedad de Bowen, carcinoma de células basales y carcinoma de células escamosas) según un examen histopatológico de piel. Primero, las asociaciones entre miR-155, NF-AT1 con disfunción inmunológica y lesiones cutáneas inducidas por arsénico y carcinogénesis se confirmaron utilizando estas muestras de piel. En el grupo expuesto a arsénico, miR-155-5p, queratina 1 (Krt1), queratina 10 (Krt10) y queratina 6c (Krt6c) aumentaron significativamente en la piel ( $p < 0,05$ ), mientras que NF-AT1, interleucina 2 (IL-2) e interferón- $\gamma$  (IFN- $\gamma$ ) disminuyeron significativamente ( $p < 0,05$ ). Se observaron claras correlaciones entre estos factores ( $p < 0,05$ ). En queratinocitos humanos inmortalizados, el silenciamiento y sobreexpresión de NF-AT1 podría alterar la expresión y secreción de indicadores de disfunción inmunológica (IL-2 e IFN- $\gamma$ ) que son inducidos por exposición a arsénico ( $p < 0,05$ ); sin embargo, Los niveles de miR-155-5p no cambiaron significativamente ( $p > 0,05$ ). El imitador e inhibidor de miR-155-5p podría regular la disfunción inmunológica mediada por NF-AT1 causada por el arsénico ( $p < 0,05$ ). El estudio proporciona algunas pruebas limitadas de que miR-155-5p regula la disfunción inmunológica mediada por NF-AT1 que está involucrada en la patogénesis y carcinogénesis del arsénico. El segundo hallazgo importante fue que Krt1 y Krt10 son marcadores de hiperqueratosis causada por arsénico, y Krt6c es un biomarcador potencial que puede reflejar la carcinogénesis por arsénico.

2.- Perry et al, 2019 con el objetivo de comprender mejor las consecuencias para la salud renal de la exposición a El tricloroetileno (TCE) y el arsénico inorgánico (iAs), expusieron durante 52 semanas a una población de ratones genéticamente heterogénea y deficientes en genes de resistencia a múltiples fármacos a concentraciones variables de TCE e iAs. Aunque ningún grupo de exposición resultó en tumores primarios de células renales, los riñones de los ratones expuestos tuvieron aumentos significativos en la evidencia histológica y bioquímica de enfermedad tubular renal con cada tóxico solo y con la exposición combinada, y los machos tuvieron niveles de daño significativamente más altos. Si bien este modelo refleja con mayor precisión las condiciones de exposición humana, el desarrollo de tumores renales primarios observados en humanos después de la exposición crónica al TCE no se reprodujo incluso después de la inclusión de heterogeneidad genética e iAs co-cancerígenos.

3.- Liu et al, 2015 realizaron un estudio que exploró la asociación entre el riesgo de cáncer de mama y la exposición residencial a los disruptores de estrógenos ambientales entre los participantes en un gran estudio de cohorte: California Teachers Study. Los participantes consistieron en 112.379 mujeres sin cáncer de mama y que vivían en una dirección de California en 1995/1996. 11 contaminantes peligrosos del aire de la lista de USEPA fueron identificados como disruptores de estrógeno según las listas de sustancias químicas disruptoras endocrinas publicadas y la revisión de la literatura. Las concentraciones en el aire del disruptor de estrógeno se asignaron a las direcciones de referencia de los participantes fueron modeladas en base al Census-tract por la USEPA. Se utilizaron modelos de riesgos proporcionales de Cox para estimar los cocientes de riesgo asociados con la exposición a cada disruptor de estrógeno y una medida resumida de nueve contaminantes atmosféricos peligrosos estrogénicos entre todos los participantes y subgrupos seleccionados, ajustando por edad, raza/lugar de nacimiento, nivel socioeconómico y riesgo conocido de cáncer de mama. Se identificaron 5361 casos de cáncer de mama invasivo entre 1995 y 2010. No se encontraron asociaciones entre la exposición residencial a los disruptores de estrógenos ambientales y el riesgo general de cáncer de mama o el riesgo de cáncer de mama con receptores hormonales positivos, ni entre los subgrupos seleccionados de participantes (mujeres pre/perimenopáusicas, mujeres posmenopáusicas, no fumadoras, no cambiantes y no cambiantes que nunca fuman). Sin embargo, se observaron riesgos elevados de tumores con receptores hormonales negativos por una mayor exposición a compuestos de cadmio y posiblemente arsénico inorgánico entre los no fumadores que nunca se movieron. Los autores concluyen que la exposición prolongada a dosis bajas a compuestos de cadmio ambientales o posiblemente arsénico inorgánico puede ser un factor de riesgo para el cáncer de mama.

4.- Heck et al, 2017 realizaron un estudio de casos y controles, determinando 69 casos de leucemia linfoblástica aguda (LLA) y 46 casos de leucemia mieloide aguda (LMA) de los registros del Registro de cáncer de California de niños menores de 6 años y 19,209 controles de los registros de nacimiento de California en un radio de 2 km ( 1.3 millas) (ALL) y 6 km (3.8 millas) (AML) de una estación de monitoreo de sustancias tóxicas en el aire entre 1990 y 2007. La información sobre la exposición a sustancias tóxicas en el aire se obtuvo de los monitores de aire de la comunidad. Usaron regresión logística para estimar el riesgo de leucemia asociado con un aumento en el rango intercuartílico de la exposición al aire tóxico. El riesgo de LLA se elevó con la exposición en el 3 (3er) trimestre a hidrocarburos aromáticos policíclicos (OR = 1,16; IC del 95%: 1,04; 1,29), arsénico (OR = 1,33; IC del 95%: 1,02; 1,73), benceno (OR = 1,50; 95% IC 1,08, 2,09) y otros tres tóxicos relacionados con la quema de combustible. El riesgo de LMA aumentó con la exposición en el tercer trimestre al cloroformo (OR = 1,30; IC del 95%: 1,00; 1,69), benceno (1,75; IC del 95%: 1,04; 2,93) y otros dos tóxicos relacionados con el tráfico. Durante el primer año del niño, la exposición al butadieno, el ortoxileno y el tolueno aumentó el riesgo de LMA y la exposición al selenio aumentó el riesgo de LLA. El benceno es una causa establecida de leucemia en adultos; Este estudio respalda que la exposición ambiental a esta y otras sustancias químicas durante el embarazo y la vida temprana también puede aumentar el riesgo de leucemia en los niños.

5.- Chang et al, 2015 diseñaron un estudio para evaluar las posibles fuentes de exposición a metales pesados en la población general y determinar la asociación entre metales pesados urinarios y riesgo de carcinoma urotelial. Para esto reclutaron 205 pacientes con carcinoma urotelial y 406 participantes de control para un estudio de casos y controles entre el 2011 y 2013. Midiéron los niveles urinarios de arsénico, cadmio, cromo, níquel y plomo utilizando espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente. Recopilaron información relacionada con la exposición ambiental a través de cuestionarios. Se aplicó regresión logística multivariante e intervalos de confianza del 95% para estimar el riesgo de carcinoma urotelial y los efectos potenciales de los factores de riesgo relacionados con el carcinoma urotelial en los niveles de metales pesados en la orina. Los pacientes con carcinoma urotelial mostraron niveles urinarios más altos de arsénico, cadmio, cromo, níquel y plomo que los controles. Después de considerar otros factores de riesgo potenciales, se observó un riesgo significativamente mayor de carcinoma urotelial en pacientes con niveles elevados de cadmio, cromo, níquel y plomo en la orina. Los fumadores mostraron un nivel alto de cadmio en orina. Además del cadmio, un nivel alto de plomo en la orina se asoció con el consumo acumulativo de cigarrillos y el uso de medicamentos a base de hierbas. Los autores concluyen que los factores ambientales pueden contribuir a niveles urinarios más altos de metales pesados y, en última instancia, dar lugar a carcinogénesis de carcinoma urotelial. Estos hallazgos pueden promover una adecuada vigilancia ambiental de la exposición a metales pesados en la población en general.

6.- Ramis et al, 2012 diseñaron un análisis de áreas geográficas emparejadas para examinar la mortalidad por linfoma no Hodgkin en las cercanías de las 10 refinerías ubicadas en España entre 1997-2006. La exposición de la población a las refinerías se estimó sobre la base de la distancia desde la ciudad de residencia a la instalación en un área de amortiguación de 10 km. Evaluaron el riesgo de mortalidad por LNH asociado con la residencia en las cercanías de las refinerías y con diferentes regiones usando una mezcla de modelos de Poisson. Luego estudiaron los residuales para evaluar una posible tendencia de riesgo con la distancia. Los resultados obtenidos de los riesgos relativos (RR) asociados con la exposición mostraron valores similares para mujeres y hombres, 1,09 (0,97-1,24) y 1,12 (0,99-1,27). Los RR para dos comunidades autónomas fueron estadísticamente significativos: Canarias mostró un exceso de riesgo de 1,35 (1,05-1,72) para las mujeres y 1,50 (1,18-1,92) para los hombres, mientras que Galicia mostró un exceso de riesgo de 1,35 (1,04-1,75) para los hombres. , pero no un exceso significativo para las mujeres. Los autores concluyen que los resultados sugieren un posible aumento del riesgo de mortalidad por LNH entre las poblaciones que residen en las cercanías de las refinerías; sin embargo, no se ha mostrado una tendencia de distancia potencial. Los efectos regionales en Canarias y Galicia son significativamente mayores que la media regional.

### **11.1.7 Neurotoxicidad**

1.- Drobna 2020 teniendo en cuenta que el arsénico tiene el potencial de inhibir el flujo autofágico, planteó la hipótesis de que el arsenito ( $\text{NaAsO}_2$ ) puede interactuar con LRRK2 y  $\alpha$ -sinucleína, afectando su fosforilación en regiones del cerebro propensas a la neurodegeneración.

Después de 15 semanas de exposición crónica al arsenito, observó una reducción en la fuerza de agarre de los ratones macho. Treinta minutos de exposición al arsenito aumentó la fosforilación de Lrrk2 y  $\alpha$ -sinucleína en cultivos de cortes de cerebro organotípicos del cerebelo y el cuerpo estriado, respectivamente. La exposición crónica de ratones a una amplia gama de concentraciones de arsenito condujo a una inducción significativa de la fosforilación de Lrrk2 en la sustancia negra y el cerebelo y la fosforilación de  $\alpha$ -sinucleína en la sustancia negra y el cuerpo estriado. Las fuertes correlaciones entre las formas fosforiladas de Lrrk2 y  $\alpha$ -sinucleína en la sustancia negra, los niveles de Lrrk2 entre la sustancia negra y el cuerpo estriado, y entre Lrrk2 en el cuerpo estriado y la  $\alpha$ -sinucleína en la sustancia negra observada en los animales de control se vieron completamente interrumpidas por la exposición al arsénico a 50, 500, y 5000 ppb. Un análisis de transcriptoma identificó genes específicos y vías canónicas que distinguen el cuerpo estriado, la sustancia negra y el cerebelo entre sí en los animales de control y comparan regiones cerebrales individuales con animales expuestos a arsenito. La exposición crónica al arsenito alteró las transcripciones de las reacciones redox del glutatión y la señalización del receptor de serotonina en el cuerpo estriado, la señalización de la guía axonal, la NF- $\kappa$ B y la señalización de los andrógenos en la sustancia negra y la disfunción mitocondrial, la fosforilación oxidativa, la apoptosis y la señalización de la sirtuina en el cerebelo. Estos datos sugieren que el arsenito afecta los procesos asociados con enfermedades neurodegenerativas de una manera específica en la región del cerebro.

2.- Lucchini et al, 2019 evaluaron el efecto de la coexposición a metales neurotóxicos como arsénico, cadmio, manganeso, mercurio, plomo, selenio y a factores de estrés socioeconómico en un grupo de 299 niños de 6 a 12 años, que residían a una distancia incremental de las emisiones industriales en Taranto, Italia. La exposición se evaluó con un seguimiento biológico y la distancia entre la dirección de la casa y la fuente del punto de exposición. Las funciones cognitivas de los niños se examinaron utilizando la Escala de Inteligencia Wechsler para Niños (WISC) y la Batería Automatizada de Prueba Neuropsicológica de Cambridge (CANTAB). Se eligieron modelos lineales mixtos para evaluar la asociación entre la exposición a metales, el estado socioeconómico y los resultados neurocognitivos. Los resultados mostraron que el arsénico urinario, el cadmio y el manganeso capilar resultaron inversamente relacionados con la distancia de la fuente de emisión industrial ( $\beta$  - 0,04; IC del 95%: -0,06, - 0,01;  $\beta$  - 0,02; IC del 95%: -0,05, - 0,001;  $\beta$  - 0,02 95% CI -0,05, - 0,003) mientras que el cociente intelectual WISC y sus subpuntuaciones (excepto el índice de velocidad de procesamiento) mostraron una asociación positiva con la distancia. Todas las demás pruebas neurocognitivas de CANTAB no mostraron estar significativamente influenciadas por la exposición a metales. El nivel socioeconómico más alto mostró alrededor de cinco puntos de cociente intelectual más que el nivel más bajo en promedio ( $\beta$  4,8; IC del 95%: 0,3, 9,6); el término de interacción entre el plomo en la sangre y el estado socioeconómico mostró un impacto negativo significativo del plomo en la memoria de trabajo en el nivel socioeconómico más bajo ( $\beta$  - 4,0; IC del 95% -6,9, - 1,1). Los autores concluyen que la exposición a metales y la distancia de las emisiones industriales se asoció con impactos cognitivos negativos en estos niños. La exposición al plomo tuvo un efecto neurocognitivo incluso a niveles muy bajos de concentración de plomo en sangre cuando el nivel socioeconómico es

bajo, y esto debería abordar aún más la importancia y priorizar las intervenciones preventivas y reglamentarias.

3.- Zhou et al, 2018 exploraron las características de las interacciones neurotóxicas entre Pb, Cd, As y Hg en las células nerviosas con diseños factoriales. Los resultados mostraron que la coexposición a Pb + Cd + As + Hg tenía un efecto neurotóxico sinérgico que era más severo que el inducido por dos o tres metales, cuando sus metales individuales estaban expuestos al medio ambiente humano (en la sangre de la población de EE. UU.) niveles relevantes y por debajo de los niveles sin efectos adversos observados (NOAEL). Por lo tanto, la coexposición de Pb + Cd + As + Hg a niveles relevantes de exposición ambiental humana se seleccionaron adicionalmente para examinar la homeostasis sináptica como la base celular y molecular del aprendizaje y la memoria. Los autores informaron por primera vez que la coexposición de Pb + Cd + As + Hg inducía disminuciones dependientes de la dosis de las longitudes y ramificaciones dendríticas, así como la densidad de la columna vertebral y el fenotipo maduro en las neuronas del hipocampo primario, y las excrecencias de neuritas estimuladas en NGF- células PC12 diferenciadas. Y la interrupción de la homeostasis sináptica anterior se asoció con la ruta de la proteína activadora de Rap GTPasa (SPAR) asociada a la espina de la quinasa inducida por el suero (Snk). Este estudio sugiere que la coexposición ambiental humana a Pb, Cd, As y Hg tiene el potencial de evocar neurotoxicidad sinérgica incluso si sus metales individuales están por debajo de los NOAEL, lo que refuerza la necesidad de controlar y regular las posibles fuentes de contaminación por metales.

4.- Hsieh et al, 2014 diseñaron un estudio para explorar la diferencia de los índices de capacidad de metilación del arsénico entre niños en edad preescolar con y sin retraso en el desarrollo. También intentaron identificar si los niveles sanguíneos de plomo o mercurio modifican el efecto de los índices de capacidad de metilación del arsénico. Realizaron un estudio transversal desde agosto de 2010 hasta marzo de 2012. Reclutaron 63 niños con retraso en el desarrollo y 35 niños sin retraso en el desarrollo. Se determinaron las especies de arsénico urinario, incluido el arsenito (As (III)), el arsenato (As (V)), el ácido monometilarsónico (MMA (V)) y el ácido dimetilarsónico (DMA (V)) y los niveles de plomo y mercurio de los glóbulos rojos. Todos los participantes se sometieron a evaluaciones de desarrollo para confirmar retrasos en el desarrollo, incluidas evaluaciones de los dominios motor grueso, motor fino, habla y lenguaje, cognición, social y emocional. El porcentaje de arsénico total en orina y MMA (V) se asoció significativamente de manera positiva y el porcentaje de DMA (V) se asoció negativamente con el riesgo de retraso en el desarrollo de una manera dependiente de la dosis después del ajuste de los niveles de plomo o mercurio en sangre y otros factores de riesgo. Un análisis de regresión multivariante indicó que el nivel de plomo en sangre y la capacidad de metilación del arsénico contribuyeron independientemente al riesgo de retraso en el desarrollo. Este es el primer estudio que muestra que la capacidad de metilación del arsénico está asociada con un retraso en el desarrollo, incluso sin una exposición ambiental obvia al arsénico.

5.- Sińczuk-Walczak et al, 2014 realizaron un estudio para determinar el estado del sistema nervioso (SN) en trabajadores expuestos a As en concentraciones que exceden los estándares de

higiene (Valores Límite Umbral (TLV) -  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , Índice de Exposición Biológica (BEI) -  $35 \mu\text{g}/\text{L}$ ) y analizar la relación entre el estado funcional del NS, las especies de As en orina y los niveles de As en el aire laboral. El grupo de estudio estuvo compuesto por 21 hombres empleados en una fundición de cobre y el grupo de control estaba compuesto por 16 hombres, emparejados por edad y turnos de trabajo. Los niveles de arsénico en el aire del lugar de trabajo (As-A) oscilaron entre  $0,7$  y  $92,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La concentración de arsénico total en la orina osciló entre  $17,35$  y  $434,68 \mu\text{g}/\text{L}$ . El síndrome del sistema nervioso periférico (SNP) se manifestó por fatiga de las extremidades (28,6%), dolor en las extremidades (33,3%) y parestesia en las extremidades inferiores (33,3%), así como por mínintomas de tipo neuropatía (23,8%). Las pruebas electroneurográficas (ENeG) de los nervios peroneos mostraron una amplitud de respuesta significativamente disminuida con valores normales de velocidad de conducción motora (MCV). La estimulación de los nervios surales reveló una velocidad de conducción sensorial (SCV) significativamente más lenta y una disminución de la amplitud del potencial sensorial. Los parámetros neurofisiológicos y los resultados del monitoreo biológico y ambiental mostraron una relación entre As (tot), As (III) (arsénico trivalente), la suma de iAs (As (III) + As (V) (arsénico pentavalente)) + MMA (ácido monometilarsónico) concentración en orina y niveles de As en el aire. Los autores concluyen que los resultados del estudio demuestran que la exposición ocupacional a niveles de arsénico inorgánico que exceden los estándares de higiene (TLV, BEI) genera trastornos propios de la neuropatía periférica.

### 11.1.8 Toxicidad

1.- Mingxing et al, 2019 investigaron la toxicidad aguda de diferentes concentraciones de trióxido de arsénico ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ; ATO) en pulmones de rata. En total, 160 ratas Wistar se dividieron aleatoriamente en los grupos de control, dosis baja, media y alta, que fueron expuestas a 0, 0.16, 1.60 y  $16 \mu\text{g}/\text{kg}$  de ATO por instilación intratraqueal, respectivamente. Se recogieron muestras a las 6, 12, 24, 48 y 72 horas después de la exposición y se controlaron los cambios dinámicos indicativos de toxicidad pulmonar aguda. En comparación con el grupo de control, los grupos de exposición mostraron cambios significativos, como un aumento en la proporción de contenido de agua pulmonar y concentración de proteínas en el líquido de lavado broncoalveolar, engrosamiento intersticial pulmonar, edema de la membrana celular, aumento de la concentración de factor inflamatorio, JNK y P38 se activaron significativamente, y la se incrementó el grado de fosforilación. Además, todos los cambios en los grupos de exposición fueron dependientes de la concentración de exposición.

2.- Choi et al, 2018 diseñaron este estudio con el objetivo de predecir los efectos combinados de los metales pesados en aerosol mediante el uso de células humanas in vitro y obtener un modelo de toxicidad de mezcla adecuado. Se seleccionaron arsénico, níquel y plomo para mezclas expuestas a células de cáncer de pulmón humano A549. Se observó la proliferación celular (WST-1), glutatión (GSH) e inhibición de interleucina (IL) -8 y se aplicaron a los modelos de predicción de toxicidad de mezcla, adición de concentración (CA) y acción independiente (IA). Las concentraciones totales de la mezcla se establecieron mediante una relación de toxicidad individual fijada por IC10 para ser más realistas para las pruebas de mortalidad e inhibición

enzimática. Los resultados mostraron que el modelo IA estaba estadísticamente más cerca de los resultados observados que el modelo CA en mortalidad, lo que indica modos de acción diferentes. Para la inhibición de GSH, los resultados predichos por los modelos IA y CA se sobrestimaron mucho en relación con la mortalidad. Mientras tanto, los resultados de IL-8 se mantuvieron estables sin cambios significativos en la reacción inmune relacionada con la inflamación. En conclusión, el modelo IA es un modelo de predicción rápida en mezclas de metales pesados; la mortalidad, como resultado total de la respuesta celular, es una buena herramienta para demostrar la toxicidad combinada en lugar de otras respuestas bioquímicas.

3.-Cullen 2014 en su publicación en base a que la bioconversión del arsénico inorgánico en metabolitos metilados afecta la distribución y retención del arsénico en los tejidos y sus acciones como tóxico o carcinógeno, presenta varios esquemas de reacción para la metilación del arsénico para fomentar una consideración cuidadosa de la plausibilidad química de estos. Aunque se han identificado enzimas que catalizan la metilación de los arsenicales en todas las ramas del árbol de la vida, persisten interrogantes fundamentales sobre los procesos químicos que subyacen a las reacciones que metilan este metaloide.

4.- Schlebusch et al, 2015 en su publicación establece que encontraron que los habitantes de los Andes del norte de Argentina, una región árida donde elevó las concentraciones de arsénico en el agua potable disponible es común, tienen el metabolismo del arsénico único, con la metilación eficiente y la mayor excreción del metabolito arsénico dimetilado y una menor excreción del metabolito monometilado altamente tóxico. Establecieron el genotipo de mujeres de esta población para 4.301.332 de polimorfismos de nucleótido único (SNP) y encontraron una fuerte asociación entre la (arsénico [estado de oxidación +3] metiltransferasa) gen AS3MT y mono- y arsénico dimethylated en la orina, lo que sugiere que las funciones AS3MT como el gen importante para el metabolismo de arsénico en los seres humanos. Encontraron una fuerte diferenciación genética en torno AS3MT en la población Andes argentinos, en comparación con una población altamente relacionada peruana (FST = 0,014) de una región con arsénico mucho menos el medio ambiente. Además, 13 de los 100 SNPs con la más alta Locus-Specific Branch Longitud de todo el genoma se produjo cerca de AS3MT. Además, el análisis de haplotipo homozygosity prolongado indica un barrido selectivo de la población Andes argentinos, a diferencia de Perú y poblaciones colombianas. Los datos muestran que la adaptación a tolerar el arsénico como factor de estrés ambiental probable ha impulsado un aumento en las frecuencias de las variantes de protección de AS3MT, proporcionando la primera evidencia de la adaptación humana a una sustancia química tóxica.

### **11.1.9 Exposición prenatal**

1.- White et al, 2019 realizaron un estudio para Investigar si la exposición prenatal residencial a contaminantes atmosféricos peligrosos de metales pesados (HMHAP) está asociada con un mayor riesgo de hipospadias. Los datos sobre casos de hipospadias no sindrómicos ( n = 8.981) y pacientes de control que nacieron en Texas se obtuvieron del Registro de defectos de nacimiento

de Texas y se emparejaron 1:10 por año de nacimiento. Las concentraciones de exposición promedio de HMHAP se obtuvieron de la Evaluación de Tóxicos del Aire a Escala Nacional de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. De 2005 y se clasificaron en quintiles. Se estimaron las razones de probabilidad y los intervalos de confianza del 95%. Se siguieron las pautas de presentación de informes de STROBE. Los resultados mostraron asociaciones entre hipospadias y exposición prenatal a HMHAP. El manganeso demostró un aumento significativo del riesgo de hipospadias en los quintiles de exposición media, media-alta y alta; plomo en los quintiles de exposición media-alta y alta. El cadmio, el mercurio y el níquel demostraron una asociación significativa en "forma de U" invertida para exposiciones con asociaciones significativas en los quintiles medio y medio-alto, pero no en los quintiles medio-bajo y alto. El arsénico y el cromo demostraron una asociación bivalente significativa para el riesgo de hipospadias en un quintil inferior y en un quintil superior con quintiles intermedios no significativos. Los autores concluyen que utilizando datos de uno de los registros de defectos congénitos de vigilancia activa más grandes del mundo, identificaron asociaciones significativas entre el hipospadias y la exposición a HMHAP. Estos resultados deben utilizarse en el asesoramiento sobre los factores de riesgo demográficos maternos, así como para evitar los metales pesados y sus fuentes.

2.- Nohara et al, 2020 investigaron ampliamente el genoma de los metilomas del ADN del esperma F1 mediante un análisis de resolución de una base utilizando un método de secuenciación de bisulfito de representación reducida (RRBS). Los resultados mostraron que la exposición gestacional al arsénico aumenta las citosinas hipometiladas en todos los cromosomas y están significativamente sobrerrepresentadas en los retrotransposones LINE y LTR, predominantemente en las regiones intergénicas. Un análisis más detallado de las secuencias de ADN anotadas detalladas mostró que las citosinas hipometiladas se acumulan especialmente en las regiones promotoras de la subfamilia L1MdA activa de longitud completa en LINE, y 5'LTR de la subfamilia IAPE activa en LTR. Este es el primer informe que ha identificado las posiciones específicas de los metilomas alteradas en los elementos del retrotransposón por exposición ambiental, mediante análisis de metilomas de todo el genoma. Los autores concluyen que la metilación reducida del ADN mejora potencialmente la retrotransposición de L1MdA y la actividad promotora críptica de 5'LTR para genes codificantes y ARN no codificantes. El presente estudio ha esclarecido los impactos ambientales en el establecimiento del metiloma del ADN de los espermatozoides que puede conducir a un aumento de las actividades de retrotransposón en las células germinales y puede causar efectos nocivos en la siguiente generación.

3.- Valdés et al, 2017 tomaron una muestra de 223 mujeres de cinco servicios de salud pública en Arica, Chile. Los datos sociodemográficos relacionados con la exposición al arsénico y las muestras de orina para las evaluaciones de arsénico inorgánico total se recolectaron durante el segundo trimestre. Los síntomas de depresión posparto se estimaron mediante la escala de depresión posparto de Edimburgo. Examinaron estadísticas descriptivas y realizaron múltiples regresiones lineales. El efecto modificador de la edad y el historial de depresión se evaluó por separado. La mediana del arsénico inorgánico urinario total fue de 14,6  $\mu\text{g} / \text{L}$  (rango: 2-69,2  $\mu\text{g} / \text{L}$ ), la mediana de la puntuación de depresión posparto fue de 8 puntos (rango: 0-27 puntos) y el 20,6% de las mujeres fueron consideradas como posparto deprimido. Para las mujeres

mayores de 25 años sin antecedentes de depresión, el coeficiente ajustado para el logaritmo natural urinario total de arsénico inorgánico en regresiones lineales múltiples fue -2,51 (IC del 95%: -4,54, -0,48; valor de  $p = 0,02$ ). Para las mujeres mayores de 25 años con antecedentes de depresión, este valor fue 2,09 (IC del 95%: -0,90, 5,08; valor de  $p = 0,16$ ). Los autores concluyen que esta cohorte, el número de hijos, la percepción física, el historial de depresión, la maternidad estresante y la edad se asociaron con el puntaje de depresión posparto. La puntuación de Edimburgo se asoció con el arsénico inorgánico en mujeres mayores de 25 años sin antecedentes de depresión.

4.- Valdés et al, 2019 exploraron la asociación entre la exposición prenatal al arsénico inorgánico y el cortisol salival en lactantes de Arica, Chile. Reclutaron un estudio de cohorte de 168 díadas madre-hijo. En el segundo trimestre del embarazo se evaluó el arsénico inorgánico urinario; 18-24 meses después del parto, se midió el cortisol salival en los niños. También se evaluaron el cortisol materno, la depresión materna, el estrés y el estado socioeconómico. La asociación ajustada se estimó con regresión lineal múltiple luego de evaluar la confusión mediante un gráfico acíclico dirigido. La mediana de arsénico inorgánico urinario en mujeres embarazadas fue de 14,1  $\mu\text{g} / \text{L}$  (IQR: 10,4-21,7) mientras que el cortisol salival en los niños fue de 0,17  $\mu\text{g} / \text{L}$  (IQR: 0,11-0,38). Entre los niños de las familias de mayores ingresos ( $> 614 \text{ USD} / \text{mes}$ ), la exposición al arsénico se asoció con el cortisol salival. Los niños en el tercer cuartil de exposición a arsénico tenían -0,769 unidades del logaritmo de cortisol salival, en comparación con los del primer cuartil ( $p = 0,045$ ). Los autores concluyen que la exposición prenatal al arsénico se asoció con el cortisol salival (tercer cuartil de arsénico inorgánico), solo en lactantes pertenecientes a los estratos de mayores ingresos ( $> 614 \text{ USD}$ ). Se necesitan más estudios para confirmar estos resultados preliminares.

#### 11.1.10 Sistema inmunológico

1.- Burchiel et al, 2020 examinaron la relación entre la exposición al arsénico y la proliferación de células T (TCP), una medida de la respuesta inmune y la vitamina D circulante entre hombres y mujeres adultos en Bangladesh. La exposición al arsénico se evaluó utilizando arsénico total en orina, así como metabolitos de arsénico en orina, todos ajustados para la creatinina urinaria. El TCP se midió ex vivo en células mononucleares de sangre periférica criopreservadas de 614 participantes adultos inscritos en el Estudio longitudinal sobre los efectos del arsénico en la salud de Bangladesh; También se evaluó la vitamina D en suero. La influencia del tabaquismo en la modulación del TCP inducida por el arsénico se evaluó solo en hombres, ya que había un número inadecuado de mujeres fumadoras. El estudio muestra que el arsénico suprimió el TCP en los hombres. La asociación fue significativamente fuerte en los hombres fumadores y, en menor medida, en los hombres no fumadores. Curiosamente, encontraron un fuerte efecto protector de niveles altos/suficientes de VitD en suero sobre el TCP entre los hombres no fumadores. Además, entre los fumadores masculinos con vitamina D sérica baja ( $\leq 20 \text{ ng} / \text{ml}$ ), encontraron una fuerte supresión de TCP por el arsénico. Por otro lado, una alta VitD ( $> 20 \text{ ng} / \text{ml}$ ) atenúa los efectos del arsénico sobre el TCP entre los hombres fumadores. En general, los autores

encontraron un fuerte efecto protector de la vitamina D, cuando los niveles séricos eran > 20 ng/ml, sobre la inhibición del TCP inducida por el arsénico en los hombres, independientemente del estado de tabaquismo.

2.- Wu et al, 2018 investigaron el contenido de arsénico, cadmio y plomo de los hombres en muestras de cabello y sus asociaciones con indicadores inmunológicos, incluidos los recuentos de glóbulos blancos (WBC), linfocitos y monocitos, y los niveles de inmunoglobulina (Ig), incluidos IgA, IgG e IgE. Reclutaron a 133 hombres trabajadores de plantas de fabricación de trióxido de antimonio, de vidrio y de plásticos. La concentración media de Cd [0,16 (SD = 0,03) ug/g] fue menor que la media de As [0,86 (SD = 0,16) ug/g] y Pb [0,91 (SD = 0,22) ug/g] en muestras de cabello, no ejerciendo ninguna relación con las funciones inmunológicas del Cd. El análisis de correlación mostró una relación positiva entre el recuento de monocitos y los niveles de Pb en el cabello, pero relaciones negativas entre As e IgG y entre As e IgE. En conclusión, los hallazgos de estos trabajadores de la industria sugieren que los niveles de As en el cabello pueden tener una relación más fuerte con la función inmunológica que el Cd y el Pb. Se necesita más investigación para confirmar la relación negativa.

3.- Erdei et al, 2019 evaluaron autoanticuerpos específicos entre los residentes de la Nación Navajo en Nuevo México expuestos crónicamente a mezclas de metales de desechos de minas de uranio y en suministros de agua potable. La edad y el grado de exposición a los desechos heredados de 100 minas y molinos de uranio abandonados se asociaron con anticuerpos contra el ADN desnaturalizado, que anteriormente se sabía que era un indicador temprano de autoinmunidad inducida por medicamentos. Sorprendentemente, los autoanticuerpos contra el ADN nativo y/o la cromatina también se relacionaron con la exposición ambiental, específicamente el consumo de uranio a través del agua potable tanto para hombres como para mujeres, mientras que el arsénico urinario se asoció negativamente con estos autoanticuerpos en las mujeres. Estos hallazgos sugieren que los contaminantes derivados de los desechos de las minas de uranio mejoraron el desarrollo de autoanticuerpos en algunas personas, mientras que el arsénico puede ser inmunosupresor a nivel mundial con efectos específicos de género. Los autoanticuerpos específicos pueden ser un indicador sensible de perturbación inmunológica por tóxicos ambientales, un efecto adverso que no se considera en las normas vigentes para el agua potable o en las evaluaciones regulatorias de evaluación de riesgos.

4.- Xu et al, 2018

Utilizaron los macrófagos derivados de la línea celular de monocitos humanos THP-1 como modelo experimental para estudiar la supresión funcional inducida por el arsenito (As + 3), una de las formas más prevalentes de arsénico inorgánico, en condiciones ambientales relevantes. Se observó apoptosis en los macrófagos derivados de THP-1 tratados con As + 3 500 nM durante 18 h. La supresión de la fagocitosis se indujo mediante un tratamiento de 18 h con As + 3 a partir de 100 nM. También se encontraron efectos supresores sobre la producción de dos citocinas proinflamatorias, IL-1 $\beta$  y TNF- $\alpha$ , con el tratamiento de dosis bajas a moderadas de As + 3 en macrófagos derivados de THP-1 estimulados por lipopolisacáridos. La producción de óxido nítrico también fue inhibida por los tratamientos con As + 3, lo que se correlacionó

negativamente con la producción de superóxido. En conjunto, los resultados del estudio demostraron que las concentraciones ambientalmente relevantes de As + 3 inducían citotoxicidad y suprimían las principales funciones celulares en los macrófagos derivados de THP-1. Se demostró que los macrófagos eran relativamente sensibles al As + 3 y podrían ser el objetivo esencial de la toxicidad inducida por la exposición ambiental al arsénico.

#### 11.1.11 Sistema cardiovascular

1.- Wang et al, 2020 realizaron un análisis de series de tiempo para evaluar las asociaciones de los constituyentes PM 2.5 (dos fracciones carbonáceas, ocho iones inorgánicos solubles en agua y quince elementos) con la mortalidad cardiovascular diaria (MCD) en Shanghai, China, desde 2014 hasta 2016. Los resultados mostraron que las estimaciones del efecto para las asociaciones de PM 2.5 y sus componentes con mortalidad por MCD fueron generalmente más fuertes cuando se utilizaron las exposiciones de las concentraciones de los dos días anteriores. Las asociaciones de carbono orgánico, sulfato, amoníaco, potasio, cobre, arsénico y plomo con la mortalidad diaria por MCD fueron robustas al ajuste de la masa total de PM 2.5, su colinealidad con la masa total de PM 2.5 y los contaminantes atmosféricos gaseosos criterio. Un aumento del rango intercuartílico en las concentraciones de PM 2.5 de los dos días anteriores, el carbono orgánico, el sulfato, el amoníaco, el potasio, el cobre, el arsénico y el plomo se asociaron con incrementos significativos del 2,21% (intervalo de confianza del 95% [IC del 95%]: 0,54%, 3,88%), 2,83% (IC del 95%: 1,16 %, 4,50%), 1,90% (IC del 95%: 0,35%, 3,45%), 2,29% (IC del 95%: 0,80%, 3,77%), 0,94% (IC del 95%: 0,13%, 1,75%), 1,53% (IC del 95%: 0,37%, 2,69%), 2,08% (IC del 95%: 0,49%, 3,68%) y 1,98% (IC del 95%: 0,49%, 3,47%) en la mortalidad diaria por ECV, respectivamente, en un solo contaminante modelos. En conclusión, este estudio sugirió que el carbono orgánico, el sulfato, el amoníaco, el potasio, el cobre, el arsénico y el plomo podrían ser los principales responsables de las asociaciones entre las exposiciones a PM 2.5 a corto plazo y el aumento de la mortalidad por MCD en Shanghai, China.

2.- Ledda et al, 2018 desarrollaron un estudio transversal que tuvo como objetivo comparar los perfiles de lípidos, lipoproteínas y apolipoproteínas en suero en trabajadores expuestos a As. Los sujetos de este estudio incluyeron 57 trabajadores expuestos a As y 57 controles. Las características demográficas y la información ocupacional se recopilaron a través de cuestionarios. La exposición al As se evaluó en el aire interior de un lugar de trabajo y se determinó utilizando los valores de creatinina en la orina. Se recolectaron muestras de sangre mediante inmunoquímica y nefelometría para medir los niveles de colesterol total (CHOL), triglicéridos (TRIG), lipoproteína de alta densidad (HDL), lipoproteína de baja densidad (LDL), lipoproteína (a) (Lp (a)), apolipoproteína-A1 (Apo-A1) y apolipoproteína-B (Apo-B). No se detectaron diferencias significativas en los datos demográficos entre los dos grupos. La concentración de As urinario fue significativamente ( $p < 0,001$ ) más alta en los sujetos expuestos que en los controles ( $13,4 \pm 6,1$  y  $4,4 \pm 6,1$   $\mu\text{g} / \text{gCreat}$ , respectivamente). No se observaron diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones de CHOL, TRIG, HDL y LDL entre los dos grupos. Los valores de la relación Lp (a), Apo-B y Apo-B / Apo-A1 fueron significativamente

más altos y el nivel de Apo-A1 fue significativamente más bajo en el grupo expuesto que en los sujetos de control. El análisis de regresión destacó una asociación significativa ( $p < 0,001$ ) entre As urinario y Lp (a), concentración de Apo-A1 y Apo-B, y la relación Apo-B / Apo-A1. Este estudio reveló la influencia del As sobre las apolipoproteínas, lo que sugiere un riesgo potencial de enfermedades cardiovasculares en sujetos expuestos a niveles bajos de As.

### 11.1.12 Reproducción

1.- Wang et al, 2016 desarrollaron un estudio con el objetivo de investigar la relación entre la exposición al arsénico ambiental no geogénico y el riesgo de infertilidad masculina inexplicable (UMI por su sigla en inglés). Se reclutaron 101 hombres infértiles con semen normal como casos y 61 hombres fértiles como controles. 5 especies de arsénico urinario: arsenato pentavalente (Asi (V)), arsenito trivalente (Asi (III)), metilado a ácido monometilarsónico (MMA (V)), ácido dimetilarsínico (DMA (V)), arsenobetaína (AsB) se midieron cuantitativamente mediante cromatografía líquida-espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (LC-ICP-MS). Para evaluar la calidad del semen, se midieron el volumen de semen, la concentración de espermatozoides, la motilidad total y la motilidad progresiva. Se utilizó la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney para comparar las diferencias de las especies de arsénico y el índice entre el caso y el grupo de control; observaron PMI que las concentraciones de Asi (V), AsB, MMA (V), DMA (V), As inorgánico total y As total fueron significativamente mayores en los casos que en los controles. El nivel de Asi (V) en orina aumentó más de veinte veces en el grupo de casos. Además, se observó un índice redox más alto (Asi (V) / Asi (III)) y un índice de metilación de arsénico primario (PMI) más bajo ( $PMI = MMA (V) / Asi$ ) para el grupo de casos. Además, a través del análisis de regresión logística, observamos que el nivel de Asi (V) en orina y el PMI se asociaron más significativamente con el riesgo de UMI entre las observaciones. Específicamente, en comparación con el primer cuartil, los sujetos con niveles más altos de Asi (V) eran más propensos a exhibir UMI con un aumento de los odds ratios ajustados (AOR) (ajustados por edad, índice de masa corporal, consumo de alcohol y tabaquismo) de 8,39 [Intervalo de confianza (IC) del 95%, 2,59-27,17], 13,12 (IC del 95%, 3,44-50,12) y 36,51 (IC del 95%, 8,25-161,66) en el segundo, tercer y cuarto cuartiles, respectivamente. También se observó una disminución de la AOR dependiente de la concentración para el PMI en comparación con el cuarto cuartil: 15,43 [IC del 95%, 4,28-55,69], 9,69 (IC del 95%, 2,78-33,78) y 6,93 (IC del 95%, 2,21- 21,76) en el primer, segundo y tercer cuartil, respectivamente.

2.- Tian et al, 2021 determinaron las asociaciones entre la exposición ambiental al arsénico y la eliminación de hormonas sexuales urinarias y la esteroidogénesis de células de Leydig in vitro. Concentraciones de arsénico y testosterona (T), estradiol (E 2) y progesterona (P) en muestras repetidas de orina se determinaron entre 451 hombres en edad reproductiva. Además, se diseñó un experimento de esteroidogénesis de células de Leydig MLTC-1 in vitro para simular escenarios del mundo real de baja exposición humana. Se utilizaron modelos de regresión lineal multivariable para evaluar las asociaciones de los niveles de arsénico urinario con las hormonas urinarias. Las concentraciones urinarias de arsénico se asociaron positivamente con las hormonas

sexuales urinarias (T, E 2, y P) niveles. Una prueba in vitro demostró además que un rango de exposición ambiental basado en la población (0,01-5  $\mu$ M) de arsénico inducía la potencia de la esteroidogénesis de las células de Leydig. Los resultados indican que la exposición a dosis bajas de arsénico exhibe un efecto de alteración endocrina al estimular la esteroidogénesis de las células de Leydig y acelerar la excreción urinaria de esteroides, lo que amplía el conocimiento previo de la asociación inversa de la exposición a dosis altas de arsénico con la producción de esteroides sexuales que se supone que es antiandrógeno.

3.- Xu et al, 2012 monitorearon el perfil de la especie As en la orina de una cohorte humana en edad reproductiva y evaluaron su asociación con la calidad del semen. Los hombres (n = 96) fueron reclutados en una clínica de infertilidad desde julio de 2009 hasta agosto de 2010. Se analizaron cinco especies de As urinarias mediante cromatografía líquida de alta resolución acoplada con espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (HPLC-ICP-MS). Se empleó información clínica sobre el volumen de semen, la concentración de espermatozoides y la motilidad para catalogar y evaluar la calidad del semen de acuerdo con las directrices de la OMS. Los resultados mostraron que las concentraciones urinarias (media geométrica  $\pm$  DE,  $\mu$ g g<sup>-1</sup> creatinina) de diferentes especies de As fueron 7,49 ( $\pm$  24,8) para AsB, 20,9 ( $\pm$  13,7) para DMA, 2,77 ( $\pm$  3,33) para MMA y 4,03 ( $\pm$  3,67) para Asi (Asi (III) y Asi (V)). Las concentraciones de DMA por encima de la mediana se asociaron significativamente con concentraciones de esperma por debajo de la referencia (P = 0,02) después de ajustar por edad, índice de masa corporal (IMC), abstinencia, hábitos de fumar y beber. Además, fumar se asoció positivamente con MMA. Los autores concluyen que los parámetros reducidos en la calidad del semen humano se asocian positivamente con la exposición al As en una cohorte china en edad reproductiva.

### 11.1.13 Función hepática

1.- Huang et al realizaron un estudio con el objetivo de investigar los efectos de la exposición a múltiples metales pesados tóxicos, arsénico (As), plomo (Pb) y cadmio (Cd), sobre la función hepática a través de estudios en animales y en poblaciones. Se inscribió un total de 3.590 participantes de las áreas mineras de la provincia de Hunan occidental. Las concentraciones de As, Pb y Cd en las muestras de orina y plasma se determinaron usando espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente cuadrupolo (ICP-MS). Para el ensayo de asociación conjunta se utilizó la Bayesian kernel machine regression (BKMR). Se realizó un estudio en animales para verificar aún más los efectos acumulativos de los metales sobre los parámetros relacionados con el daño hepático, como los niveles de alanina aminotransferasa (ALT), aspartato aminotransferasa (AST) y lactato deshidrogenasa (LDH). También se exploraron las tendencias de investigación con respecto a los metales tóxicos para obtener una comprensión profunda del conocimiento actual en este campo. Para el análisis de exposición única, en la mayoría de las minas, el Pb mostró una asociación significativamente negativa con los niveles de ALT, mientras que para el análisis de efectos acumulativos, cuando las concentraciones de As, Pb y Cd estaban en el percentil 50, se produjo un efecto significativamente negativo sobre los niveles de ALT en el hígado. observado. Además, los estudios en animales han demostrado que la coexposición a

As, Pb y Cd podría agravar la disfunción hepática en ratones en comparación con la del grupo tratado con un solo metal ( $p < 0,05$ ).

2.- Casale et al, 2014 realizaron un estudio con el objetivo de evaluar si la exposición al arsénico provoca alteraciones de las enzimas hepáticas en dos grupos de trabajadores al aire libre. Se midieron el As urinario total y los niveles de dos enzimas (AST/GOT y ALT/GPT) en 80 policías de tránsito y 50 conductores de policía. Se obtuvieron muestras personales de aire para evaluar la exposición al As en un subgrupo de 20 policías de tránsito y 20 policías conductores.

Los resultados mostraron que los valores medios de exposición personal a As, As urinario, y las enzimas AST/GOT y ALT/GPT fueron significativamente mayores en los policías de tránsito que en los policías conductores. Los modelos de regresión lineal múltiple mostraron asociaciones entre el As urinario y el As aerotransportado, la ALT / GPT y las variables laborales, y el IMC y el As urinario. Los autores concluyen que los hallazgos contribuyen a la evaluación de los efectos hepáticos de la exposición al As en los trabajadores urbanos.

#### 11.1.14 Sistema endocrino

1.- Tian et al, 2020 determinaron las asociaciones entre la exposición ambiental al arsénico y la eliminación de hormonas sexuales urinarias y la esteroidogénesis de células de Leydig in vitro. Concentraciones de arsénico y testosterona (T), estradiol (E 2) y progesterona (P) en muestras repetidas de orina se determinaron entre 451 hombres en edad reproductiva. Además, se diseñó un experimento de esteroidogénesis de células de Leydig MLTC-1 in vitro para simular escenarios del mundo real de baja exposición humana. Se utilizaron modelos de regresión lineal multivariable para evaluar las asociaciones de los niveles de arsénico urinario con las hormonas urinarias. Las concentraciones urinarias de arsénico se asociaron positivamente con las hormonas sexuales urinarias (T, E 2, y P) niveles. Una prueba in vitro demostró además que un rango de exposición ambiental basado en la población (0,01-5  $\mu\text{M}$ ) de arsénico inducía la potencia de la esteroidogénesis de las células de Leydig. Nuestros resultados indican que la exposición a dosis bajas de arsénico exhibe un efecto de alteración endocrina al estimular la esteroidogénesis de las células de Leydig y acelerar la excreción de esteroides urinarios, lo que amplía el conocimiento previo de la asociación inversa de la exposición a dosis altas de arsénico con la producción de esteroides sexuales que se supone que es antiinflamatoria. andrógino.

2.-Ciarrocca et al, 2012 evaluaron la asociación entre la exposición personal al arsénico y los niveles de hormonas TSH, fT4, fT3 y Tg en trabajadores urbanos y rurales. Obtuvieron marcadores de tiroides y arsénico urinario total de 108 policías de tránsito no fumadores y 77 sujetos que trabajaban como obreros en una zona rural. 50 sujetos fueron monitoreados para evaluar la exposición al arsénico en el aire. El valor medio de exposición al arsénico fue de 2,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en los policías de tránsito, mientras que el valor medio fue menor de 0,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en los caminos. Los valores medios de arsénico urinario (10,4  $\mu\text{g}/\text{g}$  de creatinina frente a 5,2  $\mu\text{g}/\text{g}$  de creatinina;  $p = 0,000$ ), TSH (1,6  $\mu\text{IU} / \text{ml}$  frente a 1,3  $\mu\text{IU} / \text{ml}$ ;  $p = 0,006$ ), fT3 (3,5  $\text{pg}/\text{ml}$  frente a 3,7  $\text{pg}/\text{ml}$ ;  $p = 0,000$ ), fT4 (1,2  $\text{ng}/\text{dl}$  frente a 1,3  $\text{ng}/\text{dl}$ ;  $p = 0,000$ ) y Tg (42,8  $\text{ng}/\text{ml}$  frente a 36,1  $\text{ng}/\text{ml}$ ;  $p = 0,04$ )

fueron significativamente diferentes entre policías de tránsito y caminos. En los policías de tránsito, el arsénico urinario y el arsénico en el aire se correlacionaron con los valores de partículas de arsénico en el aire y TSH, respectivamente. El arsénico urinario se correlacionó con los valores de TSH, Tg, fT3 y fT4. Los modelos de regresión lineal múltiple mostraron las siguientes asociaciones: i) entre arsénico urinario, arsénico en el aire y cargo; ii) entre TSH, fT3, Tg y arsénico urinario; y iii) entre fT4 y la ingesta urinaria de arsénico y alcohol. Los autores concluyen que estos resultados proporcionan información sobre la relación entre la exposición al arsénico y los marcadores de la tiroides y pueden ser útiles para otras categorías de trabajadores al aire libre que están expuestos de manera similar.

### 11.1.15 Otros efectos

1.- Khlifi et al, 2015 desarrollaron un estudio que tuvo como objetivo explorar la relación entre los niveles de metales en sangre y el riesgo de poliposis nasal (NP). Se reclutaron 90 pacientes con NP y 171 controles y se analizaron muestras de sangre para determinar las concentraciones de As y Cr. Los niveles de metal de As en sangre en los pacientes (2,1 µg/L) fueron significativamente más altos que los de los controles (1,2 µg/L). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en los niveles de Cr en sangre entre casos y controles. Los niveles de arsénico en sangre de los fumadores de cigarrillos fueron significativamente más altos que los de los no fumadores. La exposición ambiental y el consumo de shisha presentaron la asociación más significativa con la enfermedad NP (OR = 10.1 y 14.1, respectivamente). Los niveles altos de As en sangre se asociaron significativamente con la enfermedad NP (OR = 2,1). Se encontró que los niveles de Cr en sangre estaban asociados con las cuatro etapas de los pólipos en ambas cavidades nasales. Este estudio encontró una fuerte asociación entre la enfermedad de poliposis nasal y los niveles sanguíneos de As.

2.- Gianicolo et al, 2019 realizaron un estudio con el objetivo de analizar la mortalidad de trabajadores que realizaron actividades de limpieza de una planta petroquímica que liberó arsénico a la atmósfera debido a un accidente en Italia en 1976.

La cohorte estuvo compuesta por 1467 trabajadores agrupados en trabajadores por contrato, fertilizantes y plásticos. El resultado de interés fue la mortalidad por causas específicas. Se calcularon las razones de mortalidad estandarizadas (SMR) y los intervalos de confianza del 95% (IC del 95%).

Los resultados mostraron que todos los trabajadores y todas las causas de muerte combinadas, el SMR fue menor a 1.0. Las tasas de mortalidad aumentaron para las neoplasias malignas de la pleura, los huesos y el melanoma de la piel. Los trabajadores subcontratados, el grupo mayormente expuesto al arsénico, mostraron SMR estadísticamente significativos para varias neoplasias malignas, en particular para el cáncer de pulmón (SMR = 1,26; IC del 95%: 1,05-1,54). Los autores concluyen que los resultados reportados sobre la mortalidad entre las personas expuestas ocupacionalmente al arsénico son consistentes con la literatura y biológicamente plausibles.

### 11.1.16 Tecnologías de mitigación

He et al, 2021 investigaron el comportamiento para la eliminación de arsénico gaseoso en los gases de combustión. El óxido binario exhibió un efecto sinérgico notable para la eliminación de arsénico en comparación con el óxido monometálico Mn o Fe. Los posibles efectos del CO<sub>2</sub>, NO, SO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> sobre el desempeño de remoción también se estudiaron. La capacidad de adsorción fue excelente y estable en condiciones de gas de combustión simuladas. Se aplicaron sistemas de acoplamiento de espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) y cromatografía líquida de alto rendimiento, espectroscopía de fluorescencia atómica (HPLC-AFS) para analizar las especies de arsenicales adsorbidos en la superficie y arsenicales solubles. Se confirmó que el buen desempeño de sorción resultó de la oxidación de As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (As (III)) a As<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (As (V)) por óxido de Mn y seguido de una adsorción eficiente de As (V) sobre óxido de Fe. Teniendo en cuenta que la toxicidad de los arsenicales pentavalentes es menor que la de los arsenicales trivalentes, la oxidación de los compuestos de arsénico no solo puede mejorar su capacidad de eliminación, sino también disminuir la toxicidad de los arsenicales después de la captura.

## 11.2 Anexo 2: Riesgos individuales y sociales estimados

A continuación, se presentan los riesgos individuales y sociales asociados a la concentración de los contaminantes estudiados para diferentes efectos en la salud en distintos grupos etarios.

**Tabla 11-2 Riesgos asociados a la concentración de contaminantes por tipo de efecto y grupo etario [casos/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]**

Fuente	Localidades	Contaminantes	Beneficios	Tipo_de_FEC <sup>1</sup>	Concentración	Beneficio individual	Beneficio social	
Chuquicamata	Calama	As	CAN-RSP-All	Fugitiva	As	6,54E-09	0,0012	
				Puntual	As	5,86E-09	0,0011	
		MP	ERV-Asth-All	Indeterminado	MP2.5		1,83E-05	3,3710
						HA-Asth-<65	8,57E-08	0,0141
						HA-CLD-18-64	1,28E-07	0,0158
						HA-CVD-18-64	2,01E-06	0,2489
						HA-CVD-65+	1,79E-05	0,3593
						HA-RSP-65+	8,38E-06	0,1682
						Mort-All-30+	1,53E-05	1,7770
						WLD-All-18-64	1,51E-04	18,6800
		SO2	ERV-Asth-All	Indeterminado	MP2.5		1,02E-06	0,1877
						HA-Asth-<65	4,77E-09	0,0008
						HA-CLD-18-64	7,13E-09	0,0009
						HA-CVD-18-64	1,12E-07	0,0139
						HA-CVD-65+	9,97E-07	0,0200

	<b>ChiuChiu</b>		<b>HA-RSP-65+</b>	Indeterminado	MP2.5	4,67E-07	0,0094		
			<b>Mort-All-30+</b>	Indeterminado	MP2.5	8,52E-07	0,0989		
			<b>WLD-All-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5	8,41E-06	1,0400		
		As	<b>CAN-RSP-All</b>	Fugitiva	As	4,20E-10	0,0000		
				Puntual	As	5,52E-10	0,0000		
		MP	<b>ERV-Asth-All</b>	Indeterminado	MP2.5	4,04E-06	0,0015		
				<b>HA-Asth-&lt;65</b>	Indeterminado	MP2.5	1,89E-08	0,0000	
				<b>HA-CLD-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5	2,83E-08	0,0000	
				<b>HA-CVD-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5	4,44E-07	0,0001	
				<b>HA-CVD-65+</b>	Indeterminado	MP2.5	3,95E-06	0,0002	
				<b>HA-RSP-65+</b>	Indeterminado	MP2.5	1,85E-06	0,0001	
				<b>Mort-All-30+</b>	Indeterminado	MP2.5	3,38E-06	0,0008	
				<b>WLD-All-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5	3,33E-05	0,0084	
				SO2	<b>ERV-Asth-All</b>	Indeterminado	MP2.5	6,55E-08	0,0000
						<b>HA-Asth-&lt;65</b>	Indeterminado	MP2.5	3,06E-10
		<b>HA-CLD-18-64</b>	Indeterminado			MP2.5	4,58E-10	0,0000	
		<b>HA-CVD-18-64</b>	Indeterminado			MP2.5	7,20E-09	0,0000	
		<b>HA-CVD-65+</b>	Indeterminado			MP2.5	6,41E-08	0,0000	
		<b>HA-RSP-65+</b>	Indeterminado			MP2.5	3,00E-08	0,0000	
		<b>Mort-All-30+</b>	Indeterminado			MP2.5	5,47E-08	0,0000	
<b>WLD-All-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5	5,40E-07			0,0001			
<b>Altonorte</b>	<b>Antofagasta</b>	As	<b>CAN-RSP-All</b>	Fugitiva	As	3,22E-09	0,0014		
				Puntual	As	1,87E-09	0,0008		
		MP	<b>ERV-Asth-All</b>	Indeterminado	MP2.5	1,60E-05	6,8910		

			HA-Asth-<65	Indeterminado	MP2.5	1,09E-07	0,0411	
			HA-CLD-18-64	Indeterminado	MP2.5	6,73E-08	0,0195	
			HA-CVD-18-64	Indeterminado	MP2.5	1,67E-06	0,4846	
			HA-CVD-65+	Indeterminado	MP2.5	1,42E-05	0,7631	
			HA-RSP-65+	Indeterminado	MP2.5	5,18E-06	0,2780	
			Mort-All-30+	Indeterminado	MP2.5	1,94E-05	5,2760	
			WLD-All-18-64	Indeterminado	MP2.5	1,32E-04	38,2500	
			SO2	ERV-Asth-0-14	Indeterminado	SO2	1,84E-05	1,3450
			ERV-Asth-65+	Indeterminado	SO2	4,04E-05	2,1670	
			HA-RSP-65+	Indeterminado	SO2	9,51E-07	0,0510	
	La Negra	As		CAN-RSP-All	Fugitiva	As	1,26E-08	0,0000
					Puntual	As	4,95E-10	0,0000
		MP		ERV-Asth-All	Indeterminado	MP2.5	6,28E-05	0,0255
				HA-Asth-<65	Indeterminado	MP2.5	4,28E-07	0,0002
				HA-CLD-18-64	Indeterminado	MP2.5	2,64E-07	0,0001
				HA-CVD-18-64	Indeterminado	MP2.5	6,57E-06	0,0018
				HA-CVD-65+	Indeterminado	MP2.5	5,58E-05	0,0028
				HA-RSP-65+	Indeterminado	MP2.5	2,03E-05	0,0010
				Mort-All-30+	Indeterminado	MP2.5	7,63E-05	0,0195
				WLD-All-18-64	Indeterminado	MP2.5	5,19E-04	0,1413
	SO2		ERV-Asth-0-14	Indeterminado	SO2	4,98E-05	0,0034	
			ERV-Asth-65+	Indeterminado	SO2	1,10E-04	0,0055	

Potrerillos	El Salvador	As	HA-RSP-65+	Indeterminado	SO2	2,58E-06	0,0001
			CAN-RSP-All	Fugitiva	As	3,61E-09	0,0000
		Puntual		As	2,76E-09	0,0000	
		MP	ERV-Asth-All	Indeterminado	MP2.5	3,48E-05	0,1876
			HA-Asth-<65	Indeterminado	MP2.5	1,14E-06	0,0053
			HA-CLD-18-64	Indeterminado	MP2.5	7,88E-07	0,0027
			HA-CVD-18-64	Indeterminado	MP2.5	3,14E-06	0,0107
			HA-CVD-65+	Indeterminado	MP2.5	4,16E-05	0,0298
			HA-RSP-65+	Indeterminado	MP2.5	3,24E-05	0,0232
			Mort-All-30+	Indeterminado	MP2.5	3,65E-05	0,1257
			WLD-All-18-64	Indeterminado	MP2.5	2,87E-04	0,9763
		SO2	ERV-Asth-0-14	Indeterminado	SO2	5,82E-05	0,0622
			ERV-Asth-65+	Indeterminado	SO2	1,28E-04	0,0918
			HA-RSP-65+	Indeterminado	SO2	8,69E-06	0,0062
		Potrerillo	As	CAN-RSP-All	Fugitiva	As	2,78E-08
	Puntual				As	1,00E-08	#N/A
	MP		ERV-Asth-All	Indeterminado	MP2.5	2,67E-04	#N/A
			HA-Asth-<65	Indeterminado	MP2.5	8,73E-06	#N/A
			HA-CLD-18-64	Indeterminado	MP2.5	6,06E-06	#N/A
			HA-CVD-18-64	Indeterminado	MP2.5	2,41E-05	#N/A
			HA-CVD-65+	Indeterminado	MP2.5	3,20E-04	#N/A
			HA-RSP-65+	Indeterminado	MP2.5	2,49E-04	#N/A
			Mort-All-30+	Indeterminado	MP2.5	2,81E-04	#N/A
WLD-All-18-64			Indeterminado	MP2.5	2,21E-03	#N/A	

Hernán Videla Lira	Copiapo	SO2	ERV-Asth-0-14	Indeterminado	SO2	4,48E-04	#N/A	
			ERV-Asth-65+	Indeterminado	SO2	9,85E-04	#N/A	
			HA-RSP-65+	Indeterminado	SO2	6,68E-05	#N/A	
	Tierra Amarilla	As	CAN-RSP-All	Fugitiva	As	2,30E-07	0,0384	
				Puntual	As	6,72E-08	0,0112	
		MP	SO2	ERV-Asth-All	Indeterminado	MP2.5	2,89E-04	48,1600
				HA-Asth-<65	Indeterminado	MP2.5	9,54E-07	0,1339
				HA-CLD-18-64	Indeterminado	MP2.5	2,08E-06	0,2172
				HA-CVD-18-64	Indeterminado	MP2.5	2,65E-05	2,7630
				HA-CVD-65+	Indeterminado	MP2.5	2,69E-04	7,1100
				HA-RSP-65+	Indeterminado	MP2.5	9,57E-05	2,5260
				Mort-All-30+	Indeterminado	MP2.5	2,94E-04	30,3100
				WLD-All-18-64	Indeterminado	MP2.5	2,38E-03	248,9000
		MP	SO2	ERV-Asth-0-14	Indeterminado	SO2	6,16E-04	18,4400
				ERV-Asth-65+	Indeterminado	SO2	1,36E-03	35,7900
				HA-RSP-65+	Indeterminado	SO2	3,27E-05	0,8625
		MP	As	CAN-RSP-All	Fugitiva	As	1,35E-07	0,0014
					Puntual	As	2,83E-07	0,0029
				ERV-Asth-All	Indeterminado	MP2.5	1,69E-04	1,7190
				HA-Asth-<65	Indeterminado	MP2.5	5,58E-07	0,0049
				HA-CLD-18-64	Indeterminado	MP2.5	1,22E-06	0,0078
HA-CVD-18-64	Indeterminado			MP2.5	1,55E-05	0,0993		
HA-CVD-65+	Indeterminado			MP2.5	1,58E-04	0,2538		
HA-RSP-65+	Indeterminado	MP2.5	5,60E-05	0,0902				

		SO2	<b>Mort-All-30+</b>	Indeterminado	MP2.5	1,72E-04	1,0720
			<b>WLD-All-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5	1,40E-03	8,9390
			<b>ERV-Asth-0-14</b>	Indeterminado	SO2	5,08E-04	0,9652
			<b>ERV-Asth-65+</b>	Indeterminado	SO2	1,12E-03	1,7970
			<b>HA-RSP-65+</b>	Indeterminado	SO2	2,69E-05	0,0433
<b>Ventanas</b>	<b>Puchuncaví</b>	As	<b>CAN-RSP-All</b>	Fugitiva	As	1,88E-08	0,0001
				Puntual	As	1,26E-08	0,0001
		MP	<b>ERV-Asth-All</b>	Indeterminado	MP2.5	1,54E-03	10,2000
			<b>HA-Asth-&lt;65</b>	Indeterminado	MP2.5	1,15E-05	0,0585
			<b>HA-CLD-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5	1,18E-05	0,0453
			<b>HA-CVD-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5	1,77E-04	0,6827
			<b>HA-CVD-65+</b>	Indeterminado	MP2.5	1,79E-03	2,7740
			<b>HA-RSP-65+</b>	Indeterminado	MP2.5	6,51E-04	1,0120
			<b>Mort-All-30+</b>	Indeterminado	MP2.5	2,26E-03	10,3100
			<b>WLD-All-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5	1,27E-02	48,7700
		SO2	<b>ERV-Asth-All</b>	Indeterminado	MP2.5	1,12E-05	0,0742
			<b>HA-Asth-&lt;65</b>	Indeterminado	MP2.5	8,35E-08	0,0004
			<b>HA-CLD-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5	8,56E-08	0,0003
			<b>HA-CVD-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5	1,29E-06	0,0050
			<b>HA-CVD-65+</b>	Indeterminado	MP2.5	1,30E-05	0,0202
			<b>HA-RSP-65+</b>	Indeterminado	MP2.5	4,73E-06	0,0074
			<b>Mort-All-30+</b>	Indeterminado	MP2.5	1,64E-05	0,0749

	<b>Quintero</b>	As	<b>WLD-All-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5	9,21E-05	0,3545	
			<b>CAN-RSP-All</b>	Fugitiva	As	9,38E-08	0,0032	
		Puntual		As	2,59E-08	0,0009		
		MP		<b>ERV-Asth-All</b>	Indeterminado	MP2.5	1,54E-03	52,3200
				<b>HA-Asth-&lt;65</b>	Indeterminado	MP2.5	1,15E-05	0,3066
				<b>HA-CLD-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5	1,18E-05	0,2348
				<b>HA-CVD-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5	1,77E-04	3,5380
				<b>HA-CVD-65+</b>	Indeterminado	MP2.5	1,79E-03	13,2100
				<b>HA-RSP-65+</b>	Indeterminado	MP2.5	6,51E-04	4,8180
				<b>Mort-All-30+</b>	Indeterminado	MP2.5	2,26E-03	51,1600
				<b>WLD-All-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5	1,27E-02	252,7000
		SO2		<b>ERV-Asth-All</b>	Indeterminado	MP2.5	1,12E-05	0,3802
				<b>HA-Asth-&lt;65</b>	Indeterminado	MP2.5	8,35E-08	0,0022
				<b>HA-CLD-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5	8,56E-08	0,0017
				<b>HA-CVD-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5	1,29E-06	0,0257
	<b>HA-CVD-65+</b>			Indeterminado	MP2.5	1,30E-05	0,0960	
	<b>HA-RSP-65+</b>			Indeterminado	MP2.5	4,73E-06	0,0350	
	<b>Mort-All-30+</b>			Indeterminado	MP2.5	1,64E-05	0,3718	
	<b>WLD-All-18-64</b>			Indeterminado	MP2.5	9,21E-05	1,8370	
	<b>Ventanas</b>	As	<b>CAN-RSP-All</b>	Fugitiva	As	2,33E-08	0,0002	
				Puntual	As	2,58E-08	0,0003	
		MP		<b>ERV-Asth-All</b>	Indeterminado	MP2.5	1,54E-03	16,0900
				<b>HA-Asth-&lt;65</b>	Indeterminado	MP2.5	1,15E-05	0,0923
				<b>HA-CLD-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5	1,18E-05	0,0715

			<b>HA-CVD-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5		1,77E-04	1,0770
			<b>HA-CVD-65+</b>	Indeterminado	MP2.5		1,79E-03	4,3750
			<b>HA-RSP-65+</b>	Indeterminado	MP2.5		6,51E-04	1,5960
			<b>Mort-All-30+</b>	Indeterminado	MP2.5		2,26E-03	16,2600
			<b>WLD-All-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5		1,27E-02	76,9300
		SO2	<b>ERV-Asth-All</b>	Indeterminado	MP2.5		1,12E-05	0,1170
			<b>HA-Asth-&lt;65</b>	Indeterminado	MP2.5		8,35E-08	0,0007
			<b>HA-CLD-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5		8,56E-08	0,0005
			<b>HA-CVD-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5		1,29E-06	0,0078
			<b>HA-CVD-65+</b>	Indeterminado	MP2.5		1,30E-05	0,0318
			<b>HA-RSP-65+</b>	Indeterminado	MP2.5		4,73E-06	0,0116
			<b>Mort-All-30+</b>	Indeterminado	MP2.5		1,64E-05	0,1182
			<b>WLD-All-18-64</b>	Indeterminado	MP2.5		9,21E-05	0,5591
		<b>Chagres</b>	<b>Catemu</b>	As	<b>CAN-RSP-All</b>	Fugitiva	As	
Puntual	As						5,70E-08	0,0005
MP	<b>ERV-Asth-All</b>			Indeterminado	MP2.5		3,17E-03	28,2300
	<b>HA-Asth-&lt;65</b>			Indeterminado	MP2.5		3,35E-05	0,2344
	<b>HA-CLD-18-64</b>			Indeterminado	MP2.5		4,83E-05	0,2530
	<b>HA-CVD-18-64</b>			Indeterminado	MP2.5		3,99E-04	2,0860
	<b>HA-CVD-65+</b>			Indeterminado	MP2.5		4,22E-03	8,0320
	<b>HA-RSP-65+</b>			Indeterminado	MP2.5		2,44E-03	4,6460
	<b>Mort-All-30+</b>			Indeterminado	MP2.5		4,28E-03	25,5700
	<b>WLD-All-18-64</b>			Indeterminado	MP2.5		2,62E-02	137,1000

		SO2	ERV-Asth-0-14	Indeterminado	SO2	2,89E-04	0,4229
			ERV-Asth-65+	Indeterminado	SO2	6,36E-04	1,2090
			HA-RSP-65+	Indeterminado	SO2	3,56E-05	0,0677
	Llailay	As	CAN-RSP-All	Fugitiva	As	3,19E-08	0,0006
				Puntual	As	5,82E-08	0,0012
	Panquehue	As	CAN-RSP-All	Fugitiva	As	2,55E-08	0,0001
Puntual				As	4,65E-08	0,0002	
Caletones	Coya	As	CAN-RSP-All	Fugitiva	As	3,96E-09	0,0000
				Puntual	As	1,21E-09	0,0000
		MP	ERV-Asth-All	Indeterminado	MP2.5	4,97E-06	0,0168
			HA-Asth-<65	Indeterminado	MP2.5	2,16E-08	0,0001
			HA-CLD-18-64	Indeterminado	MP2.5	3,50E-08	0,0001
			HA-CVD-18-64	Indeterminado	MP2.5	4,26E-07	0,0009
			HA-CVD-65+	Indeterminado	MP2.5	3,98E-06	0,0021
			HA-RSP-65+	Indeterminado	MP2.5	1,98E-06	0,0010
			Mort-All-30+	Indeterminado	MP2.5	5,65E-06	0,0126
			WLD-All-18-64	Indeterminado	MP2.5	4,10E-05	0,0853
		SO2	ERV-Asth-0-14	Indeterminado	SO2	3,25E-05	0,0215
			ERV-Asth-65+	Indeterminado	SO2	7,14E-05	0,0370
			HA-RSP-65+	Indeterminado	SO2	2,07E-06	0,0011

1. Indeterminado quiere decir que pueden ser emisiones fugitivas o puntuales

Fuente: Elaboración propia

### 11.3 Anexo 3 Estadígrafos respecto del cumplimiento de límites en chimeneas

**Tabla 11-3 Estadígrafos (mg/m3) de cumplimiento de límites en chimenea**

Tipo de proceso unitario regulado	CONT.	FUNDICIÓN	PROCESO UNITARIO REGULADO	VR	Max Anual				Promedio				N° meses supera VR				meses supera 80%VR			
					20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
					17	18	19	20	17	18	19	20	17	18	19	20	17	18	19	20
Planta de Ácido	Chuquicamata	Planta de Ácido 2	1,0	1,0	0,9	0,0	0,0	0,2	0,4	0,0	n.a	1	-	-	-	1	2	-	-	
		Planta de Ácido 3	1,0	1,8	0,9	0,4	0,9	0,5	0,5	0,2	0,5	2	-	-	-	2	3	-	1	
		Planta de Ácido 4	1,0	0,6	0,8	0,4	0,8	0,2	0,3	0,1	0,4	-	-	-	-	-	1	-	1	
	DMH	Planta de Ácido	1,0	0,0	0,0	0,0	0,1	n.a.	n.a.	n.a.	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Altonorte	Planta de Ácido 1	1,0	0,1	0,4	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Planta de Ácido 3	1,0	0,1	0,3	0,2	0,3	0,0	0,1	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Potrerillos	Planta de Ácido	1,0	1,1	1,7	0,3	0,0	0,5	0,7	0,1	n.a	1	4	-	-	2	5	-	-	
		Planta de ácido	1,0	0,0	0,0	0,0	0,8	n.a.	n.a.	n.a.	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	
	As	HVL	Planta de Ácido 1	1,0	0,3	0,6	0,0	0,0	0,1	0,1	n.a.	n.a	-	-	-	-	-	-	-	-
			Planta de Ácido 2	1,0	0,3	0,5	0,0	0,0	0,1	0,1	n.a.	n.a	-	-	-	-	-	-	-	-
			Planta de Ácido 3	1,0	0,0	0,0	0,1	0,0	n.a.	n.a.	0,0	n.a	-	-	-	-	-	-	-	-
			Planta de Tratamiento de Gases de Cola	1,0	0,0	0,0	0,0	0,3	n.a.	n.a.	n.a.	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ventanas	Planta de Ácido	1,0	0,1	0,7	1,0	0,0	0,0	0,3	0,3	n.a	-	-	1	-	-	-	-	1	-
		Planta de Ácido	1,0	0,0	0,0	0,0	0,5	n.a.	n.a.	n.a.	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Caletones	PLG-1	1,0	2,6	1,9	0,9	0,6	0,9	0,6	0,4	0,3	4	2	-	-	6	3	2	-	
		PLG-2	1,0	2,9	7,1	0,9	0,6	1,2	1,0	0,4	0,2	6	2	-	-	7	2	1	-	
	Chagres	Planta de Ácido	1,0	0,7	0,9	0,1	0,0	0,2	0,3	0,0	n.a	-	-	-	-	-	1	-	-	
		Planta de Ácido	1,0	0,0	0,0	0,0	0,1	n.a.	n.a.	n.a.	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Hg	Chuquicamata	Planta de Ácido 2	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	n.a	-	-	-	-	-	-	-	-
			Planta de Ácido 3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-
			Planta de Ácido 4	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	2	-	-	-

Tipo de proceso unitario regulado	CONT.	FUNDICIÓN	PROCESO UNITARIO REGULADO	VR	Max Anual				Promedio				N° meses supera VR				meses supera 80%VR				
					2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020	
		DMH	Planta de Ácido	0,1	0,0	0,0	0,0	0,8	n.a.	n.a.	n.a.	0,3	-	-	-	9	-	-	-	9	
		Altonorte	Planta de Ácido 1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1	-	-	-	2	-	-	-	
			Planta de Ácido 3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	5	-	-	-	5	-	-	-	
		Potrerillos	Planta de Ácido	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	
			Planta de Ácido	0,1	0,0	0,0	0,0	1,3	n.a.	n.a.	n.a.	0,1	-	-	-	1	-	-	-	1	
		HVL	Planta de Ácido 1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	n.a.	n.a.	-	-	-	-	3	-	-	-	
			Planta de Ácido 3	0,1	0,6	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	n.a.	3	-	-	-	4	-	-	-	
			Planta de Tratamiento de Gases de Cola	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	n.a.	n.a.	n.a.	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Ventanas	Planta de Ácido	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	
			Planta de ácido	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	n.a.	n.a.	n.a.	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Caletones	PLG-1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	
			PLG-2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Chagres	Planta de Ácido	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	
			Planta de ácido	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	n.a.	n.a.	n.a.	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>Horno de limpieza de escoria</b>		Potrerillos	Horno de Limpieza de Escorias	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	
		HVL	Horno de Limpieza de Escorias	1,0	274,4	1,3	0,5	13,5	27,8	0,7	0,1	1,4	1	3	-	3	3	5	-	3	
		Ventanas	Horno de Limpieza de Escorias	1,0	0,7	1,0	0,9	0,6	0,1	0,4	0,4	0,3	-	-	-	-	-	1	1	-	
		As	HLE-1	1,0	46,4	28,3	0,0	0,0	15,4	13,7	n.a.	n.a.	12	11	-	-	12	11	-	-	
			HLE-2	1,0	24,0	15,0	0,0	0,0	9,5	8,0	n.a.	n.a.	11	11	-	-	11	11	-	-	
			Caletones	HLE-3	1,0	22,0	65,6	0,0	0,0	9,1	21,7	n.a.	n.a.	9	11	-	-	10	11	-	-
				HLE-4	1,0	34,9	34,8	0,0	0,0	14,0	16,1	n.a.	n.a.	10	11	-	-	11	11	-	-
				HLE-5	1,0	11,9	12,8	0,0	0,0	3,8	2,3	n.a.	n.a.	5	4	-	-	8	4	-	-
		Chagres	HLE	1,0	1,0	1,4	1,0	0,0	0,6	0,6	0,7	n.a.	-	1	-	-	2	4	4	-	

Tipo de proceso unitario regulado	CONT.	FUNDICIÓN	PROCESO UNITARIO REGULADO	VR	Max Anual				Promedio				N° meses supera VR				meses supera 80%VR				
					2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020	
			Horno de Limpieza de Escorias	1,0	0,0	0,0	0,0	0,9	n.a.	n.a.	n.a.	0,7	-	-	-	-	-	-	3		
		Potrerillos	Horno de Limpieza de Escorias	50	0	0	0	0	0	0	0	n.a.	-	-	-	-	-	-	-		
		HVL	Horno de Limpieza de Escorias	50	406	456	124	84	237	209	49	48	9	8	4	3	10	9	5	8	
	<b>MP</b>	Ventanas	Horno de Limpieza de Escorias	50	47	45	49	16	20	24	20	10	-	-	-	-	2	1	2	-	
		Chagres	HLE	50	30	37	14	0	11	13	9	n.a.	-	-	-	-	-	-	-		
			Horno de Limpieza de Escorias	50	0	0	0	10	n.a.	n.a.	n.a.	7	-	-	-	-	-	-	-		
<b>Hornos de refino</b>	<b>MP</b>	Chagres	Horno de Refino	5,8	32,7	20,3	16,6	0,0	14,6	13,3	9,2	n.a.	8	12	10	-	8	12	11	-	
		Chuquicamata	Secador 4	50	213	400	46	0	109	4	834	28	n.a.	10	7	-	-	10	7	3	-
			Secador 5	50	958	873	0	0	248	404	0	n.a.	12	12	-	-	12	12	-	-	
			Secador 6	50	0	0	0	46	n.a.	n.a.	n.a.	31	-	-	-	-	-	-	-	3	
		Altonorte	Secador	50	40	17	23	14	16	8	9	8	-	-	-	-	1	-	-	-	
		Potrerillos	Secador	50	89	36	16	27	35	21	6	14	3	-	-	-	6	-	-	-	
	<b>MP</b>	HVL	Secador	50	781	416	152	73	228	110	92	31	8	5	9	2	8	9	10	3	
		Ventanas	Secador	50	36	43	54	39	17	32	22	18	-	-	2	-	-	3	2	-	
		Caletones	FLUO-1	50	0	0	0	24	n.a.	n.a.	n.a.	8	-	-	-	-	-	-	-		
			FLUO-2	50	0	0	0	29	n.a.	n.a.	n.a.	8	-	-	-	-	-	-	-		
			FLUO-3	50	0	0	0	45	n.a.	n.a.	n.a.	23	-	-	-	-	-	-	-	1	
		Chagres	Secador	50	48	15	49	26	14	9	12	7	-	-	-	-	1	-	1	-	

En verde se destacan los pares año fundición donde la normativa no era aplicable aún.

En naranja se destacan aquellos datos informados, pero sin límites.

Fuente: Elaboración propia