



Informe Número

1612944

Original



**Estudio de antecedentes para la revisión de las normas
primarias de calidad del aire SO₂, O₃, Pb, y CO, y norma
secundaria para SO₂**

ID Licitación: 608897-119-LP23

Estudio solicitado por la Subsecretaría del Medio Ambiente

INFORME FINAL

Santiago, 18 de octubre 2024

Título del Proyecto

Estudio de antecedentes para la revisión de las normas primarias de calidad del aire SO₂, O₃, Pb, y CO, y norma secundaria para SO₂

Autores:

Jefe de proyecto: Luis Cifuentes

Experto asesor: Héctor Jorquera, Juan Carlos Ríos, Daniel Rebolledo

Ingeniero de proyecto: Viviana Cerda Gho, Valentina Strappa, Carolina Moya, Pollette Lara, Alejandro Bañados, Rocío Herrera.

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

Este estudio tiene por objetivo contar con antecedentes sobre la nueva evidencia científica en salud y recursos naturales, según sea el caso, la tendencia de la normativa nacional e internacional, las consideraciones y enfoques utilizados en la evaluación económica y social de las normas ambientales para fortalecer la fundamentación de la revisión de las normas de calidad primaria y secundaria de dióxido de azufre (SO₂) y de las normas de calidad primaria para ozono (O₃), plomo (Pb) y monóxido de carbono (CO), considerando los costos y desafíos asociados a diferentes escenarios regulatorios.

Cuerpo del informe

362 hojas (incluye portada)

Fecha del informe

18/10/2024

Información Contractual

Correlativo Contrato: 3517

OC N°: 608897-466-SE23

Contraparte técnica

Nombre: Maureen Amín

Cargo: Profesional Sección de Normas del Departamento de Planes y Normas, de la División de Calidad del Aire

E-mail: mamin@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	1
Lista de Tablas	6
Lista de Figuras.....	11
Resumen Ejecutivo.....	16
1. Antecedentes y justificación del estudio	2
1.1 Normas de calidad	3
1.2 Contenidos relevantes a considerar en la actualización de las normas de calidad del aire 7	
1.3 Criterios para revisar y actualizar las normas ambientales	9
2. Objetivos del estudio	10
2.1 Objetivo general.....	10
2.2 Objetivos específicos	10
2.3 Alcance de este informe	10
3. Actualización de la evidencia en salud de la exposición a SO ₂ , O ₃ , Pb y CO, y de la evidencia para establecer los niveles de exposición a SO ₂ para la protección o conservación del medio ambiente o la preservación de la naturaleza.....	12
3.1 Revisión bibliográfica y análisis de estudios toxicológicos, epidemiológicos y guías metodológicas.....	12
3.1.1 Plomo	12
3.1.2 Dióxido de azufre	20
3.1.3 Ozono	26
3.1.4 Monóxido de carbono	33
3.2 Análisis de correlación entre contaminantes y sus efectos crónicos y agudos en la salud de la población	39
3.2.1 Plomo	39
3.2.2 Dióxido de Azufre	44
3.2.3 Ozono	46
3.2.4 Monóxido de Carbono.....	48
3.3 Síntesis de la nueva evidencia en salud	49
3.3.1 Plomo	49

3.3.2	<i>Dióxido de azufre</i>	50
3.3.3	<i>Ozono</i>	50
3.3.4	<i>Monóxido de carbono</i>	51
3.4	Determinación de efectos agudos y crónicos generados por exposición a SO ₂ en medio ambiente y naturaleza	51
3.4.1	<i>Revisión de literatura científica de efectos por exposición a SO₂</i>	51
3.4.2	<i>Síntesis de la nueva evidencia en vegetación por exposición a SO₂</i>	57
3.4.3	<i>Sitios prioritarios y áreas protegidas en Chile</i>	58
3.5	Tablas resumen de información relevante	70
4.	Recopilación y comparación de los valores de las normas de calidad del aire adoptadas o recomendadas a nivel internacional para SO ₂ (primaria y secundaria), O ₃ , Pb y CO	75
4.1	Análisis de la normativa internacional	75
4.1.1	<i>Síntesis del análisis de la normativa internacional</i>	86
4.2	Análisis y sistematización de los criterios de excedencia en EEUU, comunidad europea, países OCDE y Japón, entre otros	87
4.2.1	<i>Síntesis del análisis de los criterios de excedencia</i>	91
4.3	Estudio y síntesis de metodologías de monitoreo continuo y discreto	92
4.3.1	<i>Protocolo general de muestreo de gases</i>	92
4.3.2	<i>Descripción de las técnicas específicas para cada especie gaseosa</i>	93
4.3.3	<i>Monitoreo discreto de Plomo</i>	102
5.	Análisis del origen, comportamiento, tendencia histórica y proyección de la concentración de SO ₂ , O ₃ , Pb y CO, a nivel nacional, regional y/o por área de interés incluyendo la actualización y proyección de inventarios de emisión	104
5.1	Síntesis descriptiva de SO ₂ , O ₃ , Pb y CO	104
5.1.1	<i>Plomo</i>	104
5.1.2	<i>Dióxido de Azufre</i>	106
5.1.3	<i>Ozono</i>	107
5.1.4	<i>Monóxido de Carbono</i>	110
5.1.5	<i>Aspectos relevantes de la descripción de contaminantes</i>	112
5.2	Elaboración de ciclos anuales, mensuales, diarios y horarios que muestren la evolución de SO ₂ , O ₃ , Pb y CO	113
5.3	Diagnóstico de la calidad del aire para SO ₂ , O ₃ , Pb y CO	113
5.3.1	<i>Plomo</i>	114

5.3.2	<i>Dióxido de azufre</i>	115
5.3.3	<i>Monóxido de carbono</i>	123
5.3.4	<i>Ozono</i>	124
5.3.5	<i>Zonas de interés</i>	125
5.4	Relación concentraciones de SO ₂ , O ₃ , Pb y CO con sus principales fuentes emisoras para elaboración de inventario	126
5.4.1	<i>Fuentes puntuales</i>	127
5.4.2	<i>Fuentes móviles</i>	144
5.4.3	<i>Fuentes difusas</i>	153
5.4.4	<i>Emisiones totales</i>	162
5.4.5	<i>Relación Factor Emisión Concentración</i>	168
5.5	Proyección del inventario de emisiones a 10 años	172
5.5.1	<i>Metodología</i>	172
5.5.2	<i>Resultados</i>	176
5.6	Proyección de concentraciones de SO ₂ , O ₃ , Pb y CO	187
5.6.1	<i>Metodología proyección de concentraciones de SO₂, O₃, Pb y CO</i>	187
5.6.2	<i>Resultados proyección de concentraciones de SO₂, O₃, Pb y CO</i>	189
6.	Revisión de programas de medidas para la gestión de episodios de emergencia ambiental a nivel internacional y comparación con lo vigente en Chile para SO ₂ , O ₃ , Pb y CO	192
6.1	Identificación de programas de medidas de gestión implementados en seis países	192
6.1.1	<i>Estados Unidos</i>	192
6.1.2	<i>Madrid, España</i>	200
6.1.3	<i>Bogotá, Colombia</i>	203
6.1.4	<i>Monterrey, México</i>	207
6.1.5	<i>Sao Paulo, Brasil</i>	212
6.1.6	<i>Beijing, China</i>	213
6.1.7	<i>Síntesis de la revisión de gestión de episodios críticos</i>	217
6.2	Gestión de episodios críticos en Chile	224
6.2.1	<i>PDA Concón, Quintero y Puchuncaví</i>	225
6.3	Propuesta de programas de medidas de gestión de episodios a implementar en los distintos territorios afectados por altos niveles de concentración de contaminantes	227
6.3.1	<i>Propuesta de implementación</i>	227
6.3.2	<i>Gestión de episodios críticos para el Plomo</i>	231

7.	Diseño e implementación de una campaña de monitoreo para plomo.....	233
7.1	Identificación de técnicas de análisis de muestras para el monitoreo discontinuo...	233
7.1.1	<i>Espectroscopia de absorción atómica (U.S. EPA, 1999b).....</i>	233
7.1.2	<i>Fluorescencia de rayos X (XRF) (U.S. EPA, 1999f)</i>	234
7.1.3	<i>Plasma de acoplamiento inductivo (ICP) (U.S. EPA, 1999c).....</i>	234
7.1.4	<i>Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP/MS) (U.S. EPA, 1999d).....</i>	235
7.1.5	<i>Emisión de rayos X inducida por protones (PIXE) (U.S. EPA, 1999e).....</i>	235
7.1.6	<i>Comparación de técnicas de análisis</i>	235
7.1.7	<i>Síntesis de las técnicas de análisis de muestras para el monitoreo discontinuo</i>	237
7.2	Antecedentes de mediciones de plomo en Chile.	238
7.3	Realización de campañas de monitoreo de Pb	240
7.3.1	<i>Sitios de monitoreo</i>	240
7.3.2	<i>Materiales y equipos utilizados</i>	243
7.3.3	<i>Metodología de muestreo y análisis</i>	245
7.3.4	<i>Normativa aplicable.....</i>	245
7.3.5	<i>Resultados de las mediciones de Plomo</i>	246
7.3.6	<i>Conclusiones de las campañas de monitoreo</i>	257
8.	Propuesta de escenarios de revisión para las normas primarias de SO ₂ , O ₃ , Pb y CO y para norma secundaria de SO ₂	258
8.1	Propuesta de nuevos escenarios normativos y valores que generarían episodios de contaminación atmosférica	258
8.1.1	<i>Evaluación de la necesidad de modificar la Norma Primaria de Plomo en Aire.</i>	260
8.2	Análisis de convergencia entre propuesta de norma y otros instrumentos regulatorios	261
8.2.1	<i>Normas de emisión</i>	261
8.2.2	<i>Planes de Prevención y Descontaminación Atmosférica</i>	264
8.2.3	<i>Convergencia entre propuesta de normas y los instrumentos regulatorios revisados</i>	267
8.3	Diagnóstico del cumplimiento de los nuevos escenarios normativos.....	268
8.3.1	<i>Plomo</i>	268
8.3.2	<i>Dióxido de azufre</i>	269
8.3.3	<i>Monóxido de carbono</i>	277

8.3.4	Ozono	279
8.3.5	Análisis en zonas de interés	284
8.4	Recomendación de método de monitoreo, frecuencia y zona de interés para cada contaminante.....	287
8.5	Propuesta de protocolos de fiscalización de las normas.....	288
9.	Evaluación y cuantificación de los costos asociados a la aplicación y cumplimiento de la normativa y escenarios propuestos, el impacto en los valores de las normas primarias relacionadas, y los beneficios en salud y ambientales, a fin de ser utilizado en estudio de AGIES	291
9.1	Selección de criterios y enfoques utilizados para la evaluación del impacto económico y social	291
9.1.1	Alcance geográfico de la proyección de las emisiones	291
9.1.2	Inventario maestro de emisiones para las zonas de interés.....	292
9.1.3	Proyección de las emisiones.....	295
9.1.4	Reducción de emisiones requerida para cumplir con la norma propuesta.....	298
9.2	Cuantificación del número de casos y valoración de los beneficios en la población más expuesta para los escenarios propuestos.....	303
9.2.1	Coeficientes de riesgo	303
9.2.2	Tasa de mortalidad basal.....	304
9.2.3	Impacto en salud por reducción de concentraciones y valoración de los beneficios en la población más expuesta para los escenarios propuestos	304
9.3	Identificación por fuente de potenciales tecnologías de abatimiento para la reducción de contaminantes en los escenarios regulados.....	309
9.4	Descripción de potenciales medidas de abatimiento.....	315
9.5	Estimación de los costos de implementación y cumplimiento de las normas para cada escenario propuesto	319
9.6	Comparación de costos y beneficios derivados de la norma a través de una razón beneficio costo.....	319
10.	Presentación de los resultados finales del estudio	322
10.1	Reuniones de avance del estudio	322
10.2	Presentación de informes y presentación final	322
11.	Conclusiones	324
12.	Bibliografía	330

Lista de Tablas

Tabla 1-1 Zonas de interés por contaminante.....	18
Tabla 1-2 Propuesta de normas.....	1
Tabla 1-1 PRAS a abordar en el estudio.....	3
Tabla 1-2 Resumen de valores límites considerados en las normas primarias de O ₃ , SO ₂ y CO y normas secundarias de SO ₂ vigentes en Chile.....	6
Tabla 1-3 Niveles de emergencia vigentes en Chile para O ₃ , SO ₂ y CO	6
Tabla 1-4 Valores guía propuestos por la OMS para SO ₂ , CO y O ₃ en publicación del año 2021...	9
Tabla 2-1 Actividades abordadas en este informe	11
Tabla 3-1: Valores de evaluación cuantitativa de riegos. Plomo CAS 7439-92-1	41
Tabla 3-2: Cáncer. Plomo CAS 7439-92-1	41
Tabla 3-3 Relaciones de causalidad identificadas por la US-EPA en ISA SO ₂	44
Tabla 3-4 Relaciones de causalidad identificadas por la OMS en guía 2021.....	45
Tabla 3-5 Revisiones sistemáticas y metaanálisis realizados para MP2,5, MP10 y SO ₂	45
Tabla 3-6 Coeficientes de riesgo unitario seleccionados para exposiciones de corto plazo.....	46
Tabla 3-7 Relación entre el indicador ANC y el número de especies.	56
Tabla 3-8 Sitios prioritarios y áreas protegidas en comunas de interés para la Región de Antofagasta.....	60
Tabla 3-9 Sitios prioritarios y áreas protegidas en comunas de interés para la Región de Atacama.....	62
Tabla 3-10 Sitios prioritarios y áreas protegidas en comunas de interés para la Región de Valparaíso.	65
Tabla 3-11 Sitios prioritarios y áreas protegidas en comunas de interés para la Región de O'Higgins.	67
Tabla 3-12 Sitios prioritarios y áreas protegidas en comunas de interés para la Región del Biobío.	68
Tabla 3-13 Resumen efectos a la salud por exposición al plomo (Pb).	70
Tabla 3-14 Resumen efectos a la salud por exposición al dióxido de azufre (SO ₂).	71
Tabla 3-15 Resumen de efectos al medio ambiente por exposición al dióxido de azufre (SO ₂)..	72
Tabla 3-16 Niveles de exposición al SO ₂ que pueden causar efectos adversos.	72
Tabla 3-17 Resumen efectos a la salud por exposición al ozono (O ₃).	73
Tabla 3-18 Resumen efectos a la salud por exposición al monóxido de carbono (CO).	74
Tabla 4-1 Estado de los instrumentos en los países y organizaciones revisados.	75
Tabla 4-2 Regulaciones de calidad del aire por país u organización.	76
Tabla 4-3 Estructura de la base de datos recopilada.....	79
Tabla 4-4 Clasificaciones de ODP empleadas en la recopilación.....	81
Tabla 4-5 Resumen valores límite o de referencia para el Plomo [µg/m ³].	82
Tabla 4-6 Resumen valores límite o de referencia para el Dióxido de Azufre [µg/m ³].	84
Tabla 4-7 Resumen valores límite o de referencia para el Ozono [µg/m ³].	85
Tabla 4-8 Resumen valores límite o de referencia para el Monóxido de Carbono [mg/m ³].	86
Tabla 4-9 Criterios de excedencia para el Pb.....	87

Tabla 4-10 Criterios de excedencia para el SO ₂ .	88
Tabla 4-11 Criterios de excedencia para el O ₃ .	90
Tabla 4-12 Criterios de excedencia para el CO.	91
Tabla 4-13 Equipos aprobados por la EPA para medir O ₃ .	95
Tabla 4-14 Equipos aprobados por la EPA para medir CO.	96
Tabla 4-15 Equipos aprobados por la EPA para medir SO ₂ .	98
Tabla 4-16 Equipos aprobados por la EPA para medir MP ₁₀ .	102
Tabla 5-1 Fuentes de información para el diagnóstico de calidad del aire.	114
Tabla 5-2 Zonas de interés por contaminante.	126
Tabla 5-3 Emisiones de fuentes puntuales a nivel país por contaminante (kton/año).	127
Tabla 5-4 Clasificación de Rubro RETC por sector	129
Tabla 5-5 Emisiones de SO ₂ y NO _x de empresas con Impuesto Verde entre los años 2017 – 2019 (ton/año) y contribución del total de emisiones RETC.	135
Tabla 5-6 Emisiones por fuentes emisoras para empresas con Impuesto Verde para fuentes puntuales año 2019 (ton/año).	136
Tabla 5-7 Emisiones de SO ₂ por región y rubro para establecimientos afectados al Sistema de Impuesto Verde año 2019 (ton/año).	140
Tabla 5-8 Emisiones de NO _x por región y rubro para establecimientos afectados al Sistema de Impuesto Verde año 2019 (ton/año).	140
Tabla 5-9 Comunas con mayor cantidad de emisiones de SO ₂ de fuentes puntuales para establecimientos afectados al Sistema de Impuesto Verde año 2019.	142
Tabla 5-10 Comunas con mayor cantidad de emisiones de NO _x de fuentes puntuales para establecimientos afectados al Sistema de Impuesto Verde año 2019.	142
Tabla 5-11 Emisiones de fuentes móviles por contaminante (kton/año)	144
Tabla 5-12 Clasificación de Rubro RETC por sector	146
Tabla 5-13 Emisiones por tipo de vehículo por contaminante año 2019 (ton).	149
Tabla 5-14 Emisiones de fuentes móviles por región y contaminante año 2019 (ton).	150
Tabla 5-15 Emisiones de fuentes difusas por contaminante (kton/año)	154
Tabla 5-16 Emisiones por tipo de fuente por contaminante año 2019 (ton).	158
Tabla 5-17 Emisiones de fuentes difusas por región y contaminante año 2019 (ton).	160
Tabla 5-18 Evolución de emisiones totales para SO ₂ por tipo de emisión al aire (ton/año).	162
Tabla 5-19 Evolución de emisiones totales de NO _x por tipo de emisión al aire (ton/año).	163
Tabla 5-20 Evolución de emisiones totales de CO por tipo de emisión al aire (ton/año).	164
Tabla 5-21 Emisión y concentración de zonas de interés SO ₂ .	169
Tabla 5-22 Emisión y concentración de zona de interés O ₃ .	170
Tabla 5-23 Tasa de crecimiento/decrecimiento por comuna para SO ₂ y NO _x .	173
Tabla 5-24 Establecimientos que salen por Plan de Retiro de Centrales Termoeléctricas.	174
Tabla 5-25 Establecimientos que no cuentan con emisiones periodo 2019 – 2022.	175
Tabla 5-26 Tasa de crecimiento por tipo de vehículo.	176
Tabla 5-27 Proyección de emisiones (ton) de fuentes puntuales por contaminante.	177
Tabla 5-28 Proyección de emisiones (ton) de fuentes móviles por contaminante.	181
Tabla 6-1 Resumen de gestión de episodios críticos en los países revisados.	192
Tabla 6-2 Rangos de referencia y categorías de AQI para cada contaminante.	194

Tabla 6-3 Grupos sensibles a contaminantes específicos.....	194
Tabla 6-4 Advertencias a la población por cada contaminante según categoría AQI.....	195
Tabla 6-5 Criterios de alerta para episodios de contaminación atmosférica en Nueva York. ...	196
Tabla 6-6 Reducción de emisiones para el nivel de alerta (equivalente a Alerta I).	197
Tabla 6-7 Reducción de emisiones para el nivel de advertencia (equivalente a Alerta II).....	198
Tabla 6-8 Reducción de emisiones para el nivel de emergencia.....	198
Tabla 6-9 Niveles de emergencia por ozono en el oeste del condado de Nevada.....	199
Tabla 6-10 Acciones para cada nivel de emergencia de ozono.	200
Tabla 6-11 Umbrales de activación, de información y de alerta para el SO ₂ (Madrid).....	201
Tabla 6-12 Umbrales de activación, de información y de alerta para el O ₃ (Madrid).....	201
Tabla 6-13 Acciones a tomar según nivel de actuación para alertas por ozono, Madrid	203
Tabla 6-14 Recomendaciones para reducir la exposición para distintos niveles de calidad asociados a ozono, Madrid	203
Tabla 6-15 Criterios por contaminante para gestión de episodios críticos en Bogotá, Colombia	204
Tabla 6-16 Recomendaciones en salud para la ciudadanía según el valor IBOCA	205
Tabla 6-17 Criterios para la activación de las fases del PRCA (Monterrey).....	208
Tabla 6-18 Lineamientos para fuentes fijas, móviles y de área durante la fase de Alerta.....	210
Tabla 6-19 Lineamientos para población general y otros sectores durante la fase de Alerta. ..	211
Tabla 6-20 Lineamientos para fuentes fijas, móviles y de área durante Contingencia Fase I....	211
Tabla 6-21 Lineamientos para fuentes fijas, móviles y de área durante Contingencia Fase II. .	212
Tabla 6-22 Condiciones de establecimiento de criterios de alerta en Sao Paulo	212
Tabla 6-23 Restricciones para fuentes emisoras durante episodios críticos (Sao Paulo)	213
Tabla 6-24 Criterios para establecer niveles de calidad del aire en Sao Paulo.	213
Tabla 6-25 Índice de Calidad del Aire de China [µg/m ³].....	214
Tabla 6-26 Niveles de alerta para Beijing.	214
Tabla 6-27 Medidas de precaución para la Alerta Amarilla.....	215
Tabla 6-28 Medidas de precaución para la Alerta Naranja	216
Tabla 6-29 Medidas de precaución para la Alerta Roja	217
Tabla 6-30 Resumen de las fases de episodios críticos y valores AQI.	218
Tabla 6-31 Resumen medidas aplicadas en gestión de episodios críticos.	221
Tabla 6-32 Resumen de planes GEC vigentes en el país.....	224
Tabla 6-33 Resumen de PDA mineros vigentes en el país.....	225
Tabla 6-34 Medidas operacionales ENAP Aconcagua frente a episodios críticos por SO ₂	227
Tabla 7-1 Comparación de técnicas para determinar plomo.	236
Tabla 7-2 Concentraciones de plomo medidas en Chile	239
Tabla 7-3 Ubicación sitios de muestreo.....	240
Tabla 7-4 Resumen de valores límites considerados en la medición de plomo en Chile.....	246
Tabla 7-5 Concentración diaria MP10 Estación Hospital El Cobre (febrero – marzo 2024).....	246
Tabla 7-6 Concentración diaria MP10 Estación Pudahuel (febrero – marzo 2024)	247
Tabla 7-7 Concentración diaria MP10 Estación Rancagua I (febrero – marzo 2024).....	248
Tabla 7-8 Concentración diaria MP10 Estación Nueva Libertad (febrero – marzo 2024).....	249
Tabla 7-9 Concentración diaria plomo Estación Hospital El Cobre (febrero – marzo 2024).....	250

Tabla 7-10 Concentración diaria plomo Estación Pudahuel (febrero – marzo 2024)	251
Tabla 7-11 Concentración diaria plomo Estación Rancagua I (febrero – marzo 2024)	251
Tabla 7-12 Concentración diaria plomo Estación Nueva Libertad (febrero – marzo 2024)	251
Tabla 7-13 Concentración diaria MP ₁₀ Estación Hospital El Cobre (abril – mayo 2024)	252
Tabla 7-14 Concentración diaria MP ₁₀ Estación Pudahuel (abril – mayo 2024)	253
Tabla 7-15 Concentración diaria MP ₁₀ Estación Rancagua I (abril – mayo 2024)	254
Tabla 7-16 Concentración diaria MP ₁₀ Estación Nueva Libertad (abril – mayo 2024)	255
Tabla 7-17 Concentración diaria plomo Estación Hospital El Cobre (abril – mayo 2024)	256
Tabla 7-18 Concentración diaria de plomo Estación Pudahuel (abril – mayo 2024)	256
Tabla 7-19 Concentración diaria plomo Estación Rancagua I (abril – mayo 2024)	256
Tabla 7-20 Concentración diaria plomo Estación Nueva Libertad (abril – mayo 2024)	257
Tabla 8-1 Propuesta de normas.	259
Tabla 8-2 Valores que generarían episodios de contaminación atmosférica.	260
Tabla 8-3 Límites de emisión para fuentes emisoras del D.S. N°13/2011 (mg/m ³ N).....	261
Tabla 8-4 Límites de emisión para fuentes emisoras en la R. Exenta N°569/2023 (mg/m ³ N)...	262
Tabla 8-5 Límites de emisión SO ₂ para fundiciones del D.S. N°28/2013.....	262
Tabla 8-6 Límites de emisión para fuentes emisoras del D.S. N°29/2013 (mg/m ³ N).....	263
Tabla 8-7 Límites de emisión para grupos electrógenos nuevos* del D.S. N°38/2020 (g/kWh).	263
Tabla 8-8 Límites de emisión para otros grupos electrógenos** del D.S. N°38/2020 (g/kWh).	264
Tabla 8-9 Límites de emisión SO ₂ para fuentes estacionarias en los PDA.	265
Tabla 8-10 Emisiones máximas permitidas en grandes fuentes del PDA CQP.	266
Tabla 8-11 Límite de emisión SO ₂ y CO para fuentes estacionarias en PDA RM.	266
Tabla 8-12 Zonas saturadas y de latencia para propuesta 2 de norma primaria 24 horas SO ₂ .	270
Tabla 8-13 Zonas saturadas y de latencia para propuesta 2 de norma anual SO ₂ (Prim y Sec).	271
Tabla 8-14 Cantidad de episodios de emergencia ambiental para SO ₂ por región (2019-2023).	276
Tabla 8-15 Resumen zonas saturadas y de latencia para propuesta 1 de norma O ₃	280
Tabla 8-16 Resumen zonas saturadas y de latencia para propuesta 2 de norma O ₃	281
Tabla 8-17 Cantidad de episodios de emergencia ambiental para O ₃ por región (2019-2023).	283
Tabla 8-18 Cantidad de episodios de emergencia ambiental para SO ₂ en zonas de interés.	284
Tabla 8-19 Cantidad de episodios de emergencia ambiental para O ₃ en zonas de interés.	286
Tabla 8-20 Comunas de zonas de interés	288
Tabla 9-1 Termoeléctricas del Plan de Retiro de Centrales a Carbón.	292
Tabla 9-2 Fuentes de información para las emisiones de zonas de interés.	293
Tabla 9-3 Descripción de campos de la base de datos de inventario maestro	294
Tabla 9-4 Emisiones de SO ₂ recopiladas por clase y año	294
Tabla 9-5 Emisiones de SO ₂ recopiladas por zona y año	294
Tabla 9-6 Emisiones de NO _x recopiladas por clase y año	295
Tabla 9-7 Emisiones de NO _x recopiladas por zona y año.....	295
Tabla 9-8 Proyección de emisiones de SO ₂ por zona.....	297
Tabla 9-9 Proyección de emisiones de NO _x para norma de O ₃ por zona.	297

Tabla 9-10 Métricas de norma que generan la mayor reducción de concentraciones, por contaminante y zona de interés.	299
Tabla 9-11 Reducción requerida de emisiones SO ₂ para cada escenario de norma por zona y año	301
Tabla 9-12 Reducción requerida de emisiones NO _x para cada escenario de norma de O ₃ por zona y año.....	302
Tabla 9-13 Coeficientes de riesgo utilizados.....	303
Tabla 9-14 Tasa de mortalidad promedio por zona.	304
Tabla 9-15 Porcentaje de monitores que alcanzan la norma, a nivel de zona, para cada escenario normativo de NPCA de SO ₂	305
Tabla 9-16 Porcentaje de monitores que alcanzan la norma, a nivel de zona, para cada escenario normativo de NPCA de O ₃	305
Tabla 9-15 Casos evitados al año, para cada escenario normativo de SO ₂	306
Tabla 9-16 Casos evitados al año, para cada escenario normativo para el O ₃	308
Tabla 9-17 Beneficios en el período para la norma SO ₂	308
Tabla 9-18 Beneficios en el período para la norma O ₃	309
Tabla 9-19 Eficiencia para tecnologías de abatimiento de NO _x	310
Tabla 9-20 Eficiencia para tecnologías de abatimiento de SO ₂	311
Tabla 9-21 Tecnologías y costos por tonelada para reducciones NO _x seleccionada.....	311
Tabla 9-22 Tecnologías y costos por tonelada para reducciones SO ₂ seleccionada	313
Tabla 9-23 Tipo de fuente predominante por zona de interés y medida seleccionada para SO ₂	313
Tabla 9-24 Tipo de fuente predominante por zona de interés y medida seleccionada para NO _x	314
Tabla 9-25 Costo anual de abatimiento por escenario normativo para SO ₂	314
Tabla 9-26 Costo anual de abatimiento por escenario normativo para O ₃	315
Tabla 9-27 Resumen de Tecnologías de control seleccionadas.	316
Tabla 9-28 Costo anual de abatimiento por escenario normativo para SO ₂	319
Tabla 9-29 Costo anual de abatimiento por escenario normativo para O ₃	319
Tabla 9-30 Beneficio, Costo y Razón beneficio costo [miles UF en valor presente] para SO ₂ por escenario	320
Tabla 9-31 Beneficio, Costo y Razón beneficio costo [miles UF en valor presente] para O ₃ por escenario	321
Tabla 10-1 Fechas reuniones de avance de estudio	322
Tabla 10-2 Fechas de entrega de informes y reuniones de presentación de resultados.....	323

Lista de Figuras

Figura 3-1 Factores de pendiente para el PbB en función del PbA.	43
Figura 3-2 Asociación de temporada alta, exposición a largo plazo y mortalidad no accidental.	47
Figura 3-3 Curva de exposición-respuesta para exposición al ozono en periodos de 8 horas y mortalidad por todas las causas.	48
Figura 3-4 Asociación entre monóxido de carbono e ingreso por infarto de miocardio o mortalidad por infarto de miocardio estratificada por subgrupos.	49
Figura 3-5 Relación entre el indicador ANC y el número de especies.	56
Figura 4-1 Monitor de ozono ambiental Horiba APOA-370	95
Figura 4-2 Analizador de ozono ambiental Teledyne T400	95
Figura 4-3 Analizador de CO ambiental Horiba APMA-370	97
Figura 4-4 Analizador de CO ambiental Thermo Scientific 48i	97
Figura 4-5 Muestreador Horiba APSA 370	98
Figura 4-6 Muestreador de SO ₂ Thermo 43i	99
Figura 4-7 Muestreador de MP ₁₀ MetOne E-FRM	103
Figura 4-8 Muestreador de MP ₁₀ Thermo Fisher Scientific Partisol 2000i	103
Figura 5-1 Fotoquímica de la formación de ozono de forma simplificada.	108
Figura 5-2 Formación de ozono a partir de sus precursores.	109
Figura 5-3 Análisis de cumplimiento norma anual de plomo.	115
Figura 5-4 Análisis de cumplimiento de la norma horaria de SO ₂	117
Figura 5-5 Análisis de cumplimiento de la norma diaria de SO ₂	118
Figura 5-6 Análisis de cumplimiento de la norma anual de SO ₂	119
Figura 5-7 Análisis de cumplimiento de la norma secundaria de 1 hora SO ₂	121
Figura 5-8 Análisis de cumplimiento de la norma secundaria de 24 horas SO ₂	122
Figura 5-9 Análisis de cumplimiento de la norma horaria de CO.	123
Figura 5-10 Análisis de cumplimiento de la norma octohoraria de CO.....	124
Figura 5-11 Análisis de cumplimiento de la norma octohoraria de O ₃	125
Figura 5-12 Evolución de las emisiones de fuentes puntuales para SO ₂ , NO _x y CO (kton/año).	127
Figura 5-13 Evolución de las emisiones de fuentes puntuales de Pb (kton/año)	128
Figura 5-14 Evolución de emisiones de SO ₂ de fuentes puntuales por Sector (ton/año)	130
Figura 5-15 Evolución de emisiones de NO _x de fuentes puntuales por Sector (ton/año).....	131
Figura 5-16 Evolución de emisiones de Pb de fuentes puntuales por Sector (ton/año)	131
Figura 5-17 Evolución de emisiones de CO de fuentes puntuales por Sector (ton/año)	132
Figura 5-18 Variación de establecimientos y fuentes puntuales.....	133
Figura 5-19 Tendencia de emisiones de contaminantes de empresas afectos al Sistema de Impuesto Verde de fuentes puntuales	135
Figura 5-20 Emisiones de fuentes puntuales por fuente emisora para establecimientos afectos al Sistema de Impuesto Verde año 2019 (ton/año)	137
Figura 5-21 Evolución de emisiones SO ₂ de fuentes puntuales por rubro para establecimientos afectos al Sistema de Impuesto Verde	138

Figura 5-22 Evolución de emisiones NO _x de fuentes puntuales por rubro para establecimientos afectados al Sistema de Impuesto Verde	138
Figura 5-23 Emisiones de SO ₂ de fuentes puntuales por región y rubro para establecimientos afectados al Sistema de Impuesto Verde año 2019 (ton)	141
Figura 5-24 Emisiones de NO _x de fuentes puntuales por región y rubro para establecimientos afectados al Sistema de Impuesto Verde año 2019 (ton)	141
Figura 5-25 Emisiones CO para fuentes puntuales región de Atacama Año 2019 (ton)	143
Figura 5-26 Evolución de las emisiones de fuentes móviles para SO ₂ (ton/año)	145
Figura 5-27 Evolución de las emisiones de fuentes móviles para NO _x y CO (ton/año)	145
Figura 5-28 Evolución de emisiones de SO ₂ de fuentes móviles por tipo de vehículo (ton/año)	147
Figura 5-29 Evolución de emisiones de NO _x de fuentes móviles por tipo de vehículo (ton/año)	147
Figura 5-30 Evolución de emisiones de CO de fuentes móviles por tipo de vehículo (ton/año)	148
Figura 5-31 Emisiones de SO ₂ de fuentes móviles por tipo de vehículo año 2019 (ton)	149
Figura 5-32 Emisiones de NO _x y CO de fuentes móviles por tipo de vehículos año 2019 (ton).	149
Figura 5-33 Emisiones de SO ₂ de fuentes móviles por región y tipo de vehículo año 2019 (ton)	151
Figura 5-34 Emisiones de NO _x de fuentes móviles por región y tipo de vehículo año 2019 (ton)	151
Figura 5-35 Emisiones de CO de fuentes móviles por región y tipo de vehículo, año 2019 (ton)	152
Figura 5-36 Emisiones CO de fuentes móviles para Región Metropolitana de Santiago Año 2019	153
Figura 5-37 Evolución de las emisiones SO ₂ de fuentes difusas (kton/año)	154
Figura 5-38 Evolución de las emisiones NO _x de fuentes difusas (kton/año)	155
Figura 5-39 Evolución de las emisiones CO de fuentes difusas (kton/año)	155
Figura 5-40 Emisiones SO ₂ de fuentes difusas por tipo de fuente (ton/año)	156
Figura 5-41 Emisiones NO _x de fuentes difusas por tipo de fuente (ton/año)	157
Figura 5-42 Emisiones CO de fuentes difusas por tipo de fuente (ton/año)	157
Figura 5-43 Emisiones SO ₂ de fuentes difusas por tipo de fuente año 2019 (ton)	158
Figura 5-44 Emisiones NO _x de fuentes difusas por tipo de fuente año 2019 (ton)	159
Figura 5-45 Emisiones CO de fuentes difusas por tipo de fuente año 2019 (ton)	159
Figura 5-46 Emisiones SO ₂ de fuentes difusas por región y tipo de fuente año 2019 (ton)	160
Figura 5-47 Emisiones NO _x de fuentes difusas por región y tipo de fuente año 2019 (ton)	161
Figura 5-48 Emisiones CO de fuentes difusas por región y tipo de fuente año 2019 (ton)	161
Figura 5-49 Evolución de emisiones totales de SO ₂ por tipo de emisión al aire (ton/año)	163
Figura 5-50 Evolución de emisiones totales de NO _x por tipo de emisión al aire (ton/año)	164
Figura 5-51 Evolución de emisiones totales de CO por tipo de emisión al aire (ton/año)	165
Figura 5-52 Evolución de emisiones totales de SO ₂ por región (ton/año)	166
Figura 5-53 Evolución de emisiones totales de NO _x por región (ton/año)	167
Figura 5-54 Evolución de emisiones totales de CO por región (ton/año)	168
Figura 5-55 Relación Emisión Concentración para SO ₂ Coronel	171

Figura 5-56 Relación Emisión Concentración para NO _x Concón.....	172
Figura 5-57 Trayectoria de emisiones línea base por contaminante	177
Figura 5-58 Proyección de emisiones SO ₂ de fuentes puntuales por rubro	178
Figura 5-59 Proyección de emisiones NO _x de fuentes puntuales por rubro	179
Figura 5-60 Proyección de emisiones SO ₂ de fuentes puntuales por región	180
Figura 5-61 Proyección de emisiones NO _x de fuentes puntuales por región.....	180
Figura 5-62 Proyección de emisiones (ton) SO ₂ de fuentes móviles	181
Figura 5-63 Proyección de emisiones (ton) NO _x de fuentes móviles	182
Figura 5-64 Proyección de emisiones (ton) CO de fuentes móviles	182
Figura 5-65 Proyección de emisiones (ton/año) de fuentes móviles de SO ₂ por tipo de vehículo	183
Figura 5-66 Proyección de emisiones (ton/año) de fuentes móviles para NO _x por tipo de vehículo	184
Figura 5-67 Proyección de emisiones (ton/año) de fuentes móviles para CO por tipo de vehículo	184
Figura 5-68 Proyección de emisiones (ton/año) SO ₂ de fuentes móviles por región.....	185
Figura 5-69 Proyección de emisiones (ton/año) NO _x de fuentes móviles por región.....	186
Figura 5-70 Proyección de emisiones (ton/año) CO de fuentes móviles por región.....	187
Figura 5-71 Proyección del percentil 99 de la media de 24 hrs de las concentraciones de SO ₂ en dos estaciones en Tocopilla, II Región.	189
Figura 5-72 Proyección del percentil 99 del máximo de 8 horas de las concentraciones de O ₃ en la estación Pudahuel, Región Metropolitana.	190
Figura 5-73 Proyección del percentil 99 del máximo de 8 horas de las concentraciones de CO en la estación Padre de las Casas, IX Región.	191
Figura 5-74 Proyección de la media anual de las concentraciones diarias de Pb en la estación Sur, II Región.	191
Figura 6-1 Índice Aire y Salud para contaminantes criterio en Monterrey, México.	208
Figura 6-2 Comparación Índice de Calidad del Aire para O ₃	219
Figura 6-3 Comparación Índice de Calidad del Aire para SO ₂	220
Figura 6-4 Comparación Índice de Calidad del Aire para CO.....	220
Figura 7-1 Ubicación sitio de muestreo Hospital del Cobre, Calama	241
Figura 7-2 Ubicación sitio de muestreo Pudahuel, Santiago	241
Figura 7-3 Ubicación sitio de muestreo Rancagua I, Rancagua.	242
Figura 7-4 Ubicación sitio de muestreo Nueva Libertad, Talcahuano.....	242
Figura 7-5 Muestreador MP ₁₀ en estación Hospital El Cobre, Calama	243
Figura 7-6 Muestreador MP ₁₀ en estación Pudahuel, Santiago.	244
Figura 7-7 Muestreador MP ₁₀ en estación Rancagua I, Rancagua.	244
Figura 7-8 Muestreador MP ₁₀ en estación Nueva Libertad, Talcahuano	245
Figura 7-9 Concentración de MP ₁₀ estación Hospital el Cobre (febrero – marzo 2024)	247
Figura 7-10 Concentración diaria MP10 Estación Pudahuel (febrero – marzo 2024)	248
Figura 7-11 Concentración diaria MP10 Estación Rancagua I (febrero – marzo 2024).....	249
Figura 7-12 Concentración diaria MP10 Estación Nueva Libertad (febrero – marzo 2024).....	250
Figura 7-13 Concentración de MP ₁₀ estación Hospital el Cobre (abril – mayo 2024)	252

Figura 7-14 Concentración diaria MP_{10} Estación Pudahuel (abril – mayo 2024)	253
Figura 7-15 Concentración diaria MP_{10} Estación Rancagua I (abril – mayo 2024)	254
Figura 7-16 Concentración diaria MP_{10} Estación Nueva Libertad (abril – mayo 2024)	255
Figura 8-1 Análisis de cumplimiento de propuestas de norma anual para plomo.....	269
Figura 8-2 Análisis de cumplimiento de propuestas de norma horaria para SO_2	272
Figura 8-3 Análisis de cumplimiento de propuestas de norma diaria para SO_2	273
Figura 8-4 Análisis de cumplimiento de propuestas de norma anual para SO_2	274
Figura 8-5 Análisis de cumplimiento de propuesta de norma secundaria 24h para SO_2	275
Figura 8-6 Análisis de cumplimiento de propuesta de norma horaria para CO.	278
Figura 8-7 Análisis de cumplimiento de propuestas de norma diaria para CO.	279
Figura 8-8 Análisis de cumplimiento de propuestas de norma octohoraria para O_3	282
Figura 9-1 Análisis de cumplimiento de propuestas de norma octohoraria para O_3	298

Prefijos

m: Mili (10^{-3})

μ : Micro (10^{-6})

Unidades Derivadas

m^3 : Metro cúbico (Volumen)

Formato

"." separador decimal

"," separador de miles

Resumen Ejecutivo

El presente informe corresponde al desarrollo del “Estudio de antecedentes para la revisión de las normas primarias de calidad del aire SO_2 , O_3 , Pb, y CO, y norma secundaria para SO_2 ”, licitación ID: 608897-119-LP23, solicitado por la Subsecretaría del Medio Ambiente. Su objetivo es fortalecer y justificar la fundamentación de la revisión de las normas de calidad del aire mencionadas. A continuación, se resumen las principales actividades desarrolladas y los principales resultados.

En primer lugar, se actualizaron los antecedentes de las normas respecto a los efectos en la salud y medio ambiente a partir de la revisión y análisis de estudios toxicológicos, epidemiológicos y recomendaciones de organizaciones internacionales, permitiendo encontrar nueva evidencia de efectos adversos relacionados a la exposición de los contaminantes. Además, se realizó una recopilación y comparación de normas de calidad del aire adoptadas o recomendadas internacionalmente, lo que permitió identificar estándares más rigurosos y métricas que sirven como guía para el futuro de las regulaciones chilenas, siendo organizaciones como la OMS, EPA y Unión Europea (UE) las principales referencias. Para el SO_2 primario se propone evaluar la reducción del valor límite de las métricas de 1 hora, 24 horas y anual, mientras que para el SO_2 secundario se podría modificar el estándar de la métrica anual. De igual manera, la evidencia recopilada respalda la posibilidad y pertinencia de seguir avanzando en la reducción del valor límite para el O_3 , y en el caso del CO, sería pertinente evaluar la factibilidad de implementar un nuevo estándar con una métrica de 24 horas para seguir en consonancia con las recomendaciones de la OMS. En el caso del plomo, la norma chilena anual coincide con los valores internacionales como las recomendaciones de la OMS y UE y la evidencia no permite recomendar reducir este estándar.

Se revisaron programas de medidas para la gestión de episodios de emergencia ambiental en 7 ciudades de referencia: Nueva York, California, Madrid, Bogotá, Monterrey, Sao Paulo y Beijing. Se compararon los protocolos con las acciones nacionales, encontrando que la gestión de episodios críticos nacional se encuentra actualizada y alineada respecto a las experiencias internacionales. Por tanto, se realizan propuestas de protocolos, donde su novedad se encuentra sólo en algunos elementos que podrían evaluarse su factibilidad de implementar en Chile, y de esa forma, seguir mejorando la gestión de episodios críticos en el país.

En segunda instancia, se hizo una revisión del protocolo general de muestreo de gases que establece la normativa vigente en el país para los contaminantes O_3 , CO y SO_2 , además de los equipos aprobados por la EPA para medir de manera continua los contaminantes mencionados. A continuación, se realizó una revisión de metodologías emergentes de medición continua y se desarrolló un análisis de la pertinencia de incluirlas en la medición de los contaminantes gaseosos regulados, obteniendo como recomendación no incluir estas nuevas metodologías de medición principalmente por no estar diseñadas para cumplimiento normativo. Por otro lado, se identificaron y analizaron técnicas de muestreo discontinuo para el Pb, realizando una

comparación entre ellas y generando recomendaciones de otras técnicas de análisis de plomo que sería pertinente agregar en la normativa ambiental: XRF, PIXE, ICP-OES e ICP-MS. Además, se llevaron a cabo dos campañas de monitoreo de plomo, una en verano y otra en otoño, en locaciones de Calama, Santiago, Rancagua y Talcahuano, previamente acordadas con el mandante. En ellas se midieron concentraciones de MP_{10} y se realizó una caracterización química de los filtros por medio de ICP/OES en el Laboratorio de Aguas y Alimentos de DICTUC. Los resultados arrojaron que en todas las mediciones se cumple la norma diaria de MP_{10} y que el plomo se encuentra bajo el límite de detección de $3 \mu\text{g}/\text{filtro}$ (entre $0,13 - 0,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ según la zona de medición), por lo que se estaría cumpliendo con la normativa actual anual de $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$.

Posteriormente, se analizó el comportamiento y tendencia histórica de las concentraciones de SO_2 , O_3 , Pb y CO, a partir de las mediciones registradas en el SINCA y en el monitoreo de plomo realizadas en la zona norte y centro del país entregadas por la contraparte, con lo que se elaboraron perfiles horarios, diarios y anuales de las concentraciones. Además, se obtuvo un diagnóstico de la calidad del aire para el periodo 2013-2023 incluyendo un análisis de cumplimiento normativo, lo que permitió definir zonas de interés por contaminante (ver Tabla 1-1) y dejó en evidencia incumplimientos actuales a la norma primaria de SO_2 y O_3 . A continuación, se analizó la relación de las concentraciones con las fuentes emisoras por medio de la elaboración de un inventario de emisiones, obteniendo las principales fuentes emisoras para cada contaminante, los rubros destacados y las ubicaciones geográficas con los mayores niveles. Para esto se usó información del Registro de emisiones y transferencias de contaminantes (RETC) y del Sistema de Impuesto Verde. Se evidenció que el 96% de las emisiones de SO_2 y el 57% de las emisiones de NO_x durante el 2019 provienen de fuentes puntuales, mientras que el 89,9% de las emisiones de CO para ese mismo año se atribuyen a las fuentes difusas. El área de generación eléctrica corresponde al rubro que más participación tiene en las emisiones puntuales de SO_2 y NO_x a nivel nacional, y respecto a las emisiones móviles éstas se centran en la Región Metropolitana, mayormente en vehículos particulares, seguidos por los comerciales. Se observó que las emisiones difusas de CO se concentran entre la Región del Biobío y Los Lagos, siendo la combustión de leña residencial la principal contribución para este contaminante, con un 86%. Luego se proyectaron las emisiones de las zonas de interés a 10 años en un escenario “*business as usual*”, utilizando como año base el 2022, evidenciando una tendencia global a la baja de las emisiones puntuales de SO_2 y NO_x hasta el año 2027, para luego incrementar levemente las emisiones hasta el 2032, y tendencia a la baja para las emisiones móviles de SO_2 , NO_x y CO. Sin perjuicio de lo anterior, la información relativa a las emisiones nacionales recopiladas del sistema RETC, al ser de carácter voluntario y autodeclarativas, presenta numerosas inconsistencias en las declaraciones de emisiones entre un año y otro, las cuales fueron comentadas con la contraparte. Es por esto que su uso para los análisis siguientes fue cauteloso y complementado con otras fuentes de información como los Planes de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica (PPDAs) locales.

Tabla 1-1 Zonas de interés por contaminante.

Contaminante	Región	Zona de interés	Comuna
SO₂ primario y secundario	Antofagasta	Tocopilla	Tocopilla
	Atacama	Copiapó	Copiapó ⁽¹⁾
		Copiapó	Tierra Amarilla ⁽²⁾
	Valparaíso	Puchuncaví	Puchuncaví ⁽²⁾
		Catemu	Catemu ⁽¹⁾
		Puchuncaví	Quintero ⁽²⁾
	O'Higgins	Machalí	Machalí
	Biobío	Coronel	Coronel
O₃	Atacama	Huasco	Huasco
	Valparaíso	Los Andes	Los Andes
		Quillota	Quillota
		Concón	Concón
	Metropolitana	Santiago	Todas ⁽¹⁾
	O'Higgins	Rengo	Rengo
		San Fernando	San Fernando
Pb	Antofagasta	Sierra Gorda	Sierra Gorda

(1): Posee estaciones monitoras con representatividad poblacional.

(2): Posee estaciones monitoras con representatividad poblacional y también con representatividad de recursos naturales.

Fuente: Elaboración propia.

En base a los antecedentes generados en etapas previas, se realiza una propuesta de dos escenarios de revisión para las normas (ver Tabla 1-2), considerando además como alternativa mantener los niveles de los estadígrafos de normas en revisión, ocupando de referencia valores establecidos por la Unión Europea, la EPA y la OMS, tanto es sus valores guías como objetivos intermedios. Se proponen valores inferiores a los establecidos en las normas nacionales y la incorporación de una norma de 24 horas para el CO. La propuesta de norma viene a complementar los instrumentos regulatorios existentes y generar un mayor compromiso de mejora en la calidad del aire, especialmente en las zonas regidas por PPDAs, donde se cuenta con diversas estrategias para reducir la contaminación y que podrían facilitar la implementación de las normas propuestas. Además, se incluye una propuesta de protocolos de fiscalización de las normas y recomendación del método de monitoreo de éstas, junto a su frecuencia.

Se llevó a cabo un diagnóstico de cumplimiento de los escenarios normativos para el periodo 2019-2023, revelando que para el SO₂ comunas de interés como Catemu y Puchuncaví presentarían niveles de saturación continuos para los escenarios normativos 1 (1 hora) y 2 (24 horas, anual primaria y secundaria). Catemu fue el único lugar en que podrían registrarse episodios de emergencia ambiental, específicamente en la estación Santa Margarita que cuenta con representatividad poblacional. Para la propuesta de norma secundaria de 24 horas, Puchuncaví se encontraría en estado de latencia o saturación durante todo el periodo analizado. Respecto al O₃, se identificaron numerosas comunas que estarían saturadas y en latencia. Para la propuesta 1, se obtuvo que Rengo, San Fernando, Los Andes y la Región Metropolitana representarían zonas saturadas, siendo esta última la única con estaciones de monitoreo con representatividad poblacional. Para la propuesta 2, Calama y varias comunas en Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins, Maule, Ñuble y Biobío también mostrarían saturación continua. Las regiones centrales concentrarían la mayoría de los episodios de emergencia ambiental. En relación al CO, solo se detectarían zonas de latencia en Cerro Navia, Coyhaique y Coronel, sin reportar episodios de emergencia ambiental para ninguno de los escenarios normativos analizados.

Tabla 1-2 Propuesta de normas.

Contaminante	Escenario	Fuente	Max 1h	Max 8h	Media 24h	Media anual
O₃ (µg/m³)	Base	NPCA		120		
	Propuesta 1	OMS-OI1		100		
	Propuesta 2	OMS-VG		60		
CO (mg/m³)	Base	NPCA	30	10		
	Propuesta 1	Canadá; OMS-OI1	25		7	
	Propuesta 2	OMS-VG			4	
SO₂ primaria (µg/m³)	Base	NPCA	350		150	60
	Propuesta 1	OMS-OI1; Alemania	250		125	50
	Propuesta 2	USA; OMS-VG; UE2030	197		40	20
SO₂ secundaria (µg/m³)	Base	NSCA	700 sur/ 1000 norte		260 sur/ 365 norte	60 sur/ 80 norte
	Propuesta 1	Avanzar a escenario base norma primaria			150	50
	Propuesta 2	UE			150	20
Pb (µg/m³)	Base	NPCA				0,5
	Propuesta 1	*				0,3
	Propuesta 2	*				0,15

NPCA: Norma primaria de calidad del aire.

NSCA: Norma secundaria de calidad del aire.

OI: Objetivo Intermedio de la OMS.

VG: Valor Guía de la OMS.

*A modo de ejercicio. No se considera que exista una justificación sólida para actualizar el valor límite actualmente vigente, ya que se encuentra en línea con los estándares establecidos internacionalmente.

Fuente: Elaboración propia

A partir de los escenarios normativos, se realiza una evaluación y cuantificación de los costos asociados a la aplicación y cumplimiento de los mismos en las zonas de interés, debido a que las reducciones de emisiones asociadas a los cumplimientos normativos se darán en las fuentes presentes en estas zonas. Con la reducción de concentraciones se estimaron los beneficios asociados a las muertes evitadas por contaminante usando los coeficientes de riesgo de cada contaminante presentes en la evidencia científica para el SO_2 , O_3 y CO . No se realiza análisis para el plomo debido a que no existe evidencia sobre un coeficiente de riesgo asociado a mortalidad por exposición a este contaminante. Para el SO_2 no se pudo estimar los beneficios para la norma anual dado que solo se cuenta con coeficientes de riesgo a la salud (betas) a corto plazo, principalmente debido a la escasa evidencia de los efectos adversos a largo plazo para el SO_2 .

Usando el porcentaje de reducción de concentraciones anual, se estimó la reducción de emisiones requerida para poder cumplir con las propuestas. Cabe destacar que la reducción potencial de emisiones, dadas las fuentes por zonas y las tecnologías de abatimiento existentes, pueden no ser suficientes para poder alcanzar lo requerido por la norma. Esto es especialmente relevante en el caso del análisis de O_3 . En Huasco y Quillota las alternativas de mitigación empleadas para alcanzar la norma actual reducen a tal nivel las concentraciones, que no se necesitan reducciones adicionales para cumplir con las propuestas 1 y 2. De manera similar ocurre con San Fernando, ya que el cumplimiento de la propuesta 1 implica el cumplimiento de la propuesta 2. En el caso de Rengo y Santiago sucede lo opuesto, ya que las medidas de reducción de emisiones no permiten reducir las concentraciones y alcanzar los estándares propuestos, ni siquiera la norma actual. Debido a esto, no aparecen beneficios adicionales en los escenarios más exigentes, ya que no se estaría cumpliendo con esos estándares. Cabe recordar que los costos que se consideran corresponden a medidas de fuentes fijas y la principal fuente de emisiones de NO_x asociada a las concentraciones de O_3 corresponden a fuentes móviles. Las principales fuentes que reducen emisiones, y que por tanto generan mayores costos, son los Hornos de Fusión, Hornos de Proceso, Convertidor Pierce Smith (CPS) y Calderas Industriales.

Del análisis costo beneficio se desprende que en el caso del SO_2 , Catemu es la zona que presenta los valores más elevados, alcanzando costos de UF 5.228 miles para la propuesta 1. Este valor se triplica cuando se considera el estándar más elevado de la propuesta 2. Coronel le sigue, pero con valores definitivamente menores. Esto se debe a que en ambos lugares se mantienen fuentes de emisión como la Fundición Chagres y el Complejo Termoeléctrico Santa María por el período analizado. Si bien en Machalí también se mantiene la Fundición Caletones, las concentraciones que se proyectan en esta zona no superan los escenarios propuestos. Para la norma de O_3 , Concón presenta los costos más altos, con UF 44 miles y UF 66 miles para los escenarios 1 y 2. Sin embargo, los beneficios no son de la misma magnitud, arrojando relaciones de beneficio/costo del orden de 0.10. San Fernando sí presenta indicadores de 1,63, indicando una superación de los beneficios por sobre los costos, en ambos escenarios.

1. Antecedentes y justificación del estudio

La Ley N°19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, establece entre sus instrumentos de gestión ambiental, la existencia de dos tipos de normas, de calidad ambiental y de emisión, donde el proceso se encuentra regulado mediante el Decreto Supremo N°38, de 2012, del Ministerio del Medio Ambiente, que Aprueba reglamento para la dictación de normas de calidad ambiental y de emisión.

Las normas de calidad ambiental pueden ser primarias o secundarias. Las normas de calidad primaria son aquellas que tienen como objetivo proteger la salud de la población humana dentro del territorio nacional, mientras que las normas de calidad secundaria tienen por objetivo proteger o conservar el medio ambiente o la naturaleza, pudiendo ser de carácter local y no necesariamente nacional.

El proceso de Transición Socio Ecológica Justa (TSEJ)¹ constituye una prioridad para el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) y el actual Gobierno, lo cual implica avanzar en la protección de la vida y del medio ambiente, garantizando que los beneficios se compartan amplia y equitativamente a través de la creación de normas de calidad y emisión que mejoren la calidad de vida de las comunidades, el fortalecimiento de la institucionalidad ambiental para que los proyectos de inversión estén alineados con la resiliencia climática, descarbonización y altos estándares de protección ambiental, además del fortalecimiento de la cohesión social mediante instancias de gobernanza pertinentes territorialmente y la participación pública.

En este contexto, es sabido que en Chile existen territorios en los cuales se han conjugado, por un lado, una fuerte presencia de industrias y, por otro lado, centros urbanos (Coronel, Mejillones, Til Til, Huasco, Concón, Quintero y Puchuncaví, entre otros) y en dicho marco se ha enfatizado la necesidad de acelerar los procesos normativos de los instrumentos regulatorios de mayor incidencia en dichos territorios.

A partir de lo anterior, el MMA a través de la Resolución Exenta N°1206 de 2022, estableció el Programa de Regulación Ambiental 2022-2023, en el cual se contempla la elaboración y revisión de diversas normativas tanto de calidad del aire como de emisión, cuyo avance y finalización durante el mencionado periodo es prioridad.

En este sentido, es importante destacar que, con la realización de este estudio, se avanzará en la implementación de las medidas contenidas en el Programa para la Recuperación Ambiental y Social (PRAS) en la componente aire, en los territorios de transición, abarcando también a otros lugares del país. En particular, las medidas de los PRAS que serán avanzadas con el desarrollo del estudio son, principalmente las mencionadas en la Tabla 1-1.

¹ TSEJ entendida como promover una sociedad resiliente baja en carbono y contaminantes en que la protección ambiental sea parte de las decisiones del Estado, comunidades y sector privado.

Tabla 1-1 PRAS a abordar en el estudio

PRAS	Medida
Quintero - Puchuncaví	A. 1.8: Contar con norma para dióxido de azufre (SO ₂) asimilable a estándares OCDE.
	A.1.6: Implementar un sistema de análisis de arsénico, metales trazas y especiación química.
Huasco	A.1.3 Contar con una actualización de la norma primaria de Calidad del Aire para dióxido de azufre (SO ₂).
	A.1.4 Actualización de la norma secundaria de calidad del aire para SO ₂ , con el fin de equilibrar los valores de la norma anual y diaria para la zona norte y sur del país.
	A. 1.6 Iniciar un proceso gradual de revisión y actualización de normas ambientales de calidad de aire.
Coronel	A.1.3 Mejorar la calidad del aire y el sistema actual de monitoreo de la comuna de Coronel.
	A.1.9 Contar con estándares de calidad de aire más estrictos para material particulado y SO ₂ , y desarrollar proceso de revisión de norma de calidad secundaria de aire para anhídrido sulfuroso (SO ₂) , D.S. N°22, de 2009, del Minsegespres.

Fuente: Bases Técnicas del Estudio.

La Ley N°21.455 denominada Ley Marco de Cambio Climático, en su artículo 46 modificó la Ley N°19.300, entre otros, a lo relacionado a la frecuencia de revisión de las normas de calidad, la cual ahora se debe realizar cada 4 años. Posteriormente, en la Ley N°21.562 que modifica la Ley N°19.300, se agrega sanción al jefe superior del órgano o servicio de la Administración del Estado si no se cumplen los plazos estipulados para la revisión. Por tanto, la gestión ambiental de normas de calidad deberá ajustarse a estas nuevas obligaciones, generando que se requiera iniciar nuevos procesos de revisiones de norma.

1.1 Normas de calidad

La contaminación atmosférica hace referencia a toda sustancia que en ciertas concentraciones es perjudicial para el ser humano y su entorno. Actualmente, el país cuenta con 8 normas primarias de calidad del aire para los contaminantes material particulado MP₁₀ y MP_{2,5}, dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), compuesto orgánico volátil benceno (COV-benceno), plomo (Pb) y ozono (O₃), más 1 nueva norma en elaboración respecto al contaminante arsénico (As). Por otro lado, se cuenta con 2 normas de calidad secundarias de calidad del aire, una para SO₂ a nivel nacional y otra para material particulado sedimentable (MPS) en la cuenca del río Huasco, región de Atacama.

Respecto a los efectos en salud y fuentes de emisión de los contaminantes contemplados en esta licitación, en las Bases Técnicas del Estudio de forma general se señala que:

- El dióxido de azufre (SO₂), también conocido como anhídrido sulfuroso, es un contaminante gaseoso que proviene principalmente de la combustión de combustibles fósiles (madera, carbón y derivados del petróleo), y ha estado históricamente involucrado en los principales episodios de alta contaminación atmosférica (Bell et al., 2004). Las emisiones que conducen a altas concentraciones de SO₂ generalmente también conducen a la formación de otros óxidos de azufre (SO_x). En la naturaleza, el SO₂ puede ser liberado al aire por erupciones volcánicas.

Las exposiciones a corto plazo al SO_2 pueden dañar el sistema respiratorio humano y dificultar la respiración. Las personas con asma, en particular los niños, son sensibles a estos efectos del SO_2 . La evidencia toxicológica demuestra los mecanismos de daño, tanto respiratorio como sistémico. También la evidencia epidemiológica indica daño respiratorio y cardiovascular agudo, así como daño crónico respiratorio y sobre el desarrollo fetal. Son también conocidos sus efectos sobre la vegetación, algunos benéficos como los de efecto fertilizante, pero mayormente negativos como la reducción del crecimiento, daños visibles en el follaje como síntomas crónicos o agudos, asociados o no a reducciones en el crecimiento y la producción, así como muerte de plantas en condiciones extremas; sobre los ecosistemas interfiriendo en el equilibrio de las condiciones ambientales del hábitat, cuando la presencia de azufre en ellos es elevada; y sobre los materiales expuestos a este contaminante.

- El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro, inodoro, insípido y no irritante, pero tóxico para los seres hemoglobinizados, ya que desplaza al oxígeno y no permite la correcta oxigenación de las células. Éste se emite primariamente a partir de la combustión incompleta de combustibles fósiles, quemas naturales de biomasa, y por otros procesos biológicos del suelo y los océanos.
- El ozono (O_3) presente en la troposfera es un gas de olor picante y actúa como un tóxico irritante para el sistema respiratorio. Se produce por reacciones fotoquímicas a partir de otros gases presentes en la troposfera, siendo sus precursores principales los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COVs). Dado esto, su perfil de concentraciones diario se relaciona directamente con el máximo de radiación solar y temperatura ya que éstos favorecen su formación, encontrándose además máximos de concentraciones de O_3 viento abajo de las emisiones de sus precursores.
- El plomo (Pb) es un metal pesado, de baja temperatura de fusión, de color gris azulado, de forma natural se encuentra en la corteza terrestre, principalmente combinado con otros elementos. En la atmósfera es parte del material particulado y su presencia se debe a las actividades humanas. Históricamente se ha utilizado el plomo en los combustibles, pesticidas, pinturas, manufactura de municiones y baterías, pero debido a su alta toxicidad y posible agente cancerígeno en el ser humano, se regula o prohíbe su uso en los combustibles, pesticidas y pinturas.

En Chile, la primera regulación que estableció estándares de calidad del aire se dictó en el año 1978, a través de la Resolución N°1.215, del Ministerio de Salud, denominada "Normas sanitarias mínimas destinadas a prevenir y controlar la contaminación atmosférica". La resolución incluyó niveles permitidos de calidad de aire para los contaminantes monóxido de carbono (CO), ozono (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2) y partículas totales en suspensión (PTS).

La Resolución N°1.215 de 1978 estableció para SO₂ un estándar anual de 80 µg/m³N y de 365 µg/m³N para promedios diarios. Para CO se estableció un valor límite de 10 mg/m³N para concentraciones de 8 horas y 40 mg/m³N para concentraciones de 1 hora. Para O₃ se estableció un valor límite de 160 µg/m³N para concentraciones de 1 hora.

En el año 1999, la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) inició la revisión de todas las normas primarias de calidad del aire contenidas en la Resolución N°1.215 culminando el 6 de agosto del 2002 con la promulgación de los Decretos Supremos N°112, N°113 y N°115 del MINSEGPRES, donde se establecieron respectivamente las normas primarias de O₃, SO₂ y CO. Para el O₃, se derogó la norma horaria estableciendo una norma para concentraciones de 8 horas con un límite de 120 µg/m³N para el promedio aritmético de tres años sucesivos del percentil 99 de los máximos diarios de concentración de 8 horas registrados durante un año calendario. Respecto a SO₂ el estándar de promedio anual se mantuvo en 80 µg/m³N, pero disminuyó el límite para las concentraciones diarias a 250 µg/m³N para el promedio aritmético de tres años sucesivos, del percentil 99 de las concentraciones de 24 horas registradas durante un año calendario. Para CO se mantuvo el valor límite de las concentraciones de 8 horas en 10 mg/m³N, pero disminuyó el de concentración horaria a 30 mg/m³N, en ambos casos para evaluar la superación se considera el promedio aritmético de tres años sucesivos del percentil 99 de las concentraciones registradas durante un año calendario.

En el 2010, la CONAMA, inició un segundo proceso de revisión de todas las normas primarias de calidad del aire de gases (SO₂, NO₂, O₃ y CO), mediante la Resolución Exenta N°35, del mismo organismo. Previamente, la CONAMA realizó un estudio, cuyos resultados permitieron realizar un diagnóstico preliminar del estado de cumplimiento de las normas para esa época.

Durante el año 2014, el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), en la Resolución Exenta N°1.366 del 29 de diciembre de 2014 priorizó la preparación del anteproyecto de revisión de las normas primarias de calidad de aire para SO₂ separando la revisión de las normas primarias de calidad del aire para NO₂, O₃ y CO. Por lo anterior, en el año 2016 se realizó el estudio: "Análisis de antecedentes y evaluación de impactos para revisar las normas NO₂, O₃ y CO" (en adelante estudio 2016²), preparado por el Instituto de Salud Poblacional de la Universidad de Chile.

En mayo de 2019 se publicó en el Diario Oficial una actualización de la norma primaria de calidad de SO₂ (D.S. N°104/2018 del MMA), la cual consideró la evidencia sobre la tendencia internacional en la actualización de las normas primarias de SO₂, las que incluyen: (i) una norma horaria de SO₂ para la protección de los efectos agudos del SO₂, y (ii) niveles de emergencia que alertan a la población y en especial a los grupos vulnerables, como asmáticos, infantes, niños y ancianos; con el fin de reducir la exposición a concentraciones de SO₂ durante situaciones de emergencia. Asimismo, en los episodios de contaminación más críticos se permiten tomar medidas extraordinarias como restricciones a fuentes emisoras de SO₂. Además, la actualización de la norma primaria de SO₂ concilio objetivos del país en materias de políticas de salud, políticas

² Licitación N° 608897-161-LE15, Informe final mayo de 2016

ambientales y políticas económicas. Se incluyó la nueva evidencia, principalmente epidemiológica, de los efectos agudos del dióxido de azufre en la salud de las personas. Asimismo, se consideró que Chile forma parte de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), lo que conlleva importantes desafíos en la integración de las consideraciones ambientales en el marco normativo y de las políticas públicas ambientales.

A continuación, en la Tabla 1-2 y la Tabla 1-3 se resumen los valores límites y niveles de emergencia establecidos en las normas primarias de O₃, Pb, SO₂ y CO y norma secundaria de SO₂ vigentes en Chile.

Tabla 1-2 Resumen de valores límites considerados en las normas primarias de O₃, SO₂ y CO y normas secundarias de SO₂ vigentes en Chile

Contaminante	Tipo norma	Normativa	Estadígrafo	Valor límite
O ₃	Primaria	D.S. N°112/2002, MINSEGPRES	Máx diario de 8 horas, percentil 99	120 µg/m ³
Pb	Primaria	D.S. N°136/2000, MINSEGPRES	Promedio anual de dos años	0,5 µg/m ³ N
SO ₂	Primaria	D.S. N°104/2018, MMA	Promedio horario, percentil 98,5	350 µg/m ³ N
			Promedio diario, percentil 99	150 µg/m ³ N
			Media aritmética anual	60 µg/m ³ N
CO	Primaria	D.S. N°115/2002, MINSEGPRES	Máx diario de 8 horas, percentil 99	10 mg/m ³ N
			Máx diario de 1 hora, percentil 99	30 mg/m ³ N
SO ₂	Secundaria	D.S. N°22/2009, MINSEGPRES	Promedio horario, percentil 99,73	700 µg/m ³ N
			Promedio diario, percentil 99,7	260 µg/m ³ N
			Media aritmética anual	60 µg/m ³ N

Fuente: Bases Técnicas del Estudio

Tabla 1-3 Niveles de emergencia vigentes en Chile para O₃, SO₂ y CO

Niveles	Concentración de 8 horas de O ₃ (µg/m ³ N) D.S. N°112/2002	Concentración 1 hora de SO ₂ (µg/m ³ N) D.S. N°104/2018	Concentración de 8 horas de CO (mg/m ³ N) D.S. N°115/2002
Alerta	400 - 799	500 - 649	17 - 33
Preemergencia	800 - 999	650 - 949	34 - 39
Emergencia	1000 o superior	950 o superior	40 o superior

Fuente: Bases Técnicas del Estudio

Por otro lado, mediante el D.S. N°185 de 1991 del Ministerio de Minería, publicado en el Diario Oficial el día 16 de enero de 1992, se estableció la norma secundaria de calidad ambiental para SO₂ con el objeto de proteger las explotaciones silvoagropecuarias y de preservar los ecosistemas pertenecientes a las Áreas Silvestres Protegidas. Para efectos de aplicación de la norma secundaria de SO₂ el país se dividió en zona Norte y zona Sur (con límite a la altura de la desembocadura del río Maipo) estableciendo para la zona Norte un valor límite anual de 80 µg/m³N, un valor de 365 µg/m³N para concentraciones diarias y 1000 µg/m³N para

concentraciones horarias. En cambio, para la zona Sur se estableció límite anual de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, $260 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ para concentraciones diarias y $700 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ para concentraciones horarias.

Posteriormente, mediante el D.S. N°22/2009 de MINSEGPRES se efectuó un mejoramiento del D.S. N°185/1991 mediante la introducción del percentil como criterio de excedencia a la norma diaria y horaria, pero manteniendo los valores límites para las zonas Norte y Sur. Además, se actualizaron los métodos de monitoreo; la obligación de entrega de información al fiscalizador y la caracterización de estaciones monitoras apropiadas para evaluar la norma secundaria definiendo la Estación monitora con representatividad de recursos naturales (EMRRN). Lo anterior, en armonía con lo establecido en las demás normas de calidad vigentes en el país.

1.2 Contenidos relevantes a considerar en la actualización de las normas de calidad del aire

La normativa chilena contempla normas primarias y secundarias, y el proceso para su dictación o revisión se encuentra regulado mediante el Decreto Supremo N°38, de 2012, del Ministerio del Medio Ambiente.

En el proceso de elaboración o revisión de las normas primarias de calidad del aire, se identifican dos tópicos relevantes. En primer lugar, se encuentran los valores de las normas primarias junto a sus criterios de excedencia, y como segundo tópico, los niveles de emergencia que resguardan a la población en caso de episodios de contaminación.

i. Valores de las normas y criterios de excedencias

Las normas primarias de calidad del aire tienen por objetivo proteger la salud de las personas, de los efectos agudos y crónicos, generados por la exposición de las personas a concentraciones de contaminantes en el aire.

Los valores de las normas primarias de calidad del aire varían en función del enfoque adoptado por cada país, con el fin de equilibrar los riesgos en la salud de las personas, la viabilidad tecnológica, los aspectos económicos y otros factores políticos y sociales de diversa índole, que a su vez dependerán, entre otras cosas, del nivel de desarrollo y la capacidad nacional en relación con la gestión de la calidad del aire.

Los criterios de excedencia, en su mayoría, son estadígrafos que indican las veces que se permite la superación del valor de la norma.

ii. Niveles de emergencia

Los niveles de emergencia tienen por objetivo proteger la salud de las personas, reduciendo la exposición de la población, en situaciones de episodios de emergencia de contaminación, los cuales se caracterizan por ser eventos en que existe una alta concentración del

contaminante en un corto período de tiempo. Sin embargo, no todas las normas de calidad primaria requieren establecer niveles de emergencia, ya que depende principalmente de la evidencia toxicológica y epidemiológica de los efectos agudos sobre los grupos sensibles de la población, de las rutas y tiempo de exposición al contaminante.

Respecto a la elaboración de las normas secundarias de calidad del aire, se deben considerar los siguientes aspectos relevantes:

- i. Riesgo o alteración significativa del patrón de distribución geográfica de una especie de flora o fauna o de un determinado tipo de ecosistema nacional, especialmente de aquellos que sean únicos, escasos o representativos, que ponga en peligro su permanencia, capacidad de regeneración, evolución y desarrollo.
- ii. Riesgo o alteración significativa en la abundancia poblacional de una especie, subespecie de flora o fauna, o de un determinado tipo de comunidad o ecosistema, que ponga en peligro su existencia en el medio ambiente.
- iii. Riesgo o alteración de los componentes ambientales que son materia de utilización por poblaciones locales, en especial genes, especies, ecosistemas, suelo, agua y glaciares.
- iv. Riesgo o degradación significativa de monumentos nacionales, sitios con valor antropológico, arqueológico, histórico y, en general, los pertenecientes al patrimonio cultural.

Por otro lado, para la actualización de las normas se debe considerar, además de los valores propuestos por la Unión Europea y la EPA, la nueva guía de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS) publicada en el año 2021 en la cual se actualizan los valores límites recomendados y los valores objetivos intermedios para diferentes contaminantes atmosféricos, entre estos, el SO₂, CO y O₃ cuyos valores guías se resumen en la Tabla 1-4. Dicha guía tiene como finalidad asesorar a los países para que alcancen los niveles de calidad del aire recomendados mediante una reducción gradual, lo que conlleva a resguardar la salud de la población, disminuyendo así la carga de morbilidad derivada de accidentes cerebrovasculares, cánceres de pulmón y neumopatías crónicas y agudas.

Tabla 1-4 Valores guía propuestos por la OMS para SO₂, CO y O₃ en publicación del año 2021

Contaminante	Estadígrafo	Valor guía 2005	Valor guía 2021
SO ₂	Concentración 24 horas ^a	20 g/m ³	40 µg/m ³
	Concentración 10 minutos	500 µg/m ³	500 µg/m ³
CO	Concentración 24 horas ^a		4 mg/m ³
	Concentración 8 horas	—	10 mg/m ³
	Concentración 1 hora	—	35 mg/m ³
	Concentración 15 minutos		100 mg/m ³
O ₃	Máximo temporada ^b	—	60 µg/m ³
	Concentración 8 horas ^a	100 µg/m ³	100 µg/m ³
Pb	Concentración 1 año	0,5 µg/m ³	0,5 µg/m ³

^a Percentil 99 (equivalente a 3-4 excedencias al año).

^b Máximo del promedio de 8 horas máximas mensuales de 6 meses móviles consecutivos.

Fuente: European Environment Agency (2023) & WHO (2000)

1.3 Criterios para revisar y actualizar las normas ambientales

El Reglamento para la dictación de normas de calidad ambiental y de emisión, D.S. N°38 del año 2012, del MMA, en su artículo 39 indica que, para revisar las normas ambientales, se debe considerar criterios de eficacia y de eficiencia en su aplicación, ponderados de acuerdo con:

- Los antecedentes considerados para la determinación de la norma de conformidad con lo dispuesto en el artículo 26, 28 inciso 1°, 32 inciso 1° y 37 letra a) del citado Reglamento, que tienen que ver con actualizaciones de los antecedentes considerados para establecer los estándares.
- El nivel de cumplimiento informado por la Superintendencia del Medio Ambiente y vigencia actual de los objetivos tenidos en cuenta al momento de su dictación.
- Los cambios en las condiciones ambientales consideradas al momento de dictarse la norma, y
- Los resultados de las investigaciones científicas que aporten antecedentes nuevos sobre efectos adversos a las personas o a los recursos naturales o sobre nuevas metodologías de medición.

En base a lo anterior, se requiere contar con los antecedentes sobre nueva evidencia científica en salud según sea el caso, la tendencia de la contaminación por gases en el país y las referencias regulatorias internacionales que fortalezcan y justifiquen la fundamentación para la revisión de las normas de calidad primaria y secundaria de dióxido de azufre (SO₂) , y las normas de calidad primaria para ozono (O₃) , monóxido de carbono (CO) y plomo (Pb), considerando los costos y desafíos asociados a diferentes escenarios regulatorios.

2. Objetivos del estudio

2.1 Objetivo general

Contar con antecedentes sobre la nueva evidencia científica en salud y recursos naturales, según sea el caso, la tendencia de la normativa nacional e internacional, las consideraciones y enfoques utilizados en la evaluación económica y social de las normas ambientales para fortalecer la fundamentación de la revisión de las normas de calidad primaria y secundaria de dióxido de azufre (SO₂) y de las normas de calidad primaria para ozono (O₃) , plomo (Pb) y monóxido de carbono (CO), considerando los costos y desafíos asociados a diferentes escenarios regulatorios.

2.2 Objetivos específicos

- a) Actualización tanto de la evidencia en salud de la exposición (efectos crónicos y agudos) a concentraciones de SO₂, O₃, Pb y CO, como de la evidencia para establecer los niveles de exposición a concentraciones de SO₂ para la protección o conservación del medio ambiente o la preservación de la naturaleza, disponible internacionalmente y en Chile.
- b) Recopilación y comparación de los valores de las normas de calidad del aire adoptadas o recomendadas a nivel internacional para SO₂ (primaria y secundaria), O₃, Pb y CO.
- c) Análisis del origen, comportamiento, tendencia histórica y proyección de la concentración de SO₂, O₃, Pb y CO, a nivel nacional, regional y/o por área de interés incluyendo la actualización y proyección de inventarios de emisión.
- d) Revisión de programas de medidas para la gestión de episodios de emergencia ambiental a nivel internacional y comparación con lo vigente en Chile para SO₂, O₃, Pb y CO.
- e) Diseño e implementación una campaña de monitoreo para plomo.
- f) Propuesta de escenarios de revisión para las normas primarias de SO₂, O₃, Pb y CO y para norma secundaria de SO₂.
- g) Evaluación y cuantificación de los costos asociados a la aplicación y cumplimiento de la normativa y escenarios propuestos, el impacto (cuantificación) en los valores de las normas primarias relacionadas, y los beneficios en salud y ambientales, a fin de ser utilizado en estudio de AGIES.
- h) Presentación de los resultados del estudio.

2.3 Alcance de este informe

El presente informe contiene el desarrollo de todas las actividades asociadas al cumplimiento de todos los objetivos específicos, en los términos descritos en las Bases Técnicas, respectivamente. En la Tabla 2-1 se presenta la sección en la cual se presenta cada actividad según las Bases Técnicas.

Tabla 2-1 Actividades abordadas en este informe

Actividad según bases técnicas	Descripción de la actividad	Sección del Informe
a.1)	Revisión bibliográfica y análisis de estudios toxicológicos, epidemiológicos y guías metodológicas.	Sección 3.1
a.2)	Análisis de correlación entre contaminantes y sus efectos crónicos y agudos en la salud de la población.	Sección 3.2
a.3)	Determinación de efectos agudos y crónicos generados por exposición a SO ₂ en medio ambiente y naturaleza.	Sección 3.4
b.1)	Análisis de la normativa internacional	Sección 4.1
b.2)	Análisis y sistematización de los criterios de excedencia en EEUU, comunidad europea, países OCDE y Japón, entre otros.	Sección 4.2
b.3)	Estudio y síntesis de metodologías de monitoreo aplicadas a nivel internacional.	Sección 4.3
c.1)	Síntesis descriptiva de SO ₂ , O ₃ , Pb y CO.	Sección 5.1
c.2)	Elaboración de ciclos que muestren la evolución de SO ₂ , O ₃ , Pb y CO	Sección 5.2
c.3)	Realización de un diagnóstico de la calidad del aire para SO ₂ , O ₃ , Pb y CO	Sección 5.3
c.4)	Relación concentraciones SO ₂ , O ₃ , Pb y CO con sus fuentes emisoras para inventario	Sección 5.4
c.5)	Proyección del inventario de emisiones a 10 años	Sección 5.5
d.1)	Identificación de programas de medidas de gestión implementados en 6 países	Sección 6.1
d.2)	Propuesta de programas de medidas de gestión de episodios a implementar	Sección 0
d.3)	Evaluar si para el caso del plomo, es posible establecer niveles y/o gestión de episodios de emergencia ambiental.	Sección 6.3.1.1
e.1)	Identificación de técnicas de análisis de muestras para el monitoreo discontinuo.	Sección 7.1
e.2)	Realización de campañas de monitoreo de Pb y entrega de resultados	Sección 7.3
f.1)	Propuesta de nuevos escenarios normativos y valores que generarían episodios de contaminación atmosférica	Sección 8.1
f.2)	Análisis de convergencia entre propuesta de norma y otros instrumentos regulatorios	Sección 8.1.1
f.3)	Diagnóstico del cumplimiento de los nuevos escenarios normativos	Sección 8.2.1
f.4)	Recomendación de método de monitoreo, frecuencia y zona de interés para cada contaminante	Sección 8.3.1
f.5)	Propuesta de protocolos de fiscalización de las normas	Sección 8.5
g.1)	Selección de criterios y enfoques utilizados para la evaluación del impacto económico y social	Sección 9.1
g.2)	Cuantificación del número de casos y valoración de los beneficios en la población más expuesta para los escenarios propuestos	Sección 9.2
g.3)	Identificación por fuente de potenciales tecnologías de abatimiento para la reducción de contaminantes en los escenarios regulados	Sección 9.3
g.4)	Descripción de potenciales medidas de abatimiento	Sección 9.4
g.5)	Estimación de los costos de implementación y cumplimiento de las normas para cada escenario propuesto	Sección 9.5
h.1)	Reuniones de avance del estudio	Sección 10.1
h.2)	Presentación de informes y presentación final	Sección 10.2

Fuente: Elaboración propia

3. Actualización de la evidencia en salud de la exposición a SO₂, O₃, Pb y CO, y de la evidencia para establecer los niveles de exposición a SO₂ para la protección o conservación del medio ambiente o la preservación de la naturaleza

En este capítulo se presenta la actualización de la evidencia en salud de la exposición a SO₂, O₃, Pb y CO, y de la evidencia para establecer los niveles de exposición a SO₂ para la protección o conservación del medio ambiente o la preservación de la naturaleza. Dado que lo que se busca es actualizar la información de los expedientes, se realizará un estudio más profundo del plomo el cual tiene la información más desactualizada.

3.1 Revisión bibliográfica y análisis de estudios toxicológicos, epidemiológicos y guías metodológicas

A continuación, se presenta la revisión realizada separada para cada contaminante.

3.1.1 Plomo

3.1.1.1 Introducción

La toxicidad del plomo (Pb) en humanos es conocida desde hace más de dos milenios, pero recientemente se ha intensificado el enfoque en sus efectos adversos, incluso a bajos niveles de exposición, especialmente en niños. Investigaciones actuales indican que concentraciones de Pb en sangre (PbB) menores a 10 µg/dL, están asociadas con daños en varios sistemas del organismo, incluidos los sistemas neurológico, renal y cardiovascular (ATSDR, 2020). En respuesta a estos hallazgos, el Centro para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC) de EE. UU. ha revisado su política de salud pública, enfatizando que no hay un nivel seguro de PbB en niños y promoviendo la eliminación de la intoxicación por plomo (CDC et al., 2017).

La atención de los estudios se ha centrado en los efectos en la salud asociados con bajos niveles de Pb, empleando métricas de exposición interna como la concentración de Pb en sangre, que reflejan tanto la exposición reciente como las reservas acumuladas en los huesos. Aunque los impactos tóxicos del Pb se han observado en todos los sistemas del organismo estudiados, su relevancia clínica varía. Los efectos neurológicos en niños son particularmente alarmantes (ATSDR, 2020).

Sin embargo, La duración de la exposición al Pb es un factor complejo en los estudios toxicológicos y epidemiológicos, ya que las métricas internas de exposición, como el PbB y el Pb en hueso, reflejan la exposición reciente y acumulada, pero no proporcionan una imagen completa del historial de exposición. Aunque estas métricas permiten estimar la exposición a corto y largo plazo, no pueden capturar de manera precisa la duración total de la exposición ni el momento exacto en que esta pudo haber sido más relevante para los efectos observados en la

salud. Además, estas limitaciones incluyen la imposibilidad de determinar cómo ha variado la exposición a lo largo del tiempo, particularmente en relación con episodios de alta exposición en el pasado. A pesar de que existen datos sobre los efectos en la salud asociados a exposiciones agudas al Pb, como en estudios de casos clínicos, la duración exacta de la exposición antes de la identificación de estos casos generalmente es desconocida (ATSDR, 2020).

La toxicocinética del plomo involucra varios procesos que determinan su absorción, distribución, metabolismo y excreción en el cuerpo humano. El plomo inorgánico en partículas submicrónicas es absorbido casi completamente en el tracto respiratorio, mientras que las partículas de mayor tamaño pueden ser transportadas hacia la orofaringe y posteriormente ser deglutidas. En cambio, la absorción gastrointestinal varía según factores como la edad y la nutrición, ocurriendo principalmente en el duodeno, donde los niños pueden absorber entre un 40-50% de Pb soluble en agua, comparado con el 3-10% en adultos. Una vez que el plomo ha ingresado al organismo su distribución es independiente de la ruta de exposición. En adultos, aproximadamente el 94% del plomo se deposita en los huesos, mientras que en niños esta proporción es algo menor, alrededor del 73%. Es importante destacar que el plomo presente en la sangre se encuentra principalmente asociado a los glóbulos rojos. Además, el plomo tiene la capacidad de transferirse desde la madre al feto, así como también a través de la leche materna durante la lactancia.

El metabolismo del plomo inorgánico implica la formación de complejos con ligandos proteicos y no proteicos, mientras que los compuestos orgánicos de plomo son metabolizados en el hígado por enzimas P-450. Por otro lado, su excreción ocurre principalmente a través de la orina y las heces, aunque también puede eliminarse en menor medida a través de otras vías como el sudor, la saliva, el cabello, las uñas, la leche materna y el fluido seminal. Es importante señalar que el proceso de eliminación es multifásico, con un tiempo medio de eliminación en sangre que varía entre 1 semana y 2 años, mientras que la eliminación de los huesos ocurre en un tiempo medio de 10-20 años.

Se han desarrollado varios modelos para caracterizar la farmacocinética del Pb, incluyendo tasas de intercambio intercompartimental, retención en tejidos y distribución entre grupos de tejidos. Estos modelos son utilizados en la evaluación de riesgos del Pb.

3.1.1.2 Efectos agudos

La toxicidad aguda del Pb, o intoxicación aguda por Pb, no ha sido evaluada en estudios controlados en humanos. La información existente es principalmente obtenida de múltiples informes de casos. Esta información no es suficiente para establecer una relación dosis-respuesta precisa para la toxicidad aguda en relación con los niveles de Pb en sangre (PbB).

La toxicidad aguda del plomo se caracteriza por un inicio rápido, usualmente entre 1 a 5 días después de la exposición. Afecta principalmente los sistemas gastrointestinal, hematológico y neurológico, con signos y síntomas que varían desde leves hasta graves en relación con los niveles

de Pb en sangre (PbB) (ATSDR, 2020). Los niños tienen mayor susceptibilidad a la intoxicación aguda debido a una mayor absorción del Pb ingerido y la vulnerabilidad de su sistema nervioso central en desarrollo, pudiendo generar efectos duraderos como disminución de las habilidades cognitivas y déficits de atención (ATSDR, 2020).

Los datos de los informes de casos no son suficientes para establecer una relación dosis-respuesta clara para la toxicidad aguda en relación con el PbB. Sin embargo, esto no significa que no ocurran efectos adversos inducidos por el Pb a estos niveles. A niveles superiores a 30 µg/dL, se observan signos y síntomas de toxicidad gastrointestinal y neurológica, aumentando en gravedad con el nivel de PbB. La encefalopatía inducida por Pb se ha reportado con niveles de PbB <100 µg/dL, pero es más común con niveles superiores a 100 µg/dL.

A. Efectos Gastrointestinales

Incluyen cólicos o dolor abdominal, náuseas, vómitos, diarrea y estreñimiento. La pérdida masiva de líquidos gastrointestinales puede llevar a deshidratación (ATSDR, 2020).

B. Efectos Hematológicos

Se observa disminución en la síntesis de hemoglobina, anemia y crisis hemolítica aguda caracterizada por anemia y hemoglobinuria (ATSDR, 2020).

C. Efectos Neurológicos

Están asociados con la toxicidad aguda del Pb, como dolores de cabeza, hiperirritabilidad, disminución de la actividad, parestesia, dolor y debilidad muscular, marcha atáxica, disminución de la conciencia, neuropatía periférica, edema cerebral, convulsiones, coma, encefalopatía y, en casos extremos, la muerte. También se reportan síntomas como astringencia en la boca, sabor metálico y sed (ATSDR, 2020).

D. Niveles de Toxicidad

En adultos, la toxicidad leve a moderada puede presentarse con hipertensión, abortos espontáneos, anormalidades en el esperma y efectos neurocognitivos sutiles, así como síntomas de fatiga, somnolencia, dolor de cabeza, insomnio, dolor abdominal, estreñimiento, anemia leve, mialgias, artralgias y debilidad leve (IBM-Micromedex, 2023). En niños, la exposición al plomo puede plantear preocupaciones significativas sobre el neurodesarrollo, con posibles consecuencias como la disminución del cociente intelectual y problemas de comportamiento. Incluso niveles bajos de exposición pueden asociarse con un deterioro cognitivo leve (IBM-Micromedex, 2023).

Por otro lado, en casos de ingestas agudas de grandes cantidades de plomo, aunque raras, pueden causar dolor abdominal, náuseas, vómitos, anemia, hepatitis tóxica e incluso encefalopatía (IBM-Micromedex, 2023). En niños, la toxicidad severa puede manifestarse con síntomas como encefalopatía, vómitos persistentes y anemia. En adultos expuestos de manera más severa, los síntomas incluyen fatiga, malestar, irritabilidad, anorexia, insomnio, pérdida de

peso, disminución del deseo sexual, hipertensión, dolor abdominal, náuseas, estreñimiento o diarrea, deterioro de la concentración, dolor de cabeza, disminución de la coordinación visomotora, temblor, encefalopatía, neuropatía motora periférica, anemia, nefrotoxicidad, hiperuricemia y gota (IBM-Micromedex, 2023).

3.1.1.3 Efectos crónicos

A. Efectos Neurológicos

Numerosos estudios epidemiológicos prospectivos y transversales en niños evidencian consistentemente decrementos en la función neurológica, incluyendo reducciones en la función cognitiva (aprendizaje y memoria), cambios en el comportamiento y el ánimo (atención, hiperactividad, impulsividad, irritabilidad, delincuencia), y alteraciones en las funciones neuromotoras y neurosensoriales (integración visomotora, destreza, balance postural, cambios en los umbrales auditivos y visuales) (ATSDR, 2020; Baran et al., 2022; Gameli et al., 2022; Zeng et al., 2020). Estos efectos se han asociado con rangos de PbB desde ≤ 5 $\mu\text{g}/\text{dL}$ hasta >50 $\mu\text{g}/\text{dL}$. Los estudios respaldan la idea de que el Pb afecta la función cognitiva en niños expuestos prenatal o ambientalmente a bajos niveles de Pb (ATSDR, 2020). No se ha identificado un umbral para estos efectos (es decir, no se ha identificado un nivel seguro) (CDC et al., 2017). El decremento en la función cognitiva aumenta con el PbB, y varios modelos de efecto-PbB predicen mayores decrementos en la función cognitiva cuando el PbB aumenta de 1 a 10 $\mu\text{g}/\text{dL}$, en comparación con aumentos en niveles >10 $\mu\text{g}/\text{dL}$. A niveles más altos de PbB (>30 $\mu\text{g}/\text{dL}$), se han observado otros efectos neurotóxicos, incluyendo alteraciones en la función nerviosa (reducciones en habilidades motoras finas y gruesas, neuropatía periférica) y encefalopatía (ATSDR, 2020).

Los estudios epidemiológicos en adultos demuestran disminuciones en la función neurológica asociadas con el PbB (ATSDR, 2020; Baran et al., 2022). Todos los efectos cognitivos y neuroconductuales del plomo observados en niños también se han observado en adultos, asociados con PbB que varían desde ≤ 10 hasta >50 $\mu\text{g}/\text{dL}$. A niveles más altos de PbB (>30 $\mu\text{g}/\text{dL}$), otros efectos neurotóxicos observados incluyen neuropatía periférica, síntomas psiquiátricos (depresión, trastornos de pánico, ansiedad, hostilidad, confusión, ira y esquizofrenia), y cambios en los volúmenes cerebrales regionales y en la neuroquímica. No está claro si los decrementos cognitivos están relacionados con exposiciones ocurridas durante la adultez o durante periodos de desarrollo del sistema nervioso (por ejemplo, exposiciones prenatales y en la infancia) o si los efectos se deben a la exposición acumulativa. Los resultados de algunos estudios que han seguido a niños hasta la adultez temprana muestran una asociación entre el PbB infantil y los cambios conductuales y neuroanatómicos en adultos, sugiriendo un posible impacto de las exposiciones en la infancia en los resultados de la adultez (ATSDR, 2020).

B. Efectos Renales

Los efectos adversos del plomo en los riñones están bien establecidos en numerosos estudios epidemiológicos. Los estudios muestran evidencia consistente de daño renal y reducción de la función renal asociados con un amplio rango de concentraciones de PbB (≤ 10 – 50 $\mu\text{g}/\text{dL}$). Los

déficits en la función renal incluyen enzimuria, proteinuria, transporte alterado de aniones orgánicos y glucosa, y disminución de la tasa de filtración glomerular (GFR). A niveles más altos de PbB ($>30 \mu\text{g/dL}$), la nefrotoxicidad inducida por el plomo se caracteriza por nefropatía tubular proximal, esclerosis glomerular, fibrosis intersticial y necrosis tubular. Es importante notar que las disminuciones en la función renal inducidas por el plomo pueden llevar a una mayor carga corporal de plomo debido a la disminución de su excreción (es decir, causalidad inversa). Además, otras causas de disminución de la función renal podrían resultar en un aumento de la carga corporal de plomo (ATSDR, 2020).

C. Efectos Cardiovasculares

Un gran número de estudios epidemiológicos en adultos demuestran efectos adversos cardiovasculares asociados con rangos de PbB desde ≤ 5 hasta $>50 \mu\text{g/dL}$. El efecto más estudiado en el sistema cardiovascular es el aumento de la presión arterial, con estudios que muestran incrementos en la presión arterial sistólica y diastólica (ATSDR, 2020). Estudios también indican un aumento de la presión arterial en niños y mujeres embarazadas. Estimaron que con el doblamiento del PbB la presión arterial sistólica y diastólica aumentaría 1 y 0.6 milímetros de mercurio, respectivamente (Den Hond et al., 2002). Otros efectos cardiovasculares incluyen un mayor riesgo de hipertensión y enfermedad cardíaca, aterosclerosis, alteraciones en la conducción cardíaca, enfermedad cardíaca y un aumento de la mortalidad debido a enfermedades cardiovasculares. Un estudio reciente concluyó que la exposición ambiental a bajos niveles de plomo es un factor de riesgo importante para la mortalidad por enfermedades cardiovasculares (Lanphear et al., 2018).

D. Efectos Hematológicos

La toxicidad del plomo en el sistema hematológico humano ha sido establecida en numerosos estudios en adultos y niños (ATSDR, 2020; Baran et al., 2022; Desye et al., 2023; Gameli et al., 2022). La exposición al plomo provoca disminuciones dependientes de la dosis en la síntesis de hemo a través de la inhibición de la enzima delta-aminolevulínico ácido deshidratasa (δ -ALAD). A niveles de PbB $\leq 10 \mu\text{g/dL}$, se observa una disminución de la hemoglobina en sangre; sin embargo, es importante señalar que la magnitud de esta disminución es típicamente pequeña y puede no representar un cambio biológicamente significativo. A medida que aumenta el PbB, se producen mayores disminuciones de la hemoglobina en sangre y pérdida de eritrocitos debido a una mayor fragilidad de la membrana inducida por el plomo, resultando en el desarrollo de anemia (NAS, 2013). Otros efectos del plomo en el sistema hematológico incluyen la disminución de la actividad de otras enzimas eritrocitarias (pirimidina 5'-nucleotidasa o $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ ATPase de la membrana de los glóbulos rojos) y niveles alterados de eritropoyetina en plasma (una hormona que estimula la formación de glóbulos rojos); sin embargo, se han publicado menos estudios sobre estos puntos finales y los resultados son mixtos (ATSDR, 2020).

E. Efectos Inmunológicos

Los estudios epidemiológicos proporcionan evidencia de que la exposición al plomo puede perturbar los sistemas inmunitarios de niños y adultos. Esta evidencia proviene de cambios en varios indicadores de inmunidad humoral y mediada por células en asociación con el aumento

de PbB. Se han observado efectos en poblaciones con un PbB promedio menor a 10 µg/dL. Estos efectos son consistentes con estudios más extensos realizados en modelos animales y células inmunitarias aisladas que han demostrado que el plomo puede perturbar los sistemas inmunitarios humoral y mediado por células, llevando a la sensibilización, autoinmunidad e inflamación (EPA, 2014; NAS, 2013).

F. Efectos Reproductivos

Los efectos del plomo en el sistema reproductivo masculino han sido evaluados en numerosos estudios epidemiológicos. Los efectos incluyen daño al esperma (disminución en la cantidad, concentración, movilidad y viabilidad del esperma, y un aumento en la concentración de espermatozoides inmaduros y en el porcentaje de espermatozoides con anomalías morfológicas), posibles alteraciones en los niveles séricos de hormonas reproductivas (testosterona, estradiol, hormona luteinizante [LH] y hormona folículo estimulante [FSH]), disminución de la fertilidad y cambios histopatológicos en los testículos. La severidad de estos efectos aumenta con el nivel de PbB. Estudios realizados en poblaciones con un PbB medio ≤ 10 µg/dL han evidenciado daño al esperma, aunque los efectos se observan con más consistencia a PbB >10 µg/dL. En cuanto a los efectos en los niveles séricos de hormonas reproductivas, los resultados de los estudios disponibles para PbB que varían de ≤ 10 a >50 µg/dL son inconsistentes; por lo tanto, los efectos del Pb sobre las hormonas reproductivas circulantes no están firmemente establecidos. A niveles más altos de PbB (>10 µg/dL), algunos estudios proporcionan evidencia de efectos más graves, incluyendo disminución de la fertilidad y daño histopatológico a los testículos (ATSDR, 2020).

En comparación con los estudios sobre los efectos reproductivos en hombres, la base de datos de literatura epidemiológica sobre los efectos del plomo (Pb) en el sistema reproductivo femenino es más limitada, con la mayoría de los estudios epidemiológicos realizados en poblaciones con un nivel medio de PbB ≤ 10 µg/dL. Estos estudios proporcionan cierta evidencia de alteraciones en los niveles séricos de hormonas reproductivas (estradiol, LH y FSH), disminución de la fertilidad, aumento en la tasa de abortos espontáneos, incremento en los partos prematuros y una edad más temprana de inicio de la menopausia. Sin embargo, los resultados son inconsistentes, y varios estudios no reportan ninguna asociación entre el PbB y los efectos reproductivos en mujeres (ATSDR, 2020).

G. Efectos en el Desarrollo (Excluyendo Neurodesarrollo)

Diversos estudios epidemiológicos han evaluado los resultados en el desarrollo, la mayoría en poblaciones con niveles de PbB materna y/o en el cordón umbilical ≤ 10 µg/dL. Algunos estudios indican una disminución en el tamaño al nacer (peso, longitud, circunferencia de la cabeza), crecimiento reducido en niños (peso, altura, circunferencia de la cabeza, longitud del tronco, longitud de las piernas, longitud de los brazos, índice de masa corporal [IMC]) y retraso en el inicio de la pubertad tanto en varones como en mujeres. Aunque es complicado evaluar la dependencia de la dosis para los efectos en el desarrollo dentro del rango relativamente estrecho de PbB (≤ 10 µg/dL) en la mayoría de los estudios, se han observado disminuciones relacionadas con la dosis en el peso al nacer en poblaciones con PbB ≤ 10 µg/dL. A pesar de que los estudios

proporcionan evidencia de asociaciones entre el PbB y los resultados del desarrollo, los resultados son inconsistentes y varios estudios, incluyendo estudios prospectivos, no muestran asociaciones con resultados no relacionados con el desarrollo neurológico (ATSDR, 2020).

H. Otros Efectos en la Salud Asociados con el Pb

Además de los efectos resumidos anteriormente, se han informado efectos en otros órganos/sistemas. Las bases de datos epidemiológicas para estos efectos son mucho menos extensas que para los efectos ya revisados. Los efectos descritos a continuación ocurren en un amplio rango de concentraciones de PbB, incluyendo niveles de PbB ≤ 10 $\mu\text{g/dL}$. Sin embargo, los resultados para la mayoría de los puntos finales son inconsistentes y los datos disponibles son insuficientes para proporcionar información sobre las relaciones dosis-respuesta.

I. Efectos Respiratorios

Se han observado asociaciones entre el PbB y la disminución de la función pulmonar, aumento de la hiperreactividad bronquial, síntomas de enfermedades respiratorias y un mayor riesgo de enfermedades respiratorias (por ejemplo, asma y enfermedad pulmonar obstructiva).

II. Efectos Endocrinos (Excluyendo Hormonas Reproductivas)

Estudios en adultos, adolescentes y niños muestran efectos en la función tiroidea, niveles de cortisol, niveles de vitamina D y niveles séricos de factores de crecimiento. Los efectos en la función tiroidea son los más estudiados, aunque los resultados no demuestran un patrón consistente de efecto.

III. Efectos Hepáticos

La mayoría de los estudios se realizaron en trabajadores con PbB >10 $\mu\text{g/dL}$. Varios estudios muestran niveles alterados de enzimas hepáticas en plasma, aunque no se ha observado un patrón consistente de efectos. Se ha asociado el aumento del tamaño del hígado y el espesor de la pared de la vesícula biliar con el PbB.

IV. Efectos Musculoesqueléticos

Los estudios proporcionan evidencia de pérdida ósea, aumento de marcadores de metabolismo/cambio óseo y efectos adversos periodontales y dentales (pérdida ósea periodontal, pérdida de dientes, enfermedad periodontal, caries dental) en adultos y niños.

V. Efectos Gastrointestinales

El cólico gastrointestinal es un síntoma clínico predominante del envenenamiento agudo por Pb. Estudios epidemiológicos proporcionan evidencia de síntomas gastrointestinales (cólico/dolor abdominal, náuseas, vómitos, diarrea y/o estreñimiento) asociados con PbB que varían desde 8 $\mu\text{g/dL}$ hasta aproximadamente 100 $\mu\text{g/dL}$. Sin embargo, la mayoría de los estudios son encuestas o estudios transversales de pequeñas poblaciones de trabajadores.

VI. Efectos en el Peso Corporal

Algunos estudios que evalúan efectos de PbB ≤ 10 $\mu\text{g/dL}$ en el peso corporal proporcionan evidencia de disminución del peso corporal en niños y adultos, aunque se han informado resultados inconsistentes.

VII. Efectos Oculares (Excluyendo Efectos Neurológicos)

Datos limitados proporcionan cierta evidencia de que la exposición al Pb está asociada con degeneración macular en adultos y un mayor riesgo de cataratas.

VIII. Cáncer

Numerosos estudios epidemiológicos han evaluado las asociaciones entre la exposición al Pb y el cáncer. Aunque los estudios proporcionan evidencia limitada de la carcinogenicidad del Pb en humanos, los resultados son inconsistentes, con varios estudios negativos, y la interpretación de los datos puede estar limitada debido a factores de confusión. En niveles de PbB ≤ 10 $\mu\text{g/dL}$, se informaron riesgos aumentados para todos los cánceres y el cáncer de pulmón. A niveles de PbB >10 $\mu\text{g/dL}$, se observaron riesgos aumentados para todos los cánceres, cáncer del tracto respiratorio, cáncer de estómago, cáncer intestinal, cáncer de laringe y glioma.

El Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE. UU. ha clasificado al Pb y los compuestos de Pb como razonablemente previsto de ser carcinógenos humanos (NTP, 2021). En 1988, la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA) clasificó al Pb como un probable carcinógeno humano basado en evidencia suficiente en animales; la evidencia en humanos se consideró inadecuada (IRIS, 2004). La Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC) ha clasificado a los compuestos inorgánicos de Pb como probablemente carcinógenos para los humanos (Grupo 2A) en base a evidencia suficiente en animales y evidencia limitada en humanos; la evidencia para los compuestos orgánicos de Pb se consideró inadecuada en humanos y animales (IARC, 2006).

3.1.2 Dióxido de azufre

3.1.2.1 Introducción

Históricamente, el dióxido de azufre y las partículas derivadas de la combustión de combustibles fósiles han sido los principales componentes de la contaminación del aire en muchas partes del mundo. Los problemas más graves se han experimentado en grandes zonas urbanas donde el carbón se ha utilizado para calefacción doméstica o para una combustión mal controlada en instalaciones industriales. En tales situaciones, el complejo de contaminantes generalmente se ha considerado de manera colectiva, basándose en los hallazgos de estudios epidemiológicos realizados hace décadas en áreas anteriormente muy contaminadas. Las directrices elaboradas de esta manera se relacionaron con tiempos promedio de 24 horas para los efectos agudos y de un año para los efectos crónicos.

Se ha prestado especial atención al dióxido de azufre únicamente, basándose en gran medida en los hallazgos de estudios controlados de exposición humana. Esto permite desarrollar pautas en términos de períodos promedio más cortos, del orden de una hora. Estos son relevantes para las exposiciones a concentraciones máximas que pueden surgir de fuentes que queman carbón o petróleo pesado, acompañadas o no de concentraciones sustanciales de material particulado (WHO, 2006).

El dióxido de azufre (SO_2) es altamente soluble en agua, por lo que al ser inhalado se absorbe fácilmente en las vías respiratorias superiores y no penetra profundamente al pulmón. La absorción depende de la concentración, con un 85% de absorción en la nariz a $4\text{--}6\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ y cerca del 99% a $46\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO, 2006). A medida que aumenta la actividad física, se produce un aumento de la frecuencia respiratoria y se pasa a respirar por la boca, lo que provoca una mayor penetración del SO_2 en las vías respiratorias inferiores. En comparación con los adultos sanos, los niños y las personas con asma o rinitis alérgica respiran más por vía oral y, por tanto, es de esperar que el SO_2 penetre más en los pulmones (US-EPA, 2017).

Una vez inhalado, el SO_2 se absorbe en las vías respiratorias y sus derivados se distribuyen ampliamente por todo el cuerpo, como lo demuestran estudios utilizando SO_2 radiomarcado. Aunque se produce una rápida distribución extrapulmonar de los derivados del SO_2 , las concentraciones tisulares más altas se encuentran principalmente en las vías respiratorias y pueden detectarse allí hasta una semana después de la inhalación (Balchum et al., 1959, 1960). Aunque la mayoría de los productos derivados del SO_2 permanecen en las vías respiratorias después de la exposición, también se encuentran en otros órganos como el hígado, con cantidades menores en el corazón, el bazo, el riñón, el cerebro y otros tejidos. Una parte significativa de los derivados del SO_2 parece retenerse en las vías respiratorias superiores, especialmente durante la respiración nasal, con una absorción más lenta en la sangre.

Los principales efectos de la inhalación de SO₂ se observan en los sitios de absorción (es decir, las vías respiratorias) e incluyen:

I. Activación de nervios sensoriales en las vías respiratorias que resulta en respuestas reflejas neurales

El SO₂ actúa como irritante tanto sensorial como pulmonar mediante la activación de los nervios sensoriales en las vías respiratorias, lo que da lugar a respuestas reflejas neurales. Esto ocurre en diversas especies, incluidos los humanos. Las respuestas irritantes pulmonares debido a la exposición al SO₂ resultan en broncoconstricción refleja, especialmente en adultos con asma. Tanto las vías colinérgicas parasimpáticas que involucran el nervio vago como la inflamación contribuyen a la broncoconstricción refleja en individuos asmáticos (US-EPA, 2017).

II. Lesiones en la mucosa de las vías respiratorias

La exposición al SO₂ provoca lesiones en la mucosa de las vías respiratorias, especialmente a concentraciones más altas y después de períodos prolongados de exposición. Hay poca evidencia de lesiones o inflamación en respuesta a exposiciones agudas a concentraciones de 2 ppm de SO₂ o menos en sujetos humanos sanos (US-EPA, 2017).

III. Aumento de la respuesta de las vías respiratorias e inflamación alérgica:

Un creciente cuerpo de evidencia respalda el papel del SO₂ en aumentar la respuesta de las vías respiratorias y/o la inflamación alérgica en modelos animales de enfermedad alérgica de las vías respiratorias, así como en individuos asmáticos. Los efectos fuera de las vías respiratorias pueden ocurrir a concentraciones muy altas de SO₂ inhalado (US-EPA, 2017).

3.1.2.2 Efectos agudos

La Evaluación Científica Integrada (ISA) de 2008 para los Óxidos de Azufre (US-EPA, 2008) concluyó que existe una relación causal entre los efectos respiratorios y la exposición a corto plazo al dióxido de azufre. La justificación de esta determinación causal se basó en gran medida en evidencia proveniente de múltiples estudios controlados de exposición humana de alta calidad, que demostraron una disminución de la función pulmonar y un aumento de los síntomas respiratorios después de exposiciones de 5 a 10 minutos a SO₂ en adultos con asma que realizaban ejercicio.

A. Exacerbación del asma

El asma es una enfermedad pulmonar inflamatoria crónica con una amplia variedad de características y grados de gravedad de la enfermedad. Se ha demostrado que la exposición al SO₂ induce características clínicas de exacerbación del asma, que incluyen una disminución de la función pulmonar [por ejemplo, disminución del volumen espiratorio forzado en 1 segundo (FEV1) o aumento de la resistencia específica de las vías respiratorias (sRaw)], y síntomas aumentados (por ejemplo, sibilancias, tos, falta de aliento), así como algunos efectos subclínicos como la inflamación.

Como se detalló en el ISA 2008 (US-EPA, 2008), los estudios de exposición humana controlada informaron síntomas respiratorios aumentados y disminución de la función pulmonar después de exposiciones a corto plazo de 5 a 10 minutos a 0.2-0.6 ppm de SO₂ durante el ejercicio o la hiperventilación eucápnica (una técnica de respiración rápida y profunda a través de una boquilla que evita un desequilibrio de dióxido de carbono debido a la hiperventilación) en adultos y adolescentes (de 12 a 18 años) con asma. En contraste, los adultos sanos demostraron un aumento de la resistencia de las vías respiratorias y una disminución del FEV1 después de la exposición a concentraciones más altas (>1.0–5.0 ppm) en la mayoría de los estudios de exposición humana controlada que evaluaron los efectos respiratorios del SO₂. Aunque los niños pueden ser especialmente susceptibles a los efectos respiratorios del SO₂ por razones dosimétricas, no hay estudios de exposición humana controlada disponibles en niños menores de 12 años, en parte debido a preocupaciones éticas.

Coherente con los hallazgos de la exposición humana controlada, la evidencia epidemiológica indicó que los aumentos a corto plazo en la concentración ambiente de SO₂ se asociaron con ingresos hospitalarios, visitas a departamentos de emergencia y síntomas relacionados con el asma. La evidencia más sólida fue para los niños, lo cual es consistente con su mayor respiración oral y tasas de ventilación más altas en relación con su tamaño en comparación con los adultos y la consecuente posibilidad de que reciban una mayor dosis de SO₂ en las vías respiratorias traqueobronquiales del tracto respiratorio inferior (US-EPA, 2017).

A concentraciones mayores o iguales a 0.4 ppm, del 20 al 60% de las personas con asma experimentaron disminuciones en la función pulmonar inducidas por SO₂, que a menudo se acompañaron de síntomas respiratorios. Existe una clara relación dosis-respuesta para las exposiciones a SO₂ entre 0.2 y 1.0 ppm, tanto en términos de la gravedad del efecto como en el porcentaje de asmáticos afectados (US-EPA, 2017).

B. Exacerbación de la alergia

Los estudios epidemiológicos encontraron poca evidencia de una relación entre la exposición a corto plazo al SO₂ y la función pulmonar, los síntomas respiratorios o las visitas al médico en poblaciones con alergia (US-EPA, 2008).

C. Exacerbación de la EPOC

La enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) es una enfermedad pulmonar caracterizada por la destrucción del tejido alveolar, la remodelación de las vías respiratorias y la limitación del flujo de aire. La reducción del flujo de aire puede disminuir la función pulmonar, y los síntomas clínicos que demuestran la exacerbación de la EPOC incluyen tos, disnea, producción de esputo y falta de aliento. La exacerbación grave puede llevar a hospitalizaciones o visitas a la sala de emergencias. Este espectro de resultados se ha evaluado en relación con la exposición a corto plazo al dióxido de azufre (SO₂), y la evidencia en todos los resultados y disciplinas es inconsistente. Los hallazgos recientes provienen de estudios epidemiológicos, y la mayoría se refiere a hospitalizaciones y visitas a la sala de emergencias (US-EPA, 2017).

D. Infección respiratoria

Las vías respiratorias están protegidas de patógenos y partículas exógenas mediante varios mecanismos de defensa pulmonar que incluyen la depuración mucociliar, la fagocitosis por los macrófagos alveolares y la inmunidad innata y adaptativa.

En el último ISA para SO₂ (US-EPA, 2017), la evidencia derivada de estudios epidemiológicos amplía la información presentada en la Evaluación Integral de Sulfuros de 2008, proporcionando algún respaldo, aunque no completamente consistente, para la asociación entre las concentraciones ambientales de SO₂ y las infecciones respiratorias. Los estudios transversales muestran una falta de consistencia al relacionar las exposiciones estimadas de SO₂ en entornos escolares o domésticos con infecciones respiratorias autoinformadas para niños, aunque hay indicios de asociación con hospitalizaciones y visitas a la sala de emergencias. Las asociaciones se observan para diversas infecciones respiratorias, incluida la bronquiolitis, pero no para neumonía u otitis media. La escasez de estudios múltiples que aborden los mismos resultados complica la interpretación debido a las notables diferencias en las etiologías de las infecciones respiratorias superiores e inferiores.

E. Condiciones respiratorias agregadas

El ISA de 2008 (US-EPA, 2008) incluyó la primera evaluación exhaustiva de la morbilidad respiratoria en forma de hospitalizaciones y visitas a la sala de emergencias relacionadas con enfermedades respiratorias. De los estudios evaluados, la mayoría consistió en estudios de series temporales de una sola ciudad que examinaron principalmente todas las enfermedades respiratorias o las hospitalizaciones o visitas a la sala de emergencias por asma, con un número más limitado de estudios que examinaron otros resultados respiratorios, como se revisó en puntos anteriores. Además, la mayoría de los estudios promediaron las concentraciones de SO₂ en múltiples monitores y examinaron métricas de exposición promedio de 24 horas, lo que puede no capturar adecuadamente la variabilidad espacial y temporal en las concentraciones de SO₂. Los estudios que examinaron todas las hospitalizaciones y visitas a la sala de emergencias por enfermedades respiratorias generalmente informaron asociaciones positivas. Estas asociaciones se encontraron generalmente positivas, con algunas pruebas de una atenuación de la asociación en modelos con contaminantes gaseosos (es decir, NO₂ y O₃) y material particulado.

Estudios recientes se suman a la evidencia detallada en el ISA 2008 que indicó una asociación generalmente positiva entre las exposiciones a corto plazo de SO₂ y las hospitalizaciones y visitas a la sala de emergencias por enfermedades respiratorias. Estos estudios recientes proporcionan algunas ideas sobre las limitaciones identificadas (especificación del modelo, estructura de rezago de las asociaciones y posibles diferencias estacionales) en la relación entre las hospitalizaciones y visitas a la sala de emergencias por enfermedades respiratorias y la exposición al SO₂ (US-EPA, 2017).

F. Efectos respiratorios en la población general e individuos sanos

En general, hay evidencia limitada de que la exposición a corto plazo al SO_2 induce cambios en la función pulmonar en personas saludables. La evidencia de estudios controlados de exposición humana en individuos saludables muestra que pueden producirse disminuciones transitorias en la función pulmonar a concentraciones de 1.0 ppm de SO_2 bajo condiciones de ejercicio o respiración oral forzada, pero la evidencia es más consistente para exposiciones >1.0 ppm (US-EPA, 2017).

Los estudios epidemiológicos no indican claramente disminuciones asociadas al SO_2 en la función pulmonar en adultos saludables, niños o grupos de la población general con una prevalencia variable de enfermedades respiratorias.

En general, la evidencia epidemiológica de los efectos en la función pulmonar, los síntomas o la inflamación inducidos por el SO_2 en individuos sanos es débil. Los estudios epidemiológicos no respaldan claramente las asociaciones del SO_2 con la función pulmonar en niños o adultos sanos. Las asociaciones del SO_2 con síntomas respiratorios en niños e inflamación pulmonar en poblaciones saludables no se observan de manera consistente. Se demostraron disminuciones en la función pulmonar, pero no aumentos en los síntomas respiratorios o la inflamación, en individuos sanos después de exposiciones al $\text{SO}_2 \geq 1.0$ ppm en estudios controlados de exposición humana (US-EPA, 2017).

G. Mortalidad respiratoria

En general, dentro del reciente ISA (US-EPA, 2017), se informa para múltiples ciudades evidencia de asociaciones positivas consistentes entre las concentraciones a corto plazo de SO_2 y la mortalidad respiratoria, lo cual es consistente con los estudios evaluados en el ISA 2008. A diferencia de los estudios evaluados en el ISA 2008, los estudios recientes examinaron si los co-contaminantes confunden la relación entre las concentraciones a corto plazo de SO_2 y la mortalidad respiratoria. En general, estos estudios informaron evidencia de que la asociación SO_2 -mortalidad respiratoria se atenuó en modelos con NO_2 y PM_{10} , pero los análisis se limitan a ciudades asiáticas donde la mezcla de contaminación del aire y las concentraciones son diferentes de las informadas en otras áreas del mundo.

3.1.2.3 Efectos crónicos

A. Efectos Respiratorios

La evidencia actual sugiere efectos relacionados a la exposición prolongada al dióxido de azufre, sin embargo, no es suficiente para inferir una relación causal entre la exposición prolongada al SO_2 y los efectos respiratorios crónicos, tales como el desarrollo de asma en niños. Por lo tanto, se observa un cambio respecto a la conclusión presentada en el ISA del 2008 para los SO_x (US-EPA, 2008), donde se planteaba que la evidencia era "inadecuada para inferir una asociación causal", comprendiendo así, que la evidencia que existía era insuficiente para plantear relación

alguna, no obstante, los estudios más actuales presentan mayores efectos relacionados, pero continúa sin ser una relación causal.

La evidencia de los estudios epidemiológicos es generalmente compatible, pero no totalmente consistente con respecto al aumento de la incidencia y prevalencia del asma relacionado con la exposición al SO₂. Persiste la incertidumbre con respecto a la posible confusión por co-contaminantes, por lo que no se pueden descartar errores de medición de la exposición, el azar y otros sesgos.

La limitada evidencia toxicológica animal proporciona plausibilidad biológica y coherencia entre las líneas de evidencia. Por otro lado, hay cierta certeza de un modo de acción que involucra inflamación y sensibilización alérgica.

B. Efectos cardiovasculares

La evidencia es insuficiente para inferir una relación causal entre la exposición a largo plazo al SO₂ y los efectos en la salud cardiovascular. La relación de exposición prolongada a SO₂ y los resultados cardiovasculares no fue incluida en el ISA de óxidos de azufre de 2008 (US-EPA, 2008). Los resultados de los estudios epidemiológicos sobre la exposición a largo plazo a concentraciones de SO₂ y su relación con eventos como infarto de miocardio, enfermedad cardiovascular, accidente cerebrovascular y mortalidad cardiovascular son limitados e inconsistentes. Además, la evidencia experimental para proporcionar coherencia y plausibilidad biológica es escasa.

Los estudios recientes no han disminuido las incertidumbres identificadas en la interpretación de la evidencia, incluyendo errores de medición de la exposición y confusión con co-contaminantes.

C. Mortalidad Total asociada con la exposición a largo plazo al dióxido de azufre

La relación causal entre la exposición a largo plazo al SO₂ y la mortalidad total en adultos no ha sido confirmada. La evidencia es insuficiente para establecer dicha relación. Esta conclusión se ha mantenido sin cambios desde el informe ISA de SO_x de 2008 (US-EPA, 2008), y la nueva evidencia presentada en el ISA de 2017 (US-EPA, 2017) es consistente con la determinación anterior.

Algunos estudios epidemiológicos informan asociaciones positivas, pero los resultados no son completamente consistentes, ya que, algunos estudios informan asociaciones nulas. Además, no hay evidencia de una asociación entre la exposición a SO₂ y efectos a largo plazo en la salud respiratoria o cardiovascular, la cual respalde una relación con la mortalidad por estas causas. Los estudios actuales no han reducido las incertidumbres identificadas en ISA de 2008, incluido el error de la medición de la exposición, la confusión con co-contaminantes o la escala geográfica del análisis.

D. Cáncer y exposición a largo plazo

La evidencia que relaciona la exposición a largo plazo al SO_2 y el cáncer es insuficiente para inferir una relación causal. Esta conclusión no ha tenido cambios desde la ISA de SO_x de 2008 (US-EPA, 2008). La nueva evidencia (US-EPA, 2017) es consistente con la determinación anterior.

Por otra parte, aunque ciertas investigaciones han encontrado resultados nulos respecto a las concentraciones de SO_2 y la mortalidad por cáncer de pulmón, otros análisis los cuales consideraron varios co-contaminantes, han reportado asociaciones positivas, por ejemplo, estudios más recientes han aportado evidencia sobre el cáncer de pulmón y otros tipos de cáncer. Se ha identificado evidencia que señala la mutagénesis y la genotoxicidad como eventos cruciales en un mecanismo de acción, propuesto que conecta la exposición prolongada al SO_2 con el cáncer. No obstante, los estudios de toxicología muestran una consistencia limitada con los estudios epidemiológicos. Investigaciones recientes no han disminuido las incertidumbres identificadas en la evaluación anterior de la ISA, incluyendo fallos en la medición de la exposición y la interferencia de otros contaminantes.

En síntesis, los efectos respiratorios en relación con la exposición prolongada con SO_2 posee nuevas evidencias que establecen una compatibilidad de la relación propuesta, sin embargo, no es suficiente para plantear una relación causal. Los efectos cardiovasculares en relación con la exposición a largo plazo con SO_2 carece de evidencias consistentes y suficientes, y continúa en este estado a pesar de los estudios actuales. La relación entre mortalidad y exposición prolongada al SO_2 no ha sido verificada, pues, la evidencia es insuficiente para establecerla. Por último, la relación entre el cáncer y la exposición al SO_2 a largo plazo, también es inconsistente e insuficiente, sin embargo, considerando co-contaminantes, y procesos biológicos que ocurren a nivel molecular y celular (mutagénesis y genotoxicidad), han establecido asociaciones positivas.

3.1.3 Ozono

3.1.3.1 Introducción

La fotoquímica general del ozono troposférico es bien conocida. El ozono es producido en áreas urbanas y a sotavento de las fuentes principalmente por las reacciones de componentes orgánicos volátiles con óxido de nitrógeno en la presencia de luz solar, afuera de áreas contaminadas principalmente por reacciones del monóxido de carbono y metano con NO_x .

Los efectos inducidos por el ozono pueden ocurrir a través de diversas vías complejas en el cuerpo. Después de la inhalación, el ozono reacciona con lípidos, proteínas y antioxidantes en el líquido de revestimiento epitelial del tracto respiratorio, creando productos de oxidación secundarios. La exposición inicial al ozono desencadena reacciones fisiológicas que pueden inducir una serie de respuestas autónomas, endocrinas, inmunológicas e inflamatorias en todo el cuerpo a nivel celular, de tejidos y de órganos. Evidencia reciente sigue respaldando los efectos del ozono en el sistema respiratorio. Además, en el último “*Integrated Science Assessment (ISA) for Ozone and Related Photochemical Oxidants*” (U.S. EPA, 2020b) se indica que la exposición a corto plazo al ozono es probable que induzca efectos metabólicos.

También hay alguna evidencia de que la exposición al ozono puede afectar los sistemas cardiovascular y nervioso, la reproducción y el desarrollo, y la mortalidad, aunque existen más incertidumbres asociadas con la interpretación de la evidencia para estos efectos (U.S. EPA, 2020b).

3.1.3.2 Efectos agudos

A. Efectos Respiratorios

Hay dos vías propuestas por las cuales la exposición a corto plazo al ozono puede llevar a efectos en la salud respiratoria (es relación causal). Una vía implica la activación de los nervios sensoriales en el tracto respiratorio, lo que lleva a disminuciones en la función pulmonar, obstrucción de las vías respiratorias y un aumento en la respuesta de las vías respiratorias. La segunda vía implica lesiones en el tracto respiratorio, inflamación y estrés oxidativo que pueden dar lugar a cambios morfológicos y un fenotipo alérgico. La inflamación del tracto respiratorio también puede llevar a alteraciones en la defensa del huésped, que está vinculada a un mayor riesgo de infecciones respiratorias (U.S. EPA, 2020b). Si bien los estudios experimentales con animales o sujetos humanos aportan la mayor parte de la evidencia de efectos agudos arriba, los estudios epidemiológicos encontraron asociaciones entre la exposición al ozono y marcadores de inflamación del tracto respiratorio, disminuciones en la función pulmonar, y visitas a salas de emergencias y hospitalizaciones por asma e infecciones respiratorias. Estas vías propuestas juntas proporcionan plausibilidad biológica para la evidencia epidemiológica de efectos en la salud respiratoria y se utilizaron para informar una determinación de causalidad. Como se describe en el ISA 2013 para el ozono (U.S. EPA, 2013), además de las disminuciones en la función pulmonar, los estudios controlados de exposición humana indican claramente aumentos inducidos por el ozono en los síntomas respiratorios, incluido el dolor en la inspiración profunda, la falta de aliento y la tos.

B. Efectos Metabólicos

El síndrome metabólico en humanos se define por la presencia de al menos tres de los siguientes cinco factores de riesgo: hiperglucemia (glucosa elevada en sangre), triglicéridos elevados, bajo colesterol HDL, presión arterial alta y adiposidad central (circunferencia de cintura aumentada) (Alberti et al., 2009). La presencia de estos factores de riesgo puede predisponer a las personas a un mayor riesgo de diabetes tipo 2 y enfermedad cardiovascular.

En el estudio controlado de exposición humana, si bien aumentaron los ácidos grasos libres circulantes, no hubo cambios significativos en los triglicéridos después de la exposición al ozono a corto plazo (Miller et al., 2016). Algunos estudios epidemiológicos que examinan cambios en la glucosa y los lípidos respaldan efectos asociados con la exposición al ozono a corto plazo, informando, por ejemplo, una asociación positiva entre la concentración media de ozono durante 5 días y los niveles de glucosa en ayunas y triglicéridos (Kim & Hong, 2012).

La evidencia reciente de la literatura epidemiológica muestra en su mayoría asociaciones nulas entre la exposición a corto plazo al ozono y la homeostasis de la glucosa y la insulina. Sin embargo, un estudio informó asociaciones entre el ozono y aumentos en la glucosa en ayunas en individuos saludables, así como entre el ozono y la hiperglucemia y la resistencia a la insulina en personas con diabetes tipo 2. Se establece probable relación causal (U.S. EPA, 2020b).

C. Efectos Cardiovasculares

La falta de evidencia de estudios controlados en humanos o epidemiológicos para la exposición a corto plazo al ozono y la morbilidad cardiovascular, como efectos relacionados con insuficiencia cardíaca, enfermedad coronaria isquémica, infarto de miocardio, arritmia y paro cardíaco, o enfermedad tromboembólica, fue una fuente importante de incertidumbre en el ISA 2013.

Aunque se han publicado estudios adicionales de exposición humana controlada en los últimos años, la evidencia sobre el efecto inducido por el ozono en los puntos finales cardiovasculares es inconsistente. No se informó ningún efecto del ozono en estudios de exposición humana controlada sobre la función cardíaca, indicadores de enfermedad coronaria isquémica (como el segmento ST), disfunción endotelial o frecuencia cardíaca, aunque algunos estudios indican que la exposición al ozono puede provocar cambios en la presión arterial, la variabilidad de la frecuencia cardíaca, indicadores de arritmia, marcadores de coagulación e inflamación. Aunque el número de estudios epidemiológicos que evalúan la exposición a corto plazo al ozono y sus efectos en la salud cardiovascular ha aumentado, sigue siendo limitado y proporciona poca o ninguna evidencia de asociaciones con insuficiencia cardíaca, enfermedad coronaria isquémica y ataque cardíaco, arritmia y paro cardíaco, o enfermedad tromboembólica (U.S. EPA, 2020b).

Se sugiere, pero no es suficiente para inferir una relación causal.

D. Mortalidad

La ISA 2013 (U.S. EPA, 2013) concluyó que es probable que exista una relación causal entre la exposición al ozono a corto plazo y la mortalidad total, basándose en la evidencia presentada en el Documento de Criterios de Calidad del Aire para el Ozono de 2006. Esta conclusión fue respaldada por varios estudios epidemiológicos en múltiples ciudades y continentes que proporcionaron evidencia de asociaciones positivas y consistentes entre la exposición al ozono a corto plazo y la mortalidad en análisis durante todo el año y en la temporada cálida/verano, y en diferentes tiempos de promedio (es decir, máx. de 1 hora, máx. de 8 horas y promedio de 24 horas), lo que confirmó aún más las asociaciones positivas informadas en estudios en varias ciudades, estudios en una sola ciudad y metaanálisis evaluados en evaluaciones anteriores.

Como se resume a continuación, estos estudios proporcionaron más información sobre la relación entre la exposición al ozono a corto plazo y la mortalidad por causas específicas, los posibles efectos de confusión de co-contaminantes y la estacionalidad, la heterogeneidad espacial en las estimaciones de riesgo de ozono-mortalidad, el momento de los efectos de mortalidad y la forma de la relación concentración-respuesta (C-R). Los estudios epidemiológicos evaluados en la ISA de Ozono 2013 ampliaron la evaluación de las asociaciones entre la

exposición al ozono a corto plazo y la mortalidad por causas específicas a través de estudios en múltiples ciudades, que anteriormente se limitaban principalmente a estudios en una sola ciudad. Sin embargo, la evidencia de morbilidad cardiovascular que respalda la mortalidad cardiovascular fue limitada. Un número limitado de estudios de exposición humana controlada y numerosos estudios toxicológicos en animales proporcionaron evidencia inicial que respalda un mecanismo biológicamente plausible por el cual la exposición al ozono a corto plazo podría conducir a resultados cardiovasculares, pero hubo inconsistencia en los resultados entre estudios experimentales y epidemiológicos. Específicamente, los estudios epidemiológicos no demostraron consistentemente asociaciones positivas con efectos cardiovasculares clínicos, como hospitalizaciones y visitas a servicios de emergencia (U.S. EPA, 2020b).

Finalmente, los estudios en múltiples ciudades y continentes evaluados en la Evaluación Integrada de la Ciencia para el Ozono y Oxidantes Fotoquímicos Relacionados de 2013 (2013 Ozone ISA) proporcionaron una evaluación más exhaustiva del momento de los efectos de mortalidad después de la exposición al ozono y de la relación concentración-respuesta (C-R). En los estudios se encontró evidencia de que la asociación más fuerte entre ozono y mortalidad, en términos de magnitud y precisión, ocurre en los primeros días después de la exposición, dentro del rango de 0 a 3 días. Además, el examen de la relación C-R entre la exposición al ozono a corto plazo y la mortalidad respaldó una relación lineal sin evidencia de un umbral por debajo del cual no se produzcan efectos (U.S. EPA, 2020b).

Se sugiere, pero no es suficiente para inferir una relación causal.

3.1.3.3 Efectos crónicos

A. Efectos Respiratorios

La ISA 2013 concluyó que "probablemente existe una relación causal entre la exposición a largo plazo al ozono y los efectos en la salud respiratoria" (U.S. EPA, 2013). La evidencia epidemiológica de una relación entre la exposición a largo plazo al ozono y los efectos en la salud respiratoria se obtuvo a partir de estudios sobre el inicio de asma, síntomas respiratorios en niños con asma y mortalidad respiratoria. Las asociaciones entre la exposición a largo plazo al ozono y el inicio de asma en niños y el aumento de los síntomas respiratorios en personas con asma se observaron principalmente en estudios que examinaron las interacciones entre el ozono y el ejercicio o diferentes variantes genéticas. En el ISA 2020 para el ozono (U.S. EPA, 2020b) respaldan una asociación entre la exposición a largo plazo al ozono y el desarrollo de asma en niños. Aunque un estudio presentó evidencia contrastante, los autores se centraron en una población específica en riesgo y el estudio incluyó a menos participantes (Nishimura et al., 2013). Un número limitado de estudios recientes sigue proporcionando evidencia inconsistente de una asociación entre la exposición a largo plazo al ozono y el desarrollo o la función pulmonares en niños. Aunque el único estudio reciente que examinó la función pulmonar en adultos observó evidencia de una

asociación, este resultado debe considerarse en el contexto de la evidencia inconsistente presentada en el ISA 2013 (U.S. EPA, 2013).

B. Efectos Metabólicos

Los efectos metabólicos no se incluyeron en el ISA 2013 como una sección independiente debido a la escasa cantidad de estudios que evaluaban los efectos de la exposición prolongada al ozono en estos resultados.

Los efectos de la exposición prolongada al ozono incluyen indicadores de la función metabólica que subyacen a las enfermedades metabólicas y cardiovasculares. Los resultados evaluados incluyen la homeostasis de la glucosa e insulina, el aumento de peso, el síndrome metabólico, la diabetes tipo 1 y tipo 2, y la mortalidad por diabetes o enfermedades cardio metabólicas. Las subsecciones a continuación evalúan la evidencia científica más relevante para las políticas relacionadas con la exposición prolongada al ozono y sus efectos metabólicos. Estas secciones se centran en estudios publicados desde la conclusión del ISA 2013. No se llegaron a conclusiones sobre causalidad para los efectos metabólicos en el ISA 2013 (U.S. EPA, 2013). La evidencia relacionada con los resultados de la exposición prolongada al ozono y los efectos metabólicos se ha ampliado desde el ISA 2013 (U.S. EPA, 2013), con múltiples estudios epidemiológicos y toxicológicos en animales actualmente disponibles para su revisión. La evidencia más sólida de efectos metabólicos tras la exposición prolongada al ozono proviene de estudios epidemiológicos. Se observaron asociaciones positivas entre las concentraciones prolongadas de ozono y la mortalidad relacionada con la diabetes en cohortes bien establecidas en EE. UU. y Canadá (Crouse et al., 2015; Turner et al., 2016). Dos estudios también informaron una asociación entre las concentraciones prolongadas de ozono y un aumento en las tasas de incidentes de diabetes (Jerrett et al., 2017; Renzi et al., 2017). Además, algunos estudios informaron una relación entre las concentraciones prolongadas de ozono y un mayor riesgo de sobrepeso u obesidad. Finalmente, otro estudio encontró un aumento en las probabilidades de síndrome metabólico (Yang et al., 2018), caracterizado por hiperglucemia (niveles elevados de glucosa), triglicéridos elevados, bajo HDL-C, presión arterial alta y una circunferencia de cintura aumentada. En los pocos estudios toxicológicos en animales disponibles, hay evidencia de que la exposición prolongada al ozono puede resultar en hiperglucemia y disminución del HDL-C, así como inducir intolerancia a la glucosa, causar disfunción de las células β y alterar la secreción de insulina. Sin embargo, aunque había un número limitado de estudios toxicológicos en animales disponibles para su revisión, estos brindaron poco respaldo a los cambios inducidos por el ozono a largo plazo en otros marcadores del síndrome metabólico, incluidos los triglicéridos, la composición corporal o la presión arterial. Además, no hubo evidencia de un aumento en la gluconeogénesis hepática o niveles elevados de corticosterona, aunque un estudio informó de un aumento transitorio de adrenalina después de la exposición prolongada al ozono. A pesar de un mayor número de estudios, persisten muchas incertidumbres con respecto a los efectos metabólicos de la exposición prolongada al ozono. La mayoría de los estudios de la literatura epidemiológica no evaluaron la posible confusión por co-contaminantes. Hubo un número muy limitado de estudios disponibles para su revisión en la literatura toxicológica animal y estos estudios tenían pocos puntos finales superpuestos. En general, considerando los estudios

epidemiológicos positivos y el respaldo limitado de los estudios toxicológicos en animales, la evidencia colectiva sugiere, pero no es suficiente para inferir, una relación causal entre la exposición prolongada al ozono y los efectos metabólicos (U.S. EPA, 2020b).

C. Efectos Cardiovasculares

El ISA 2013 concluyó que la evidencia sugería una relación causal entre exposiciones a largo plazo al ozono y efectos cardiovasculares. Con el ISA de 2020 se clasificó en “se sugiere, pero no es suficiente para establecer relación causal” (U.S. EPA, 2020b).

Una incertidumbre clave de la última revisión fue el mecanismo por el cual la inhalación de ozono podría provocar efectos sistémicos. Sin embargo, hubo algunas evidencias de un pequeño número de estudios en el ISA 2013 de que la activación de LOX-1 por lípidos y proteínas oxidados por el ozono podría resultar en cambios en genes involucrados en la proteólisis, la trombosis y la vasoconstricción (U.S. EPA, 2020b).

Estudios publicados desde la finalización del ISA 2013, abordan las incertidumbres que persisten desde la última revisión. Sin embargo, en general, muchas de las incertidumbres identificadas en la revisión anterior persisten.

La limitada evidencia epidemiológica incluida en el ISA 2013 abarcó estudios de exposición a largo plazo al ozono y biomarcadores circulantes, así como un estudio que evaluó la mortalidad cardiovascular. La evidencia epidemiológica reciente sigue siendo limitada, aunque varios estudios recientes proporcionan cierta evidencia de cambios en medidas de la presión arterial o aumentos en resultados de hipertensión (U.S. EPA, 2020b). Además, el número de estudios sobre mortalidad cardiovascular ha aumentado, y estos estudios generalmente informan asociaciones positivas. En general, el limitado número de estudios recientes es consistente con, y en algunos casos, amplía las conclusiones del ISA 2013.

En general, la base de evidencia que describe la relación entre la exposición a largo plazo al ozono y los efectos cardiovasculares sigue siendo limitada. Además, varios estudios epidemiológicos recientes sobre mortalidad cardiovascular proporcionan evidencia de asociaciones positivas con la exposición a largo plazo al ozono. En comparación con el ISA 2013, un mayor número de estudios epidemiológicos recientes sobre morbilidad y mortalidad cardiovascular evalúan la posibilidad de confusión por otros contaminantes, especialmente con PM₁₀ y NO₂. Un estudio (Coogan et al., 2017) evaluó PM_{2.5} en modelos de co-contaminantes. En general, estos estudios informan que la asociación con el ozono permanece relativamente sin cambios o ligeramente atenuada en los modelos de co-contaminantes. La posible confusión por otros contaminantes sigue siendo una fuente de incertidumbre al caracterizar la relación entre la exposición a largo plazo al ozono y los efectos en la salud cardiovascular.

En cuanto a las enfermedades preexistentes, existe evidencia reciente limitada de que el IMC o el estado de obesidad puede modificar el riesgo de la exposición a largo plazo al ozono en los

cambios en la presión arterial, pero esta base de evidencia es pequeña y no completamente consistente (U.S. EPA, 2020b).

D. Efectos en el Sistema Nervioso

Efecto sugerido, pero no suficiente para inferir una relación causal (U.S. EPA, 2020b).

E. Efectos en el Sistema Reproductivo

Se ha sugerido un efecto en la reproducción y fertilidad tanto en hombres como en mujeres, así como en el embarazo y los resultados del parto (U.S. EPA, 2020b). Sin embargo, esta sugerencia no es suficiente para inferir una relación causal definitiva en ambos casos.

F. Cáncer

Es inadecuado para inferir la presencia o ausencia de una relación causal (U.S. EPA, 2020b).

G. Mortalidad

Un número limitado de estudios epidemiológicos ha evaluado la relación entre la exposición prolongada al ozono y la mortalidad en adultos. El Documento de Criterios de Calidad del Aire para el Ozono de 2006 (U.S. EPA, 2006) concluyó que existía una cantidad insuficiente de evidencia "para sugerir una relación causal entre la exposición crónica al ozono y un mayor riesgo de mortalidad en humanos". Observando un apoyo limitado para una asociación entre la exposición prolongada al ozono y la mortalidad total, y asociaciones inconsistentes para la mortalidad cardiopulmonar en los estudios ACS y Harvard Six Cities, el ISA 2013 concluyó que la evidencia sugería una relación causal entre la exposición prolongada al ozono y la mortalidad total (U.S. EPA, 2013). La evidencia más sólida para una asociación entre la exposición prolongada al ozono y la mortalidad se derivó de las asociaciones con la mortalidad respiratoria informada por (Jerrett et al., 2009), que permanecieron sólidas después de ajustar las concentraciones de PM_{2.5}, y un análisis que informó asociaciones entre las concentraciones ambientales de ozono y la mortalidad total en poblaciones con enfermedades preexistentes en la Cohorte de Medicare (Zanobetti & Schwartz, 2011). La siguiente sección proporciona una breve evaluación integrada de la evidencia para la exposición prolongada al ozono y la mortalidad presentada en la revisión anterior de los NAAQS con la evidencia disponible para esta revisión. Esta sección se centra en evaluar en qué medida los estudios recientemente disponibles caracterizan aún más la relación entre la exposición prolongada al ozono y la mortalidad. Por ejemplo, se destacan áreas de investigación que informan sobre las diferencias en la ventana de exposición utilizada para evaluar las exposiciones prolongadas y la mortalidad, o comparaciones de técnicas estadísticas. Se enfatizan los estudios que abordan la variabilidad en las asociaciones observadas en los estudios epidemiológicos de ozono debido al error de exposición y al uso de diferentes técnicas de evaluación de la exposición. Otra consideración importante es caracterizar la forma de la relación C-R en todo el rango de concentraciones observado en estudios epidemiológicos. La evidencia en esta sección se centra en estudios epidemiológicos porque generalmente no se realizan estudios experimentales de exposición prolongada y mortalidad. Sin embargo, esta sección se basa en la evidencia de morbilidad presentada para diferentes resultados de salud en las disciplinas científicas (es decir, estudios toxicológicos en animales, estudios epidemiológicos

y estudios controlados de exposición humana) para respaldar las asociaciones observadas para la mortalidad específica por causa (U.S. EPA, 2020b).

Efecto sugerido, pero no suficiente para inferir una relación causal (U.S. EPA, 2020b).

3.1.4 Monóxido de carbono

3.1.4.1 Introducción

La exposición al CO se puede evaluar a través de los niveles de carboxihemoglobina (COHb) que se expresa como porcentaje de la hemoglobina (Hb) total que está unida al CO. Los diversos efectos del CO dependen de la concentración y la duración de la exposición, así como de los tipos de células y tejidos involucrados. Las respuestas al CO no se deben necesariamente a un proceso único y, en cambio, pueden estar mediadas por una combinación de efectos que incluyen el estrés hipóxico mediado por COHb y otros mecanismos como la producción de radicales libres y el inicio de la señalización celular. Sin embargo, la unión del CO al hierro reducido (Fe^{2+}) en las proteínas hemo con la consiguiente alteración de la función de la proteína hemo es el mecanismo común que subyace a las respuestas biológicas al CO.

El efecto fisiopatológico más conocido del CO es la hipoxia tisular causada por la unión del CO a la Hb. La formación de COHb no sólo reduce disponibilidad de O_2 de la sangre, sino que también perjudica la liberación de O_2 de la O_2Hb . Las alteraciones compensatorias de la hemodinámica, como la vasodilatación y el aumento del gasto cardíaco, protegen contra la hipoxia tisular. Dependiendo del grado de exposición al CO, estos cambios compensatorios pueden ser efectivos en personas con un sistema cardiovascular sano. Sin embargo, las respuestas hemodinámicas después de la exposición al CO pueden ser insuficientes en personas con disminución de la función cardiovascular, lo que tiene efectos sobre la salud.

Los mecanismos no hipóxicos están relacionados con la capacidad del CO para unirse a proteínas que son distintas a Hb y Mb (mioglobina) (Raub & Benignus, 2002). Desde entonces, experimentos adicionales han confirmado y ampliado estos hallazgos. Si bien la mayoría de los estudios más antiguos utilizaron concentraciones de CO mucho más altas que los niveles ambientales, muchos de los estudios más nuevos han empleado concentraciones de CO más acorde a los niveles que se encuentran en el ambiente.

Una cuestión clave para comprender los efectos biológicos de las exposiciones al CO ambientalmente relevantes es si las presiones parciales resultantes de CO (pCO) en células y tejidos pueden iniciar la señalización celular que normalmente está mediada por CO generado endógenamente o perturbar la señalización que normalmente está mediada por otras moléculas de señalización como el NO. Dado que existe la posibilidad de que el CO exógeno afecte las reservas endógenas de CO, las concentraciones de CO en células y tejidos antes y después de las exposiciones exógenas son de gran interés. Además, se sabe que la producción endógena de CO

aumenta durante la inflamación, la hipoxia, el aumento de la disponibilidad de hemo y otras condiciones de estrés celular en las que aumenta la actividad de enzimas hemo-xigenasas (HO-1 o HO-2) que degradan el grupo hemo.

El CO es una molécula de señalización celular ubicua con numerosas funciones fisiológicas. La generación endógena y la liberación de CO a partir del hemo por HO-1 y HO-2 está estrictamente controlada, al igual que cualquier proceso homeostático. Sin embargo, el CO aplicado exógenamente tiene la capacidad de alterar múltiples vías de señalización basadas en hemo debido a su naturaleza inespecífica. Solo se dispone de una cantidad limitada de información sobre el impacto del CO exógeno en los niveles celulares y tisulares de CO y en las vías de señalización. Sin embargo, estudios recientes en animales demostraron mayores niveles de CO en los tejidos y respuestas biológicas después de la exposición a 50 ppm de CO. Si las exposiciones ambientalmente relevantes al CO conducen o no a efectos adversos para la salud a través de la señalización celular alterada es una pregunta abierta para la cual no hay respuestas definitivas en este momento. Sin embargo, los experimentos que demuestran estrés oxidativo/nitrosativo, inflamación, alteraciones mitocondriales y disfunción endotelial en concentraciones de CO dentro de uno o dos órdenes de magnitud superiores a las concentraciones ambientales sugieren un papel potencial de tales mecanismos en las respuestas fisiopatológicas. Además, los aumentos prolongados del CO endógeno resultantes de enfermedades crónicas pueden proporcionar una base para una mayor sensibilidad de las poblaciones susceptibles a los efectos sobre la salud mediados por el CO, como se observa en personas con enfermedad de las arterias coronarias.

3.1.4.2 Efectos agudos

Para la elaboración de esta subsección se realizó una revisión al documento “*Integrated Science Assessment for Carbon Monoxide*” (U.S. EPA, 2010), correspondiente al ISA más reciente para el Monóxido de Carbono elaborado por la Environmental Protection Agency de los Estados Unidos. En el documento se establece que el grupo de población más susceptible a la exposición de CO corresponde a los que poseen enfermedades cardíacas, ya que corresponden a las personas con mayor riesgo de sufrir efectos en la salud por la COHb (carboxihemoglobina) e incremento de hipoxia basal.

En el ISA de 2010, se establece una posible conexión de la causa-efecto entre la exposición al CO y varios problemas de salud, como enfermedades cardiovasculares, afectaciones al Sistema Nervioso Central (SNC), problemas respiratorios y riesgo de muerte. Se reportaron efectos centrados en los niveles de COHb detectados en sangre mediante cromatografía de gases, considerada la técnica más precisa para medir concentraciones inferiores al 5% de COHb. En personas sanas, la COHb endógena es usualmente <1%, pero la exposición al CO ambiental puede elevar estos niveles críticos, variando entre individuos y especialmente en aquellos con ciertas condiciones médicas. Se detalla que una hora de exposición a 35 ppm de CO lleva a una concentración de COHb entre 0,9 y 1,9%, mientras que ocho horas de exposición a 9 ppm resulta en una concentración de 1,1 al 1,3% de COHb, dependiendo del nivel de actividad. Por ende, períodos de exposición prolongados a concentraciones bajas de CO pueden generar niveles de

COHb similares a los producidos por una exposición aguda a concentraciones más altas (U.S. EPA, 2010).

A. Efectos respiratorios

Se sugiere relación causal. Se encontró una asociación entre exposiciones a corto plazo y cambios en la función pulmonar, síntomas respiratorios, visitas a urgencias y admisiones hospitalarias. Sin embargo, se señala la dificultad para precisar los efectos en la salud respiratoria vinculados a la exposición al CO debido a la presencia de una gran variedad de contaminantes (provenientes principalmente de emisiones vehiculares) que interactúan entre sí, los que pueden afectar al momento de evaluar el riesgo asociado (U.S. EPA, 2010).

B. Efectos cardiovasculares

En el documento se concluye que con la evidencia recopilada de varios estudios se puede apoyar una probable relación causal entre la exposición al CO y efectos agudos en el sistema cardiovascular. Se evidenció que en personas con enfermedad coronaria, hubo efectos notables en el sistema cardiovascular, como una reducción en el tiempo de aparición de angina tras un aumento en los niveles de COHb de aproximadamente 2-6%. Además, se registró un incremento en la cantidad y complejidad de arritmias relacionadas con el ejercicio en individuos con enfermedad coronaria cuando los niveles de COHb alcanzaron el 6%. Asimismo, se identificaron vínculos entre las concentraciones de CO ambiental y la frecuencia de visitas a urgencias, así como ingresos hospitalarios debido a enfermedades como cardiopatía isquémica, insuficiencia cardíaca congestiva y otros trastornos cardiovasculares, presentes en concentraciones que oscilan entre 0,5 y 9,4 ppm como promedio diario (U.S. EPA, 2010).

A) Frecuencia cardíaca y variabilidad de la frecuencia cardíaca

Pocos estudios han examinado el efecto del CO en la frecuencia cardíaca; se justifica realizar más investigaciones para corroborar una asociación positiva. De manera similar, si bien un mayor número de estudios han examinado el efecto del CO en varios parámetros de la VFC (variabilidad de la frecuencia cardíaca), se han informado resultados mixtos a lo largo de estos estudios (U.S. EPA, 2010).

B) Anomalías del ECG que indican isquemia

El segmento ST de un ECG representa el período de repolarización lenta de los ventrículos y la depresión del segmento ST puede asociarse con resultados cardíacos adversos, incluida la isquemia. Un estudio investigó las asociaciones entre la contaminación del aire ambiente y los cambios en el nivel del segmento ST promediados durante períodos de 30 minutos en pacientes con enfermedad de las arterias coronarias (CAD) (Chuang et al., 2008). Los autores informaron que los aumentos en las concentraciones medias de PM_{2.5}, BC, NO₂ y SO₂ predijeron la depresión de los niveles promedio del segmento ST durante 30 minutos. No se observó asociación de depresión del segmento ST con CO u O₃ (U.S. EPA, 2010).

C) Arritmia

La arritmia cardíaca se refiere a un amplio grupo de afecciones en las que hay actividad eléctrica irregular en el corazón. Los principales tipos de arritmias son la fibrilación, la taquicardia y la bradicardia, todas ellas resultantes de una disfunción de las cámaras superior (aurículas) e inferior (ventrículo) del corazón. Brevemente, fibrilación se refiere a cuando una cámara del corazón tiembla caóticamente en lugar de bombear de manera ordenada, taquicardia se refiere a un latido cardíaco rápido (p. ej., >100 latidos/min), mientras que bradicardia se refiere a un latido cardíaco lento (p. ej., < 60 latidos/min) (U.S. EPA, 2010).

Los resultados de los estudios consultados proporcionan poca evidencia de una asociación entre la arritmia cardíaca y el CO ambiental (U.S. EPA, 2010).

D) Paro cardíaco

El paro cardíaco se refiere a la pérdida abrupta de la función cardíaca debido a que el corazón no se contrae de manera efectiva durante la sístole, lo que puede provocar muerte cardíaca súbita si no se trata de inmediato. Muy pocos estudios han investigado la asociación entre la exposición ambiental al CO y el riesgo de paro cardíaco, y ninguno informó una asociación significativa entre una mayor exposición al CO y la aparición de paro cardíaco (U.S. EPA, 2010).

E) Infarto de miocardio

Este es otro resultado cardíaco que ha recibido atención limitada dentro del área de investigación de la contaminación del aire. Un estudio investigó la asociación entre los cambios a corto plazo en el CO ambiental y la aparición de infarto de miocardio (IM) (U.S. EPA, 2010).

Peters y colegas (2001) emplearon un diseño de estudio cruzado de casos para analizar exposiciones a corto plazo (0-5 h y 0-5 días antes del inicio del IM) a partículas (PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{10-2.5}, BC) y gases (CO, O₃, NO₂, SO₂) entre 772 pacientes con IM en el área metropolitana de Boston. Si bien todos los contaminantes mostraron asociaciones positivas con la aparición de IM, solo las PM_{2.5} alcanzaron significación estadística con el período de exposición principal (2 h antes del inicio).

F) Presión arterial

Los estudios no han mostrado una asociación positiva entre la exposición a corto plazo de CO y cambios en la presión arterial, sin embargo, hay poca información por lo que se necesita realizar más estudios (Ibald-Mulli et al., 2001; Zanobetti et al., 2004).

G) Función vasomotora

Se encontró que los contaminantes gaseosos, incluidos SO₂, NO y CO, afectaban la función endotelial de las arterias grandes entre 40 hombres blancos sanos no fumadores en París, Francia, mientras que se encontró que las PM exageraban la respuesta dilatadora de las arterias pequeñas a la isquemia (Briet et al., 2007). Los cambios en la amplitud de la dilatación mediada por el flujo dependieron en gran medida de los cambios en las concentraciones de retraso de 5

días de SO₂, NO y CO, pero no de NO₂, PM_{2.5} o PM₁₀. El efecto atribuido al CO (coeficiente β : -0,68 [IC del 95 %: -1,22 a -0,15]) fue el más pequeño en magnitud en comparación con los del SO₂ y el NO, pero en general las estimaciones del efecto fueron similares y todas fueron estadísticamente significativas. De manera similar, PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂ y CO se correlacionaron positivamente con la hiperemia reactiva de las arterias pequeñas, y el efecto atribuido al CO fue el más pequeño en magnitud en comparación con los de PM_{2.5}, PM₁₀ y NO₂; pero en general, las estimaciones del efecto fueron similares y todas fueron estadísticamente significativas (U.S. EPA, 2010).

H) Marcadores sanguíneos de coagulación e inflamación.

Varios estudios han investigado la asociación entre el CO ambiental y varios marcadores sanguíneos relacionados con la coagulación y la inflamación. Los principales criterios de valoración analizados han sido el fibrinógeno plasmático, el péptido natriurético tipo B (BNP), la función endotelial, el factor VII, la proteína C reactiva (PCR), la protrombina, la molécula de adhesión intercelular (ICAM-1) y el recuento de glóbulos blancos (WBC)) (U.S. EPA, 2010).

La mayoría de los estudios proporcionan alguna evidencia de un vínculo entre la exposición al CO y los marcadores sanguíneos de coagulación e inflamación. Se requieren más estudios para determinar si los efectos protrombóticos caracterizados por muchos de los marcadores sanguíneos pueden explicar en parte la relación entre el CO y el riesgo de enfermedad cardiovascular isquémica (U.S. EPA, 2010).

C. Efectos en el Sistema Nervioso Central

Se sugiere relación causal. En un análisis de toxicidad, se señaló que tras exposiciones de corto plazo a niveles elevados de CO, se presentaron síntomas de intoxicación como dolores de cabeza, mareos, dificultades cognitivas, desorientación e incluso casos de coma. Estos hallazgos se suman a la evidencia epidemiológica que identificó cambios en el comportamiento tras exposiciones que llevaron a niveles de COHb en sangre de entre 5 y 20% (U.S. EPA, 2010).

D. Mortalidad

Se sugiere relación causal. Al momento de realizar una asociación entre el CO y la mortalidad existen varios factores que pueden influir en la determinación de la relación y que resulta relevante identificar. El estudio APHEA realizado en Estados Unidos analizó esta influencia considerando los principales elementos que podrían afectar en el resultado. Descubrieron que variables geográficas explicaban en gran medida las diferencias en las estimaciones del riesgo, pero también observaron que ciertos factores, como la presencia de múltiples contaminantes, contribuyeron a fortalecer la relación entre la mortalidad y la exposición al CO (U.S. EPA, 2010).

3.1.4.3 Efectos crónicos

Los efectos a largo plazo de la exposición al CO son menos robustos que los de corto plazo, por lo que se tiene evidencia sugerente de una relación causal solo en lo que respecta a efectos en el SNC y durante el embarazo. En contraste, la evidencia que respalda la relación con enfermedades cardiovasculares, respiratorias y mortalidad es menos consistente (U.S. EPA, 2010).

A. Morbilidad respiratoria y cardiovascular

La evidencia disponible no respalda firmemente una asociación de morbilidad respiratoria con exposiciones a largo plazo de CO debido a limitaciones en los métodos utilizados o a la falta de análisis exhaustivos de otros contaminantes presentes, lo que plantea dudas sobre si el efecto observado puede atribuirse únicamente al monóxido de carbono o si está influenciado por la combinación de contaminantes. En cuanto a la morbilidad cardiovascular, al momento de elaboración del ISA 2010 (U.S. EPA, 2010) no se disponía de estudios epidemiológicos que respaldaran efectos a largo plazo sobre enfermedades cardiovasculares.

B. Efectos en el Sistema Nervioso Central

Sugiere relación causal. La evidencia limitada en estudios epidemiológicos solo permite insinuar una posible relación causal de efectos en el SNC. Por otro lado, a partir de estudios toxicológicos de exposiciones controladas de CO durante el período prenatal en roedores se descubrieron cambios en el comportamiento, en la mielinización de las neuronas, en los niveles y la función de los neurotransmisores, así como en el sistema auditivo (U.S. EPA, 2010).

C. Efectos en el desarrollo de embarazo y parto

Sugiere relación causal. Se han detectado efectos en el proceso de parto y en el desarrollo fetal asociados a CO durante etapas prenatales, en específico durante el primer y segundo trimestre del embarazo, principalmente respecto a nacimientos prematuros y defectos cardíacos. Algunos estudios en roedores han aportado evidencia de efectos cardíacos como cardiomegalia transitoria, cambios en la estructura ósea y malformaciones en las extremidades después de exposiciones continuas al CO mientras estaban en el útero. Sin embargo, existe escasa e inconsistente evidencia epidemiológica respecto a la mortalidad infantil neonatal o posneonatal, bajo peso en el nacimiento y mortalidad infantil, por lo que solo se puede sugerir una relación causal (U.S. EPA, 2010).

D. Mortalidad

Hasta la fecha de elaboración del ISA 2010, la evidencia encontrada de estudios realizados establecía una asociación nula o negativa para la exposición a largo plazo del CO y mortalidad (U.S. EPA, 2010).

3.2 Análisis de correlación entre contaminantes y sus efectos crónicos y agudos en la salud de la población

3.2.1 Plomo

La exposición al plomo tiene efectos significativos y variados en la salud humana, afectando múltiples sistemas del organismo y presentando riesgos tanto agudos como crónicos. Estos efectos dependen de la dosis y duración de la exposición, y pueden ser evaluados mediante biomarcadores específicos.

3.2.1.1 Correlación entre exposición al Plomo y Efectos en la Salud (Wu et al., 2016):

- Efectos Agudos y Crónicos: La intoxicación aguda por plomo se manifiesta como gastroenteritis en adultos. Por otro lado, la exposición prolongada puede llevar a condiciones más serias como encefalopatía, neuropatía periférica, retrasos cognitivos, anemia y problemas digestivos y renales. Estos efectos crónicos reflejan la naturaleza insidiosa del plomo, que puede acumularse en el cuerpo durante largos períodos.
- Correlación y Biomarcadores: La correlación entre la exposición al plomo y sus efectos se ha establecido mediante el uso de biomarcadores como el plomo en sangre y orina, y el ZPP (zinc protoporfirina eritrocitaria). Estos indicadores permiten una evaluación precisa de la exposición y los riesgos asociados.
- Relaciones Dosis-Respuesta: Se ha observado que tanto la intoxicación por plomo como los valores de ZPP aumentan con la exposición acumulativa al polvo de plomo. Esto subraya la importancia de controlar y reducir la exposición al plomo en entornos de alto riesgo.
- Estudio de Cohorte de 20 Años: Un estudio longitudinal en trabajadores de una fundición en China ha proporcionado una perspectiva valiosa sobre los efectos a largo plazo de la exposición al plomo.

3.2.1.2 Sistemas del Cuerpo Afectados por el Plomo (Baran et al., 2022):

- Sistema Respiratorio: La exposición al plomo, especialmente en ambientes laborales, aumenta el riesgo de infecciones pulmonares y cáncer de pulmón.
- Sistema Nervioso: Afecta tanto al sistema nervioso central como al periférico, con consecuencias significativas en niños y adultos. En niños, incluso una exposición leve puede tener efectos devastadores en el desarrollo neurológico.
- Sistema Reproductivo: En hombres, puede alterar la calidad y movilidad del esperma, mientras que en mujeres, está asociado con abortos espontáneos, nacimientos prematuros y problemas en el desarrollo fetal.
- Sistema Hematopoyético: El plomo interfiere con la síntesis de hemoglobina, lo que puede resultar en anemia.

- Sistema Cardiovascular: Está relacionado con un aumento de la presión arterial y un mayor riesgo de enfermedades coronarias y accidentes cerebrovasculares.

3.2.1.3 Mecanismos de Daño Celular y Factores de Riesgo:

- Estrés Oxidativo e Inflamación: El plomo induce estrés oxidativo, formando especies reactivas de oxígeno y agotando los antioxidantes en la célula, lo que lleva a daños en diferentes componentes celulares.
- Factores de Riesgo: La susceptibilidad a los efectos tóxicos del plomo varía según la edad, la nutrición y la genética del individuo.
- Acumulación y Excreción del Plomo: El plomo se acumula principalmente en los tejidos óseos y su excreción es muy lenta, lo que aumenta el riesgo de efectos tóxicos acumulativos con exposiciones continuas.

3.2.1.4 Otros Efectos (Charkiewicz & Backstrand, 2020; Gameli et al., 2022):

- En Adultos: Afecta varios sistemas, incluyendo el nervioso, circulatorio, gastrointestinal, hormonal y cardiovascular. Estos efectos pueden variar en severidad y naturaleza, dependiendo de la duración y nivel de exposición.
- En Niños: Los efectos del plomo en niños son particularmente preocupantes, ya que pueden afectar adversamente el desarrollo neurológico y el crecimiento, con consecuencias potencialmente permanentes.
- Metabólicos y Genéticos: El plomo afecta procesos bioquímicos y la expresión génica, lo que puede tener una amplia gama de efectos en la salud general y el bienestar.
- Ubicación del Plomo en el Cuerpo: El plomo se almacena principalmente en los huesos, y su movilización aumenta con la edad, lo que puede llevar a una liberación continua de plomo en el torrente sanguíneo, especialmente en condiciones de deficiencia de calcio.

3.2.1.5 Coeficientes de riesgo

Los efectos tóxicos del plomo pueden ocurrir incluso a niveles muy bajos de exposición, sin un umbral claro identificado para la acción nociva. Esto significa que no hay un nivel de exposición por debajo del cual se pueda garantizar que no habrá efectos adversos para la salud. Esta característica desafía el enfoque tradicional del Cociente de Peligro (HQ), que generalmente se basa en la existencia de un umbral por debajo del cual se considera que no hay riesgo significativo de efectos adversos.

El Programa Superfund de la EPA emplea el Modelo Integrado de Exposición, Absorción y Biocinética (IEUBK) para evaluar específicamente los riesgos del plomo en niños, proporcionando estimaciones de riesgo para niveles elevados de plomo en sangre derivados de diversas fuentes de exposición. Además, se ha desarrollado un Modelo de Plomo para Adultos, enfocado en situaciones donde la exposición al plomo en adultos, especialmente en mujeres embarazadas, representa una mayor preocupación. Ambos modelos son herramientas esenciales para la evaluación de riesgos de exposición al plomo en distintos grupos poblacionales, facilitando la identificación de niveles de exposición peligrosos y apoyando la toma de decisiones en materia de regulaciones y salud pública. Estos modelos son cruciales para entender y mitigar los riesgos asociados con la exposición al plomo, adaptándose a las necesidades específicas de diferentes grupos de edad y contextos de exposición.

A continuación, se presentan los valores disponibles:

Tabla 3-1: Valores de evaluación cuantitativa de riegos. Plomo CAS 7439-92-1

Source	Supercategory	Type	Subtype	Risk assessment	Value	Units	Study Type	Exposure Route	Species	Year
Cal OEHHA	Toxicity Value	RfD	Child RfD	chronic	1	µg/dL blood	chronic	oral	Human (RA)	-

Fuente: Environmental Protection Agency EPA, «Chemistry Dashboard» [Internet].

[Citado dic 2023] Disponible en:

<https://comptox.epa.gov/dashboard/chemical/details/DTXSID2024161>

Tabla 3-2: Cáncer. Plomo CAS 7439-92-1

Source	Supercategory	Type	Subtype	Risk assessment	Value	Units	Study Type	Exposure Route	Species	Year
Cal OEHHA	Toxicity Value	cancer slope factor	oral slope factor	chronic	0,0085	(mg/kg-day) ⁻¹	chronic	oral	Human (RA)	2022
Cal OEHHA	Toxicity Value	cancer slope factor	inhalation slope factor	chronic	0,042	(mg/kg-day) ⁻¹	chronic	inhalation	Human (RA)	2022

Fuente: Environmental Protection Agency EPA, «Chemistry Dashboard» [Internet].

[Citado dic 2023] Disponible en:

<https://comptox.epa.gov/dashboard/chemical/details/DTXSID2024161>

La relación dosis-respuesta entre la concentración de plomo en el aire (PbA) y la concentración de plomo en la sangre (PbB) es crucial para comprender y evaluar los riesgos para la salud asociados con la exposición al plomo. Esta relación se caracteriza comúnmente por un "factor de pendiente" o "relación aire-sangre", que indica el aumento en PbB por cada unidad de aumento en PbA.

. Estudios epidemiológicos han demostrado que esta relación no es lineal y que el factor de pendiente puede aumentar a medida que disminuyen las concentraciones de PbA. Es decir, a niveles más bajos de exposición al plomo en el aire, cada incremento adicional en PbA puede resultar en un aumento proporcionalmente mayor en PbB (U.S. EPA, 2024b).

La relación dosis-respuesta entre PbA y PbB es fundamental para la evaluación del riesgo y la implementación de medidas de control y prevención. Un factor de pendiente comúnmente citado en la literatura es de 1:5, indicando que por cada 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de aumento en PbA, hay un aumento correspondiente de 5 $\mu\text{g}/\text{dL}$ en PbB (U.S. EPA, 2024b). Sin embargo, este factor puede variar según las condiciones ambientales y las características de la población expuesta.

La Figura 3-1 muestra factores de pendiente utilizados por la USEPA derivados de distintos estudios que relacionan PbA-PbB en niños. Se puede observar que los factores de pendiente van aumentando con la disminución de PbA, además de que en los estudios más antiguos se tienen PbA considerablemente más altos en comparación a los estudios más nuevos.

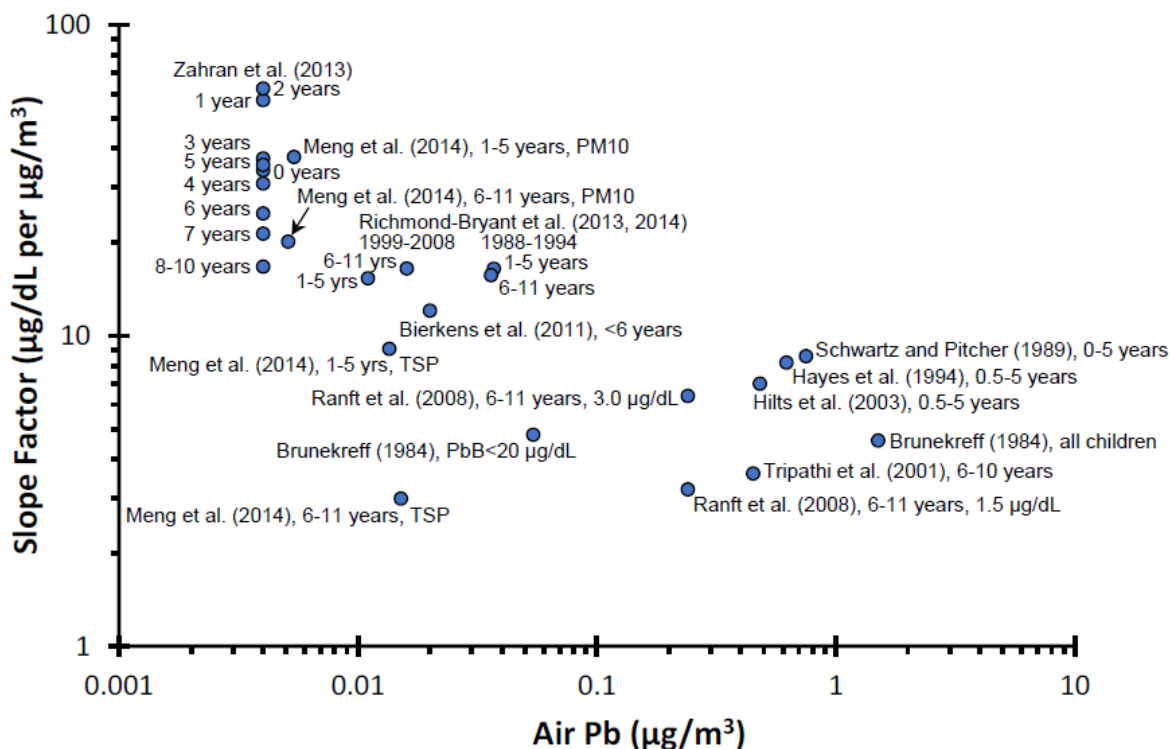


Figura 3-1 Factores de pendiente para el PbB en función del PbA.

Fuente: (U.S. EPA, 2024a)

Es importante destacar que la relación dosis-respuesta entre PbA y PbB es dinámica y puede ser influenciada por diversos factores, incluyendo la edad, la nutrición, y la presencia de otras fuentes de exposición al plomo. Por lo tanto, la determinación precisa de esta relación requiere una evaluación cuidadosa de los datos epidemiológicos y ambientales específicos de cada contexto.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) ha publicado recientemente la Evaluación Integrada de la Ciencia del Plomo (ISA, 2024) que proporciona una actualización integral sobre la relación entre PbA y PbB, especialmente en niños. La ISA 2024 destaca que estudios anteriores han mostrado que la relación entre PbA y PbB puede ser más compleja, con factores de pendiente que aumentan a medida que disminuyen las concentraciones de PbA. La evidencia epidemiológica y toxicológica ha demostrado que incluso niveles bajos de exposición al plomo están asociados con déficits cognitivos en niños. Estudios recientes reflejan exposiciones al plomo más bajas en la actualidad, con concentraciones centrales de PbA entre 0.004 y 0.04 µg/m³ (U.S. EPA, 2024b).

La ISA 2024 resalta la importancia de considerar la exposición al plomo en la primera infancia, ya que los estudios han encontrado asociaciones entre los niveles de plomo en sangre y los efectos cognitivos en niños con niveles promedio de PbB entre 2 y 8 µg/dL (U.S. EPA, 2024b). Sin

embargo, existe incertidumbre en cuanto a la frecuencia, duración, momento y nivel de exposición que contribuyen a los niveles de PbB medidos en poblaciones adultas y adolescentes.

En resumen, la ISA 2024 de la USEPA subraya la necesidad de continuar investigando y evaluando la relación entre la exposición al plomo y los efectos en la salud, especialmente en niños, para comprender mejor los riesgos asociados y establecer medidas de protección adecuadas.

3.2.2 Dióxido de Azufre

La Tabla 3-3 presenta las más recientes asociaciones causales entre el SO₂ en la atmósfera y los efectos en la salud identificadas por la US-EPA (2017) en “*Integrated Science Assessment (ISA) for Sulfur Oxides*”. En el caso del SO₂, solo los efectos de morbilidad respiratoria en el corto plazo son identificados como causales, sin embargo, en el largo plazo la relación se clasifica como sugerente.

Tabla 3-3 Relaciones de causalidad identificadas por la US-EPA en ISA SO₂.

Contaminante	Periodo	Tipo de relación							
		Mortalidad	Morbilidad cardiovascular	Morbilidad respiratoria	Morbilidad metabólica	Morbilidad en el sistema nervioso	Morbilidad reproductiva y del desarrollo		Cáncer
Contaminante	Periodo						Reproducción y fertilidad en mujeres y hombres	Efectos del embarazo y el parto	
SO ₂	Largo	Inadecuado	Inadecuado (2)	Sugerente (1)	-	-	Inadecuado	-	Inadecuado
	Corto	Sugerente	Inadecuado	Causal	-	-	-	-	-

(1) En la versión anterior se clasificó como inadecuado.

(2) En la versión anterior no fue incluido.

Fuente: (US-EPA, 2017)

En el año 2021, la OMS publicó las nuevas directrices sobre la calidad del aire para seis contaminantes: MP₁₀, MP_{2.5}, O₃, NO₂, SO₂ y CO (OMS, 2021). Estas directrices no tienen carácter normativo, sino que consisten en recomendaciones de metas de calidad del aire, determinadas a partir del estudio cuantitativo del impacto de la concentración de contaminantes en la salud humana. Así, proveen a los gobiernos una herramienta basada en evidencia que puede ser usada en la elaboración de leyes y políticas públicas relacionadas a la calidad del aire.

Las recomendaciones se generaron a partir de una revisión sistemática y metaanálisis para los impactos en la salud para los que se identificaron asociaciones causales y probablemente causales con los contaminantes seleccionados. Para esto, se evita la selección de un único estudio que presente un coeficiente de riesgo unitario (β) y se opta en vez por calcular un valor combinado a partir de los distintos estudios realizados internacionalmente a través de metaanálisis para cada par de contaminante y efecto. Esta metodología está en línea con lo realizado anteriormente en el proyecto HRAPIE, aunque en ese caso se prefirieron estudios de metaanálisis existentes en vez de ser realizado por los expertos del proyecto (OMS, 2021).

En primer lugar, el Grupo de Desarrollo de Directrices (GDG) prioriza los efectos en la salud que serán revisados para la formulación de las directrices (ver Tabla 3-4). Para ello considera la evidencia de asociaciones causales y probablemente causales de pares de contaminante y efecto en salud determinadas por *Health Canada*, la Agencia internacional de Investigación para el Cáncer y las ISAs de la US-EPA³.

Tabla 3-4 Relaciones de causalidad identificadas por la OMS en guía 2021.

Contaminante	Periodo	Tipo de relación				
		Mortalidad cardiovascular y respiratoria	Mortalidad total	Morbilidad respiratoria	Morbilidad cardiovascular	Cáncer
SO ₂	Corto	Causal (1)(3)	Causal (3)	Causal (2)	-	-

(1) Solo respiratoria.

(2) *Health Canada* considera solo adultos.

(3) El grupo de trabajo de las Directrices de Calidad del Aire decide incluirlo, pero la evidencia no reporta realmente una relación de causalidad con mortalidad.

Fuente: (OMS, 2021).

En segundo lugar, se realizan seis revisiones sistemáticas y metaanálisis para estimar los coeficientes betas de los efectos en salud priorizados para los contaminantes seleccionados (ver Tabla 3-5).

Tabla 3-5 Revisiones sistemáticas y metaanálisis realizados para MP2,5, MP10 y SO₂

Contaminante	Periodo	Efectos en salud	Fuente
SO ₂	Corto	Mortalidad por todas las causas y por causas respiratorias	(Orellano et al., 2021)
		Visitas a urgencia y admisiones hospitalarias por asma	(Zheng et al., 2021)

Fuente: (OMS, 2021)

A continuación, en la Tabla 3-6 se presentan los coeficientes de riesgo recomendados para el contaminante SO₂ para causas respiratorias en exposiciones a corto plazo, según lo presentado en el estudio “*Actualización de coeficientes de riesgo para efectos de la contaminación atmosférica en la salud*” (GreenLab Dictuc, 2022), cuyo objetivo fue actualizar los coeficientes de riesgo unitarios para efectos de la contaminación atmosférica en la salud de las personas, considerando criterios claros y trazables para su revisión y actualización futura.

³ Incluye ISA SO₂ (US-EPA, 2017) e ISA MP (US-EPA, 2019).

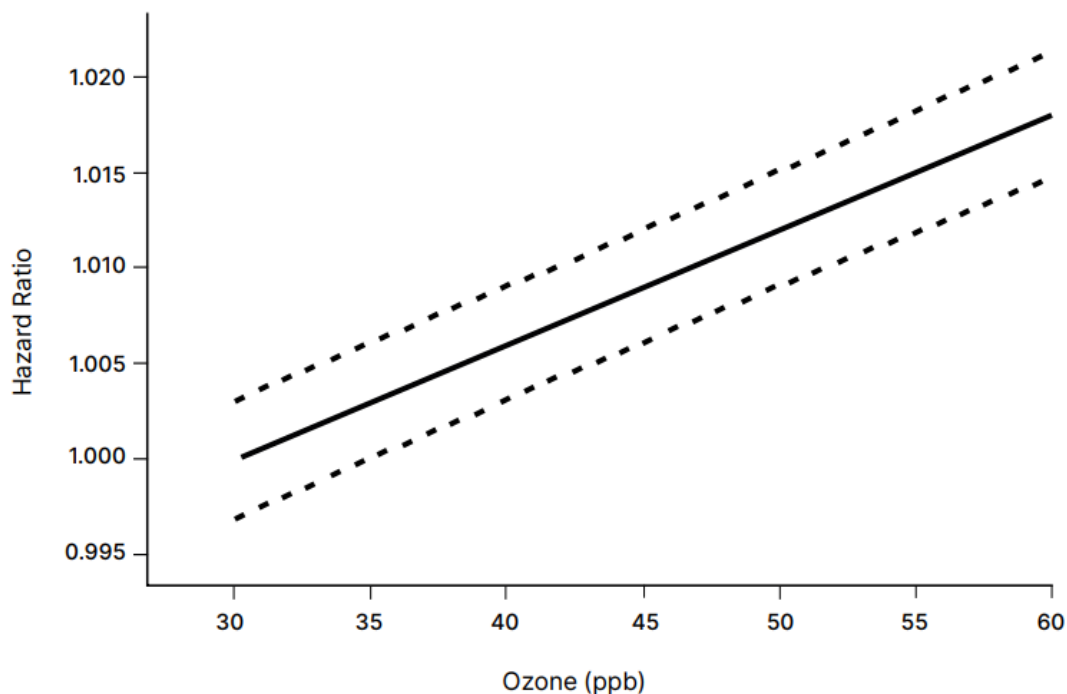
Tabla 3-6 Coeficientes de riesgo unitario seleccionados para exposiciones de corto plazo.

Efecto	Tipo de causa	Endpoint	Edad rango	Beta %/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fuente
Admisiones de urgencia	Respiratorio	Asma	0-99	0,0037	Guo & Chen (2018)
	Respiratorio	Asma	0-99	0,0116	Ito et al. (2007)
	Respiratorio	Asma	0-99	0,0015	Wilson et al. (2005)
Admisiones hospitalarias	Respiratorio	Asma	18-64	0,0016	Cai et al. (2014)
	Respiratorio	Asma	0-17	0,0058	Samoli et al. (2011)
	Respiratorio	Asma	0-17	0,0018	Ko et al. (2007)
	Respiratorio	Asma	0-17	0,008	Lee et al. (2006)

Fuente: GreenLab Dictuc (2022)

3.2.3 Ozono

Dentro de la última guía de la OMS para calidad del aire “*WHO Global Air Quality Guidelines*” se menciona la revisión sistemática de Huangfu & Atkinson (2020) sobre el ozono y mortalidad no accidental, en exposición a largo plazo de O_3 en temporada alta. En ella se descubrió que un aumento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la media estacional máxima diaria de las concentraciones medias octohorarias de O_3 , entregaba una estimación del efecto metaanalítico de $\text{HR} = 1,01$ (IC del 95%: 1,00-1,02), asumiendo una relación lineal. Se acostumbra a calcular el máximo diario de concentración promedio en intervalos de 8 horas en vez de las mediciones promedio en 24 horas debido a las fluctuaciones considerables que tiene el ozono a lo largo del día. La mayoría de los estudios citados definió la temporada alta como los 5 o 6 meses más cálidos del año. Además, se proporcionaron CRFs en un estudio (Di et al., 2017) que documentó una función lineal a partir del percentil 5 de las concentraciones observadas durante los meses más cálidos, alrededor de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ver Figura 3-2). También se investigó la mortalidad respiratoria, entregando un RR mayor en comparación al de mortalidad no accidental, con un $\text{HR} = 1,02$ (95% CI: 0.99-1.05) por aumento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de O_3 .

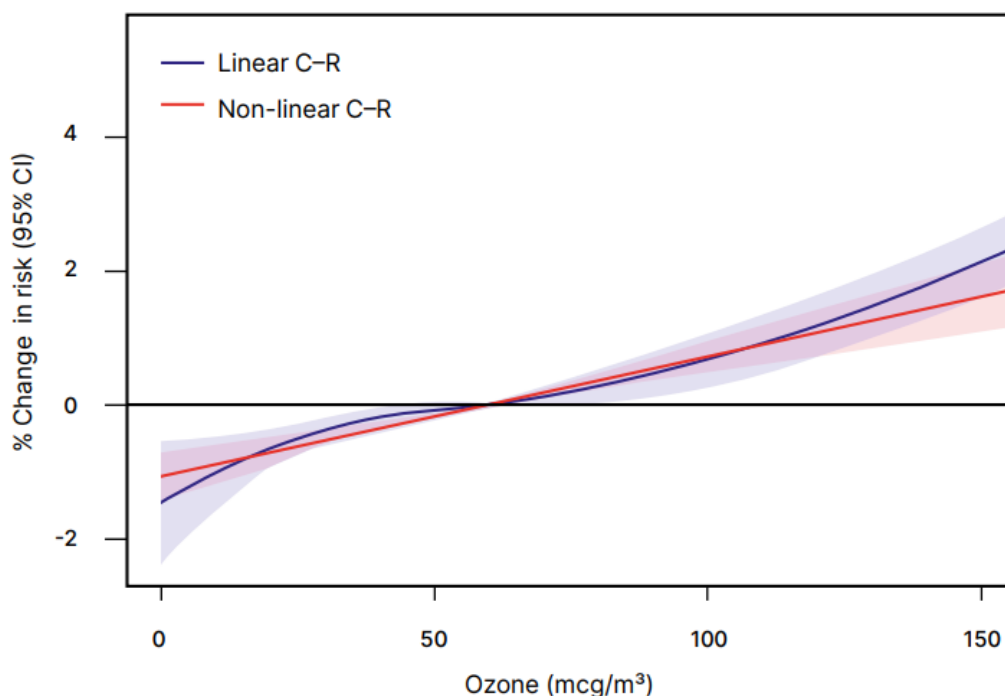


Nota: las unidades en ppb necesitan ser multiplicadas por 2 para obtener concentraciones expresadas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El HR está expresado relativo al percentil 5 de la distribución de concentraciones de ozono, la cual fue de 30 ppb.

Figura 3-2 Asociación de temporada alta, exposición a largo plazo y mortalidad no accidental.

Fuente: (Di et al., 2017)

Respecto a la exposición de corto plazo, se menciona la revisión sistemática realizada por Orellano et al. (2020) sobre mortalidad no accidental por todas las causas, estableciendo una estimación del efecto metaanalítico de $\text{HR} = 1,0043$ (IC 95%: 1,0034-1,0052) por incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ozono, asumiendo una relación lineal. Esta estimación del efecto se refiere a concentraciones máximas de 8 horas y presenta un nivel de certeza alto. Además, como se muestra en la Figura 3-3, existen pruebas de que esta asociación persiste a niveles muy bajos de exposición.



Nota 1: El cambio en el riesgo está expresado relativo a una concentración media de ozono de 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Nota 2: C-R es igual a concentración-respuesta.

Figura 3-3 Curva de exposición-respuesta para exposición al ozono en periodos de 8 horas y mortalidad por todas las causas.

Fuente: (Vicedo-Cabrera et al., 2020)

3.2.4 Monóxido de Carbono

En la última guía de calidad del aire de la OMS (OMS, 2021) se hace referencia a la revisión sistemática llevada a cabo por Lee et al. (2020) acerca del monóxido de carbono en relación con ingresos hospitalarios y mortalidad por infarto de miocardio en periodos de exposición de 24 horas. Esta revisión estableció que, mediante un análisis metaanalítico, el efecto estimado fue de $\text{HR} = 1,052$ (IC 95%: 1,017-1,089) por incremento de 1 mgCO/m^3 , asumiendo una relación lineal y obteniendo un nivel de certeza moderada. Los estudios sobre infarto de miocardio incluidos en la revisión no proporcionaron análisis más detallados de la forma del CRF. Sin embargo, se observaron efectos en estudios con niveles más elevados de monóxido de carbono. En concreto, se encontró un efecto estimado de $\text{HR} = 1,019$ (IC 95%: 1,011-1,027) por aumento de 1 mgCO/m^3 para ingresos hospitalarios por infarto de miocardio.

La asociación entre el monóxido de carbono con ingresos hospitalarios y mortalidad por infarto de miocardio se mantuvo persistente cuando se estratificó según el diseño del estudio. En la Figura 3-4 se muestra la asociación estratificada por subgrupos.

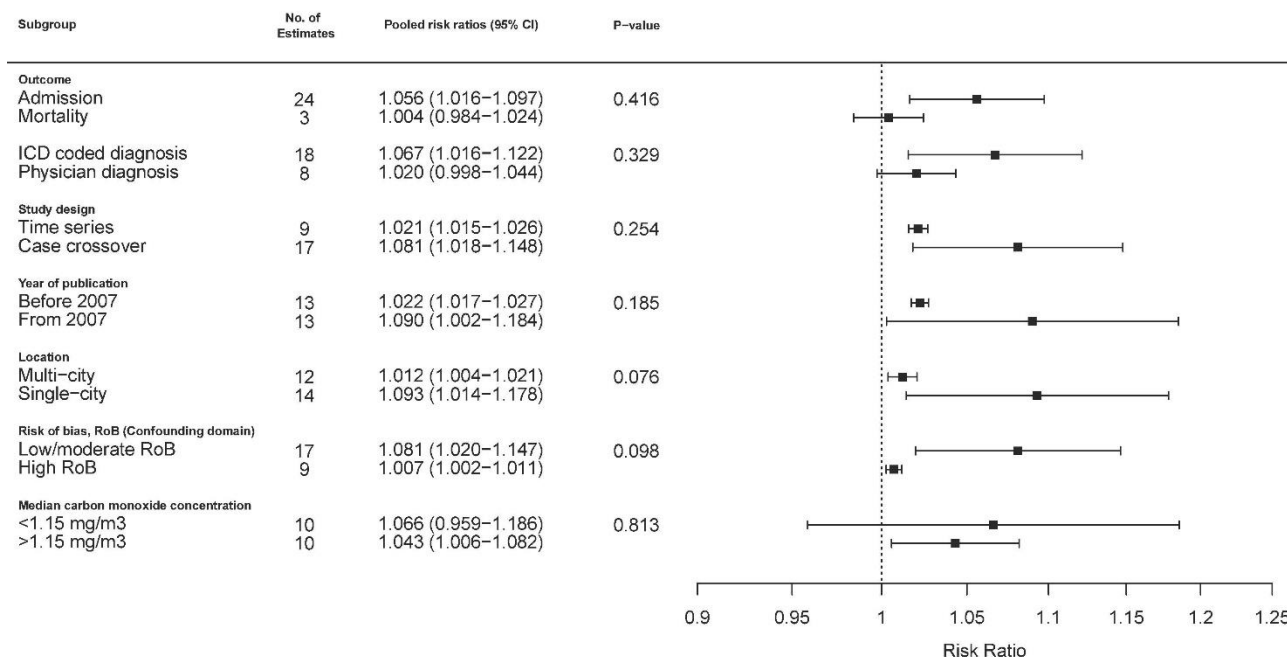


Figura 3-4 Asociación entre monóxido de carbono e ingreso por infarto de miocardio o mortalidad por infarto de miocardio estratificada por subgrupos.

Fuente: Lee et al. (2020)

3.3 Síntesis de la nueva evidencia en salud

A continuación, se presenta una síntesis de la nueva evidencia en salud para cada contaminante a partir de los antecedentes recopilados en las Secciones 3.1 y 3.2.

3.3.1 Plomo

Desde la última revisión de antecedentes que fundamentó la norma primaria actual sobre plomo en el país, se ha observado escasa evidencia nueva en salud sobre sus efectos. Anteriormente, se señalaba que la OMS había establecido niveles mínimos de plomo en sangre, a partir de los cuales se evidenciaban efectos en la salud de las personas, con umbrales de 15-20 µg/dL en adultos y 10 µg/dL en niños. Sin embargo, la evidencia reciente ha permitido identificar daños en diversos sistemas del organismo a concentraciones inferiores a 10 µg/dL. Además, se ha establecido que no existe un nivel seguro de plomo en sangre para los niños.

En contraste con la noción anterior de que los efectos tóxicos del plomo se centraban principalmente en el sistema nervioso central, con la posibilidad de dañar prácticamente todos los sistemas en caso de exposición a dosis elevadas, la evidencia actual indica que el plomo puede generar efectos adversos en diversos sistemas del organismo, y esta afectación no parece requerir concentraciones excepcionalmente altas. De hecho, al determinar coeficientes de riesgos, se ha concluido que no existe un nivel de exposición por debajo del cual se pueda garantizar la ausencia de efectos adversos para la salud.

Adicionalmente, a pesar de que la evidencia relacionada con el cáncer sigue siendo limitada, la IARC clasifica los compuestos inorgánicos de plomo como probablemente carcinógenos para los humanos, basándose en evidencia suficiente en animales y evidencia limitada en humanos.

3.3.2 Dióxido de azufre

Hasta la fecha, no se ha identificado nueva evidencia en el ámbito de la salud que contradiga o modifique las conclusiones previamente establecidas en la última revisión de antecedentes que fundamentó la norma primaria actual de SO₂ en el país. Las investigaciones y estudios disponibles siguen respaldando los hallazgos previos, principalmente centrados en efectos al sistema respiratorio.

Únicamente se han establecido relaciones causales entre la exposición a corto plazo de SO₂ y los efectos de morbilidad respiratoria en adultos. Se sugiere que los niños, especialmente aquellos con alergias o infecciones en las vías respiratorias superiores, podrían tener mayor penetración de SO₂ en las vías respiratorias inferiores.

La exacerbación del asma frente a exposiciones agudas de SO₂ presenta una clara relación dosis-respuesta en el rango de concentraciones de 0,2 a 1,0 ppm. Además, las hospitalizaciones y visitas a la sala de emergencias por enfermedades respiratorias muestran una asociación positiva con exposiciones agudas a corto plazo, como también ocurre para la mortalidad respiratoria.

3.3.3 Ozono

La nueva evidencia en salud respalda los efectos previamente conocidos del ozono en el sistema respiratorio y se ha documentado su impacto en otros sistemas, como el cardiovascular, nervioso y reproductor, aunque la interpretación de la evidencia para estos efectos presenta cierta incertidumbre.

Sobre la evidencia de efectos a corto plazo, se han encontrado asociaciones entre la exposición al ozono y aumentos en la glucosa en ayunas en individuos sanos, así como hiperglucemia y resistencia a la insulina en personas con diabetes tipo 2. Algunos estudios indican cambios en la presión arterial, variabilidad en la frecuencia cardíaca y señales de arritmia. Se concluye una probable relación causal entre la exposición al ozono y la mortalidad total, respaldada por diversos estudios epidemiológicos. La asociación más fuerte se observa en los primeros días después de la exposición, específicamente en el rango de 0 a 3 días.

En cuanto a efectos crónicos, la evidencia colectiva sugiere, aunque no de manera concluyente, una posible relación causal entre la exposición prolongada al ozono y efectos en los sistemas metabólicos, cardiovasculares, nerviosos y reproductivos, así como con la mortalidad. La evidencia más sólida de efectos metabólicos proviene de estudios epidemiológicos que muestran

asociaciones positivas con la mortalidad relacionada con la diabetes en cohortes bien establecidas en Estados Unidos y Canadá.

3.3.4 Monóxido de carbono

Aunque en personas saludables los niveles endógenos de COHb usualmente son <1%, la exposición al CO ambiental puede aumentar estos niveles, especialmente en individuos con ciertas condiciones médicas (personas con enfermedades cardíacas son particularmente susceptibles).

La evidencia reciente continúa respaldando las repercusiones en el sistema respiratorio y cardiovascular, previamente establecidas, y aporta nuevos hallazgos que asocian también efectos al SNC y a la mortalidad. En lo que concierne a las exposiciones a corto plazo, la evidencia recopilada permite postular una relación causal sobre los efectos en el sistema respiratorio y el SNC, así como también con la mortalidad. Sin embargo, en lo que respecta a los efectos agudos en el sistema cardiovascular, la evidencia respalda únicamente una probable relación causal. Por otro lado, la evidencia es menos concluyente cuando se trata de los efectos a largo plazo. Se sugiere una relación causal principalmente en lo que concierne a efectos en el sistema nervioso central y durante el embarazo. No obstante, se observa una limitada consistencia en la evidencia que respalda la asociación con enfermedades cardiovasculares, respiratorias y la mortalidad a largo plazo.

Además, se ha observado que períodos prolongados de exposición a concentraciones bajas de CO pueden generar niveles de COHb similares a los que resultan de una exposición aguda a concentraciones más elevadas.

3.4 Determinación de efectos agudos y crónicos generados por exposición a SO₂ en medio ambiente y naturaleza

3.4.1 Revisión de literatura científica de efectos por exposición a SO₂

Para la determinación de efectos agudos y crónicos sobre la naturaleza y el medio ambiente, se realizó una revisión del estudio *“Integrated Science Assessment (ISA) for Oxides of Nitrogen, Oxides of Sulfur and Particulate Matter-Ecological Criteria”* de la U.S. EPA (2020), el cual basado en evidencia consistente, coherente y biológicamente plausible, concluye la existencia de una relación causal entre la exposición a SO₂ gaseoso y daños a la vegetación. Toda la información presentada a continuación se basa en lo expuesto en ese documento que a su vez se basa en múltiples referencias.

Desde principios del siglo XX se ha comprobado que la exposición al dióxido de azufre puede ocasionar daños e incluso la muerte en plantas. Esto a partir de las fuentes significativas de emisiones de SO₂ que han representado las fundiciones de minerales, capaces de generar la

pérdida de vegetación en áreas circundantes a estas instalaciones debido a los efectos agudos de las altas concentraciones de este contaminante. La mayor parte de la evidencia que respalda los efectos directos en la vegetación proviene de estudios de exposición controlada a SO_x en fase gaseosa, realizados en diversas especies vegetales y abordados en el ISA pasado del año 2008, dentro del cual se estableció que existe suficiente evidencia para inferir una relación causal entre la exposición al SO_2 en fase gaseosa y los daños a la vegetación. Aunque se han realizado pocos estudios adicionales desde entonces, la limitada investigación posterior a 2008 agrega más evidencia de que el dióxido de azufre tiene efectos negativos agudos sobre la vegetación. Por consiguiente, el informe ISA más reciente de 2020 mantiene la conclusión sobre esta relación causal y no se han modificado los niveles de SO_2 que generan estos efectos.

Los daños foliares agudos generalmente ocurren a las pocas horas de la exposición, implica una rápida absorción de una dosis tóxica del contaminante a través de las estomas de las hojas y provoca un colapso o necrosis de los tejidos vegetales. En concentraciones más altas, el SO_2 deshabilita enzimas mediante modificaciones químicas, lo que resulta en una reducción de la actividad metabólica y en la pérdida de integridad de las membranas (Nieboer et al., 1976; Ziegler, 1973). Además, el SO_2 tiene la capacidad de unirse a los átomos metálicos centrales de las enzimas, afectando negativamente la función de la membrana y la osmolalidad celular. Se menciona a un autor, Kropff, el cual propuso que la aparición de daño foliar inducido por SO_2 probablemente se debía a una alteración de la regulación del pH intracelular, por lo que enumeró varios estudios en los que el pH de los homogeneizados de células foliares sólo cambió hacia una mayor acidez cuando las plantas sufrieron daños letales por exposiciones prolongadas a SO_2 . Hasta el momento no se ha encontrado evidencia clara de daños foliares agudos en concentraciones de SO_2 más bajas que el límite establecido por la normativa secundaria en Estados Unidos. Esta norma establece un nivel promedio de 0,5 ppm para un periodo de 3 horas (U.S. EPA, 2020).

Otro tipo de lesión visible se denomina lesión crónica y suele ser el resultado de exposiciones variables al SO_2 durante la temporada de crecimiento. Las concentraciones más bajas de SO_2 a largo plazo no solo pueden provocar una disminución en el crecimiento, sino que también de la fotosíntesis y el rendimiento de las plantas. Estos efectos son acumulativos durante la temporada de crecimiento y a menudo no están asociados con daños foliares visibles (U.S. EPA, 2020). Pueden producirse efectos crónicos en ausencia de síntomas visibles.

Se ha evidenciado también que, debido a las concentraciones de estos gases en el ambiente, ha impactado en la respuesta específica de las plantas por los factores internos como el auto mecanismo de desintoxicación, estos factores internos incluyen el estado hídrico de la planta, la luz, la temperatura, la humedad, los contaminantes, entre otros. Además de que una alta concentración de SO_2 provoca fitotoxicación, causando decoloración, deformidad y necrosis en las plantas (40 CFR Part 50: Secondary National Ambient Air Quality Standards for Oxides of Nitrogen and Sulfur, 2012).

Los efectos del contaminante sobre la vegetación dependen principalmente del tiempo de exposición y características morfológicas de las plantas, tales como: tamaño de la hoja, índice área foliar y la cobertura. Se estima que en la zona central de Chile las concentraciones existentes de SO_2 podrían provocar menoscabos en los cultivos e incluso ocasionar pérdidas en la productividad (García-Huidobro et al., 2001). Además Gallardo et al. (2002), señala los estudios realizados por Sanders et al. (1995) y aclara que sin perjuicio de la legislación chilena vigente, se detecta la aparición de efectos crónicos en la vegetación y lesiones visibles de las partes aéreas de la planta por acción directa para una exposición a una media anual de 30 gramos por metro cúbico (g/m^3) (Figueroa Aldunce, 2014).

Las lesiones crónicas tienden a provocar cambios fisiológicos sutiles como como reducción del crecimiento y/o rendimiento de la planta, senescencia y abscisión prematuras, maduración acelerada del fruto, y también puede dar lugar a lesiones cloróticas visibles (Hewitt et al., 1990). Además, los cambios fisiológicos, químicos y anatómicos causados por exposiciones prolongadas a niveles bajos pueden aumentar la susceptibilidad de las plantas a otros estreses bióticos y abióticos como las heladas, la sequía y los ataques de patógenos. Aunque la fitotoxicidad de los contaminantes atmosféricos está ampliamente documentada en cultivos básicos como el trigo y la judía *Phaseolus* (Heck et al., 1988; Bonte y Mathy, 1989), los efectos crónicos en cultivos frutales y hortícolas como los cultivados en Chile han recibido menos atención (García-Huidobro et al., 2001).

La entrada de gases a través de las estomas depende de condiciones ambientales como la humedad, la temperatura, la intensidad de la luz y la disponibilidad de agua. Por eso, en condiciones de oscuridad o sequía las estomas están cerrados y la resistencia a la absorción de gases es muy alta, con lo cual la planta es muy poco susceptible a sufrir daños. A diferencia de las plantas vasculares, los musgos y líquenes no tienen una barrera cuticular protectora contra los contaminantes gaseosos, por lo que son más sensibles a estos. De hecho, el dióxido de azufre ha sido identificado como el principal desencadenante de la disminución y muerte de los líquenes en entornos urbanos e industriales, siendo los líquenes fruticosos la especie más susceptible. Frente a la exposición de SO_2 , los líquenes experimentan una serie de impactos negativos en su funcionamiento vital, como reducciones en sus procesos de fotosíntesis y respiración, deterioro en el componente algal, liberación de electrolitos, inhibición de la fijación de nitrógeno, disminución en la absorción de K^+ y alteraciones estructurales. Respecto a esto, se han medido reducciones significativas en la fotosíntesis de líquenes en concentraciones tan bajas como 91 ppb durante un periodo de 2 a 4 horas. A su vez, el deterioro en el componente algal del talo se ve evidenciado por su decoloración y posterior muerte luego de que las células se dañan. Sin embargo, se ha observado que los efectos se ven mitigados cuando los líquenes se adhieren a un sustrato, como corteza o roca, ya que tiene un pH alto o una capacidad amortiguadora superior. En el documento mencionan los hallazgos de Van Herk, quien evaluó las relaciones entre el pH de la corteza y los niveles de contaminación del aire, identificándolos como dos variables significativas que afectan la composición de los líquenes epífitos y concluyendo que el pH de la corteza era el principal factor que regulaba la distribución de especies acidófilas en los Países Bajos. De esta manera, los cambios indirectos en el pH de la corteza ocasionados por la

acidificación y las altas concentraciones de SO_2 son capaces de afectar la distribución de los líquenes (U.S. EPA, 2020).

El ISA 2020 menciona investigaciones recientes en Alemania y algunos países de Europa del Este que indican reducciones en el crecimiento de los árboles debido al SO_2 . En uno de los estudios referenciados, se evaluó una base de datos que contenía el crecimiento a largo plazo de 1.010 abetos (*Abies alba*) y el nivel de contaminación del aire, para 51 lugares en el sur de Alemania. En este análisis, se vio cómo el crecimiento del abeto estuvo influenciado por los niveles de SO_2 más que cualquier otro factor, evidenciando un aumento casi inmediato del crecimiento cuando las emisiones de SO_2 comenzaron a disminuir en 1980. Esta rápida respuesta permitió indicar un efecto de exposición directa al SO_2 gaseoso en lugar de un efecto indirecto ocasionado por la acidificación del suelo, lo cual tiene un tiempo de respuesta más largo. En particular, concentraciones medias anuales superiores a $10 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ (aproximadamente 4 ppb) afectaron negativamente el crecimiento del abeto blanco (U.S. EPA, 2020).

Otros autores también encontraron evidencia de cambios fisiológicos en respuesta a las emisiones de SO_2 , principalmente la recuperación en el crecimiento de árboles en respuesta a la disminución de las emisiones de SO_2 desde los años 80. Utilizando el análisis de los anillos de los árboles, se observaron aumentos significativos en el crecimiento de la sabina colorada de Virginia (*Juniperus virginiana*), en Virginia Occidental, a partir de 1980. Aunque una respuesta a este estudio por parte de otros investigadores sugirió que los árboles se encontraron en un afloramiento de piedra caliza que podría haber protegido frente a la acidificación del suelo, en general se concluye que tanto el SO_2 gaseoso solo como combinado con otros gases es capaz de inhibir el crecimiento de la *Juniperus virginiana* (U.S. EPA, 2020).

Por otro lado, los humedales, a menudo llamados 'los riñones del paisaje', cumplen una función crucial al servir como receptores de agua y desechos procedentes de fuentes tanto naturales como humanas. El SO_2 puede fácilmente penetrar en los cloroplastos y afectar el crecimiento y desarrollo de las plantas de los humedales. Incluso cuando las estomas están cerradas, puede también reaccionar con el agua para producir bisulfito y entrar a la hoja a través de la cutícula. En los cloroplastos, SO_2 se convierte principalmente en sulfito, lo que provoca una reducción de la asimilación del CO_2 , inhibe las enzimas fotosintéticas y disminuye la tasa de transporte fotosintético de electrones (Sha et al., 2010).

Existe evidencia que concluye que los óxidos de azufre han causado efectos considerables para los ecosistemas tanto acuáticos como terrestres. La literatura científica señala impactos directos provocados por la depositación de estos gases, lluvia ácida, lo que conlleva directamente a la acidificación de suelos, océanos, daño de materiales, y la metilación de mercurio, de las cuales se mencionarán más adelante (40 CFR Part 50: Secondary National Ambient Air Quality Standards for Oxides of Nitrogen and Sulfur, 2012).

La acidificación en los sistemas acuáticos y terrestres es debido a que en la atmósfera ocurren reacciones químicas en donde estos componentes, SO_x y NO_x , interactúan cambiando de fase

constantemente (líquido, sólido y gaseoso), resultando así, componentes ácidos, tales como el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el ácido nítrico (HNO_3) (BRYDGES & WILSON, 1990). Los ácidos son removidos de la atmósfera a través de la depositación de partículas, están pueden ser por medio de la nieve, de las lluvias o de las propias nubes. Luego de la depositación si estas no son retenidas por la biota o los suelos, a través de la lixiviación de suelos estás pueden llegar en forma de SO_4 a las superficies de las aguas, contaminando así los ecosistemas acuáticos (40 CFR Part 50: Secondary National Ambient Air Quality Standards for Oxides of Nitrogen and Sulfur, 2012).

En un medio ácido los componentes biogeoquímicos terrestres y acuáticos son alterados directamente, y estos efectos se pueden cuantificar mediante bioindicadores, para los ecosistemas terrestres se encuentran presente la base de saturación del suelo, concentración de aluminio inorgánico en el agua del suelo, y la relación carbono nitrógeno del suelo. Para los ecosistemas acuáticos se encuentran los sulfatos, nitratos, cationes base, capacidad neutralizante de ácido, aluminio inorgánico en agua superficial, y pH (ISA, 2008).

El bioindicador ANC, es el indicador más utilizado para una respuesta biológica y de salud de comunidades acuáticas, sin embargo, es relevante para ambos ecosistemas, ya que el indicador muestra cómo responden ante la acidez dichos ecosistemas, y así nos enseña la capacidad de la resistencia a la acidificación. El indicador ANC, muestra una relación directa con la diversidad y abundancia de peces como también Fitozooplancton, y este puede categorizarse en cuatro niveles. Se encuentra el $\text{ANC} > 100 \mu\text{eq/L}$, en el cual no se percibe un daño a la biota, es decir, no se observa una disminución de especies, luego $50 < \text{ANC} < 100 \mu\text{eq/L}$ en donde la aptitud de las especies comienza a bajar, y por último está el $\text{ANC} < 50 \mu\text{eq/L}$, en donde dicho valor indica efectos negativos en la biota acuática, una reducción de diversidad de especies de peces y otros organismos, una declinación en la salud de estos, afectando la reproductividad y la aptitud física. Un valor $\text{ANC} < 0 \mu\text{eq/L}$ está asociada a la pérdida total de la especie de peces en cuestión. Entre mayor sea el ANC, menor es la pérdida de especies y microorganismos, como también de sus aptitudes físicas (Secondary National Ambient Air Standards for Oxides of Nitrogen and Sulfur, 2012).

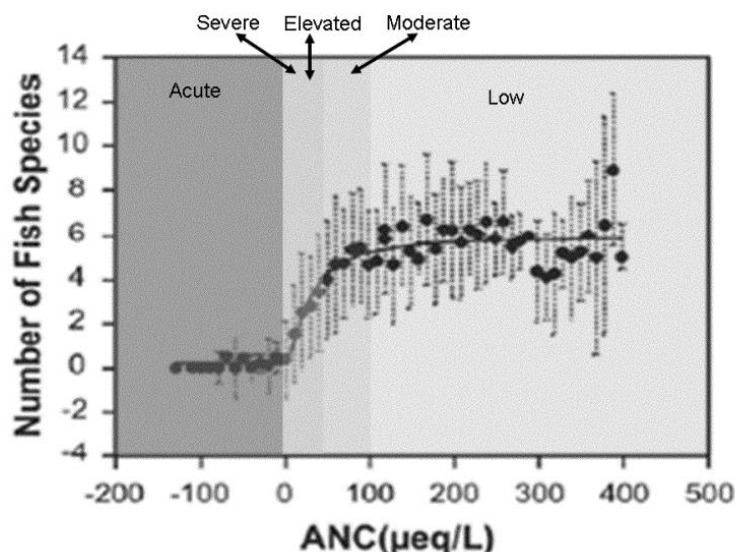


Figura 3-5 Relación entre el indicador ANC y el número de especies.

Fuente: Normas nacionales secundarias de calidad del aire ambiente para óxidos de nitrógeno y azufre (2012a).

Tabla 3-7 Relación entre el indicador ANC y el número de especies.

Indicador ANC	Valor ANC (ueq/L)	Efecto en la Biota Acuática
Nivel 1	100 < X	Baja
Nivel 2	50 < X < 1000	Moderada
Nivel 3	< 50	Elevada
Nivel 4	< 0	Severo

Fuente: (40 CFR Part 50: Secondary National Ambient Air Quality Standards for Oxides of Nitrogen and Sulfur, 2012)

Si el medio se vuelve más ácido, en las aguas superficiales, donde existen ecosistemas acuáticos, ocurre una mayor lixiviación de aluminio del suelo, en otras palabras, ocurre una mayor solubilización de este, abarcando un mayor rango en las aguas. La solubilidad de aluminio en las aguas es letal para los peces, Fito zooplancton, como también para otros organismos acuáticos, vitales para mantener el equilibrio en ambientes marinos (Secondary National Ambient Air Standards for Oxides of Nitrogen and Sulfur, 2012).

Si las condiciones de las aguas son alcalinas el aluminio se presenta como especies aniónicas, mientras que en condiciones ácidas se presenta de manera catiónica, siendo así más reactivo químicamente. El aluminio trae efectos en plantas macro y microfitos, este se bioacumula y trae consigo efectos tóxicos en el meristema de las raíces de estas, tales como la inhibición de la elongación radicular e inducción de síntesis de callo radicular que aparece después de una exposición de corto término. Estos efectos repercuten directamente en los peces que consumen estas plantas, A valores de pH entre 4,7 y 5,5 los peces mueren primariamente por la presencia de Al que por la concentración de (H⁺) (RONDON.I et al., 2007).

En los suelos de la Orinoquia Colombiana se caracterizan por un alto contenido de Al, como también una baja dureza en el agua (concentraciones reducidas de minerales disueltos, como calcio y magnesio), lo que facilita los efectos del Al en los peces, alterando su sistema respiratorio, mecanismos de adaptación, tolerancia en especies nativas. El posible efecto sobre especies introducidas para acuicultura, desarrollo de enfermedades neurodegenerativas en humanos y toxicología acuática no ha sido dilucidada y constituye un campo de investigación (RONDON.I et al., 2007).

3.4.2 Síntesis de la nueva evidencia en vegetación por exposición a SO₂

A partir de los antecedentes recopilados en el apartado anterior, se observa que la evidencia más reciente reafirma la conclusión acerca de la relación causal entre la exposición al SO₂ y los daños a la vegetación, sin observarse modificaciones en los niveles de SO₂ que generan dichos efectos. En particular, la nueva evidencia destaca entre los efectos crónicos la disminución en el crecimiento, alteración de la fotosíntesis y el rendimiento de las plantas, a menudo sin manifestarse daños foliares visibles. En contraste, los daños foliares se asocian principalmente a efectos agudos, ocurriendo generalmente entre las primeras horas de exposición. Hasta el momento, no se ha encontrado evidencia clara de tales daños a concentraciones promedio inferiores a 0,5 ppm (1.310 µg/m³) durante un período de 3 horas. Además, la nueva evidencia aporta el conocimiento de que el SO₂ tiene la capacidad de afectar la función de la membrana y la osmolalidad celular. A concentraciones más elevadas, se evidencia una reducción de la actividad metabólica y la pérdida de integridad de las membranas celulares. Por otro lado, respecto a la exposición crónica, la evidencia muestra aparición de efectos crónicos en la vegetación y lesiones visibles de las partes aéreas de la planta por acción directa a exposiciones de 30 g/m³ como media anual.

Asimismo, la investigación ha revelado que, en condiciones de oscuridad o sequía, la resistencia a la absorción de gases por parte de las plantas es considerablemente alta, lo que las vuelve menos susceptibles a sufrir daños. En contraposición, los musgos y líquenes, desprovistos de una barrera cuticular protectora contra los contaminantes gaseosos, son más sensibles a estos, destacándose los líquenes fruticosos como la especie más susceptible. En particular, se ha evidenciado que los líquenes experimentan reducciones en sus procesos de fotosíntesis y respiración, deterioro en el componente algal, liberación de electrolitos, inhibición de la fijación de nitrógeno, disminución en la absorción de K⁺ y alteraciones estructurales. No obstante, se ha observado que estos efectos se atenúan cuando los líquenes se adhieren a un sustrato con un pH elevado o una capacidad amortiguadora superior, como corteza o roca.

En la última revisión de antecedentes que fundamentó la norma secundaria actual de SO₂ en el país, no se mencionaron efectos a la fauna. La evidencia científica que hay respecto a esto es bien limitada, pero se ha evidenciado mayormente efectos en los ecosistemas acuáticos a partir de la acidificación ocasionada por la deposición del SO₂ en el ambiente. La acidificación del mar ocasiona una disminución en la capacidad de neutralización ácida de las especies marinas,

afectando su reproducción y aptitudes físicas, lo que se evidencia en una disminución de la diversidad de especies y otros organismos marinos. Además, ocurre una mayor solubilización de aluminio del suelo, generando efectos en los peces como alteración de su sistema respiratorio y mecanismos de adaptación.

3.4.3 Sitios prioritarios y áreas protegidas en Chile

La Ley Nº 21.600 del Ministerio del Medio Ambiente, publicada en septiembre del 2023, crea el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas y el Sistema Nacional de Áreas Protegidas. Esta ley tiene como objeto la conservación de la diversidad biológica y la protección del patrimonio natural del país, a través de la preservación, restauración y uso sustentable de genes, especies y ecosistemas. Dicha Ley define a los Sitios Prioritarios como áreas de valor ecológico, terrestre o acuática, marina o continental identificado por su aporte a la representatividad ecosistémica, su singularidad ecológica o por constituir hábitats de especies amenazadas, priorizada para la conservación de su biodiversidad por el Servicio. Además, define como área protegida al espacio geográfico específico y delimitado, reconocido mediante decreto supremo del MMA, con la finalidad de asegurar, en el presente y a largo plazo, la preservación y conservación de la biodiversidad del país, así como la protección del patrimonio natural, cultural y del valor paisajístico contenidos en dicho espacio (Ley 21600 Crea El Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas y El Sistema Nacional de Áreas Protegidas, 2023).

La Ley Nº 21.600 está constituida por el conjunto de áreas protegidas, del Estado y privadas, que comprenden las siguientes categorías de protección:

- a) Reserva de Región Virgen: área en que existen condiciones primitivas naturales, no perturbada significativamente por actividades humanas, reservada para preservar la biodiversidad, así como los rasgos geológicos o geomorfológicos y la integridad ecológica.
- b) Parque Nacional: área generalmente amplia en la que existen diversos ambientes únicos o representativos del patrimonio natural del país, no alterados significativamente por la acción humana.
- c) Monumento Natural: área generalmente reducida en extensión, caracterizada por la presencia de componentes naturales específicos, relevantes para la biodiversidad, o formaciones naturales de valor excepcional.
- d) Reserva Nacional: área en la que existen comunidades biológicas, especies nativas, hábitats y sitios de reproducción relevantes para la protección de determinadas especies y ecosistemas en condiciones predominantemente naturales que son relevantes para la educación, ciencia y turismo.
- e) Área de Conservación de Múltiples Usos: área caracterizada por una interacción tradicional entre los seres humanos y la naturaleza, relevante para la conservación de la biodiversidad.
- f) Área de Conservación de Pueblos Indígenas: área ubicada en tierras indígenas o en espacios costeros marinos de pueblos originarios, en los que existen especies nativas, hábitats y ecosistemas naturales relevantes para la conservación de la biodiversidad local, regional o nacional.

En los siguientes apartados se muestran sitios prioritarios y áreas protegidas de ciertas comunas consideradas de interés por albergar industrias relevantes en las emisiones de SO₂, como son las termoeléctricas o fundiciones, además de aquellas comunas que se establecieron como “zona de interés” por SO₂ a partir del análisis realizado en la Sección 5.3.5. Además, se incluye una breve descripción para las zonas que se consideraron más destacadas.

3.4.3.1 Región de Antofagasta

Según el SIMBIO (Sistema de Información y Monitoreo de Biodiversidad), la Región de Antofagasta cuenta actualmente con 15 sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad (SIMBIO, n.d.-b) y 12 áreas protegidas (SIMBIO, n.d.-a). En esta región, las comunas de Tocopilla, Antofagasta y Mejillones son de interés respecto al SO₂. Tocopilla es de interés debido al análisis de concentraciones que se realiza en la Sección 5.3.5, Antofagasta es de interés debido a que en ella se encuentra la Fundición Altonorte, y la comuna de Mejillones resulta de interés debido a que en ella se encuentran la Central Térmica Andina y Central Termoeléctrica Cochrane⁴.

En la Tabla 3-8 se muestran los sitios prioritarios y áreas protegidas para las comunas de interés mencionadas en el párrafo anterior. En el Anexo 1 se presenta una tabla similar que comprende todas las comunas de la región de Antofagasta, no solo las de interés, además de un mapa que incluye su localización geográfica y las estaciones de monitoreo SINCA.

⁴No se mencionan otras termoeléctricas de la región como la Central Termoeléctrica Nueva Tocopilla, Central Térmica Tocopilla, Central Térmica Mejillones y Central Termoeléctrica Angamos, principalmente debido a que tienen comprometido su cierre entre 2023 y 2026.

Tabla 3-8 Sitios prioritarios y áreas protegidas en comunas de interés para la Región de Antofagasta.

Clasificación	Designación	Nombre SP/AP	Comuna de interés	Monitores de SO ₂
Sitio Prioritario (SP)	Ley 19.300 art. 11, letra d	Desembocadura Río Loa	Tocopilla	Super Site, Gobernación, Sur ⁽¹⁾ , Escuela Gabriela Mistral ⁽¹⁾ , Escuela E-12 ⁽¹⁾ , Centro ⁽¹⁾ , Escuela E-10 ⁽²⁾
		Península de Mejillones	Antofagasta, Mejillones	Antofagasta, Sur ⁽¹⁾ , Ferrocarriles ⁽¹⁾
		Salar de Aguas Calientes IV	Antofagasta	Antofagasta, Sur ⁽¹⁾
	Estrategia Regional de Biodiversidad	Salar de Punta Negra	Antofagasta	Antofagasta, Sur ⁽¹⁾
		Costa de Paposo 2	Antofagasta	Antofagasta, Sur ⁽¹⁾
Área Protegida (AP)	Monumento Natural	La Portada	Antofagasta	Antofagasta, Sur ⁽¹⁾
		Paposo Norte	Antofagasta	Antofagasta, Sur ⁽¹⁾
	Parque Nacional	Llullaillaco	Antofagasta	Antofagasta, Sur ⁽¹⁾
		Morro Moreno	Antofagasta	Antofagasta, Sur ⁽¹⁾
	Reserva Nacional	La Chimba	Antofagasta	Antofagasta, Sur ⁽¹⁾
	Santuario de la Naturaleza	Aguada La Chimba	Antofagasta	Antofagasta, Sur ⁽¹⁾
		Desembocadura Río Loa	Tocopilla	Antofagasta, Sur ⁽¹⁾
		Itata - Gualaguala	Mejillones	Ferrocarriles ⁽¹⁾

(1): La última medición registrada en la página web del SINCA es previa al año 2010.

(2): La última medición registrada en la página web del SINCA corresponde al año 2019.

Fuente: (SIMBIO, n.d.-a, n.d.-b)

De los sitios prioritarios y áreas protegidas mostrados anteriormente, destaca la Desembocadura del Río Loa por ser el único río cuyas aguas caen al mar en el amplio desierto del norte grande chileno. Tiene una superficie estimada de 10.862 hectáreas y su importancia radica en que constituye el único ambiente estuarino en la región, con elementos de desierto interior y costa con presencia de cactáceas endémicas, y corresponde a un lugar de reproducción tanto de especies acuáticas como avifauna (SIMBIO, n.d.-a). Se destaca entre los ecosistemas presentes el humedal formado por el Río Loa, que forma parte de las rutas de migración y desplazamiento de aves provenientes del hemisferio norte y del extremo sur de Sudamérica. Por otro lado, el Santuario de la Naturaleza Desembocadura Río Loa abarca una superficie aproximada de 708 hectáreas y posee una gran variedad de especies vegetales, que presentan altos índices de concentración de endemismo y de especies en alguna categoría de conservación. Entre las especies en categorías de conservación se encuentran el *Prosopis flexuosa*, el *Prosopis chilensis*, el Copao de Iquique (*Eulychnia iquiquensis*) y el Camarón de río (*Cryphiops caementarius*) clasificados como "Vulnerable"; además del *Copiapúa Solari* y el *Prosopis tamarugo*, ambos clasificados como "En Peligro" (Decreto 7 Declara Santuario De La Naturaleza Desembocadura Río Loa, 2024).

La Península de Mejillones es de importancia en las comunas de Mejillones y Antofagasta. Cuenta con una superficie aproximada de 44.230 ha y representa un ecosistema importante tanto para especies marinas, por ser una zona de concentración de surgencias marinas, como para la flora y fauna terrestre. El borde costero constituye un sitio de alta importancia para la reproducción,

descanso y alimentación de numerosas especies de aves y mamíferos marinos, tales como el Chungungo (*Lontra felina*) considerada especie “En Peligro”, el Lobo fino austral (*Arctocephalus australis*) y el Gaviotín monja (*Larosterna inca*), ambos considerados especies “Casi Amenazadas”, además del Pingüino de Humboldt (*Spheniscus Humboldt*) con clasificación de especie “Vulnerable”, entre otras especies (SIMBIO, n.d.-f). Resulta de gran importancia como área de cría para las aves de la corriente de Humboldt, en especial, como área de alimentación de *Larus modestus*, especie amenazada según el Reglamento de la Ley de Caza (SAG, 1998).

Por otro lado, en Mejillones también destaca el Santuario de la Naturaleza Itata – Gualaguala, el cual abarca una superficie aproximada de 903 hectáreas y resulta una de las principales áreas de nidificación de la región y del país del gaviotín chico (*Sternula lorata*), especie clasificada “En Peligro”. El área destaca por su biodiversidad de aves, habiéndose registrado aproximadamente 20 especies, de las cuales el Águila Pescadora y la Gaviota Garuma presentan categoría “Vulnerable”. Además, en el santuario se encuentran reptiles endémicos del norte del país como el corredor de Atacama (*Microlophus atacamensis*) y el Dragón de Stolzmann (*Liolaemus stolzmanni*), ambos con categoría de conservación “Vulnerable” (Decreto 43 | Declara Santuario De La Naturaleza Itata - Gualaguala, 2022).

En Antofagasta destaca el Santuario de la Naturaleza Aguada La Chimba, identificado como el primer humedal urbano de la comuna. Comprende un área aproximada de 2,2 hectáreas y representa un hábitat ideal para especies del desierto costero, como el reptil corredor de Atacama (*Microlophus atacamensis*), la araña tigre plateada (*Argiope argentata*), el caracol de la Chimba (*Heleobia chimbaensis*), entre otras. (MMA, 2021). El caracol de la Chimba presenta la categoría de conservación “Vulnerable” y corresponde a una de las especies emblemáticas del humedal, ya que carece de estudios poblacionales y de ecología, y es altamente susceptible a amenazas debido a que su distribución geográfica en el humedal se reduce a solo pequeñas áreas de unos pocos metros cuadrados (Decreto 14 | Declara Santuario De La Naturaleza Aguada La Chimba, 2021). Además, en el humedal se pueden encontrar especies visitantes como aves migratorias (*Leucophaeus pipixcan* y *Thalasseus elegans*) que llegan desde el norte (CMN, n.d.).

Por último, el Parque Nacional Llullaillaco destaca por la protección de especies de fauna como la chinchilla andina, puma, vicuña, el guanaco, halcón peregrino, el suri o ñandú del norte y la perdiz de la puna, entre otras especies emblemáticas clasificadas en peligro de extinción o vulnerable. Posee una superficie de 268.670 hectáreas y da cobijo a 91 especies de flora y 44 especies de fauna silvestre. Fue declarado área silvestre protegida del Estado mediante Decreto Supremo 856 del 9 de agosto de 1995 (CONAF, n.d.-a).

3.4.3.2 Región de Atacama

La Región de Atacama cuenta con 44 sitios prioritarios (SIMBIO, n.d.-b) para la conservación de la biodiversidad y 12 áreas protegidas (SIMBIO, n.d.-a). En esta región, las comunas de Copiapó y

Tierra Amarilla son de interés por SO₂ debido a lo mencionado en la Sección 5.3.5⁵. Por otro lado, las comunas de Huasco y Diego de Almagro son de interés por SO₂ debido a la presencia de fuentes emisoras relevantes para este contaminante, como es la central termoeléctrica Guacolda en Huasco y la División Salvador de CODELCO en Diego de Almagro.

En la Tabla 3-9 se muestran los sitios prioritarios y áreas protegidas para las comunas de interés mencionadas en el párrafo anterior. En el Anexo 1 se presenta una tabla similar que comprende todas las comunas de la región de Atacama, además de un mapa que incluye su localización geográfica y las estaciones de monitoreo SINCA.

Tabla 3-9 Sitios prioritarios y áreas protegidas en comunas de interés para la Región de Atacama.

Clasificación	Designación	Nombre SP/AP	Comuna de interés	Monitores de SO ₂
Sitio Prioritario (SP)	Ley 19.300 art. 11, letra d	Estuario Río Huasco y Carrizal	Huasco	EME F, EME M, EME ME ⁽²⁾ , Huasco II ⁽³⁾ , SM1, SM2, SM3, SM4, SM5
		Salar de Pedernales y sus alrededores	Diego de Almagro	CAP ⁽¹⁾ , Doña Inés ⁽²⁾
		Zona Desierto Florido	Copiapó, Tierra Amarilla, Huasco	Copiapó SIVICA, Copiapó, Los Volcanes, Paipote, San Fernando, Tierra Amarilla*, Pabellón ⁽²⁾ , EME F, EME M, EME ME ⁽²⁾ , Huasco II ⁽³⁾ , SM1, SM2, SM3, SM4, SM5
	Estrategia Regional de Biodiversidad	Bahía Salada	Copiapó	Copiapó SIVICA, Copiapó, Los Volcanes, Paipote, San Fernando
		Corredor Biológico Pantanillo	Copiapó, Tierra Amarilla	Copiapó SIVICA, Copiapó, Los Volcanes, Paipote, San Fernando, Tierra Amarilla*, Pabellón ⁽²⁾
		El Jardín	Diego de Almagro	CAP ⁽¹⁾ , Doña Inés ⁽²⁾
		El Pingo	Diego de Almagro	CAP ⁽¹⁾ , Doña Inés ⁽²⁾
		Finca Chañaral	Diego de Almagro	CAP ⁽¹⁾ , Doña Inés ⁽²⁾
		Llanos de Challe	Copiapó, Huasco	Copiapó SIVICA, Copiapó, Los Volcanes, Paipote, San Fernando, EME F, EME M, EME ME ⁽²⁾ , Huasco II ⁽³⁾ , SM1, SM2, SM3, SM4, SM5
		Los Juanitos	Diego de Almagro	CAP ⁽¹⁾ , Doña Inés ⁽²⁾
		Monte Amargo	Copiapó	Copiapó SIVICA, Copiapó, Los Volcanes, Paipote, San Fernando
		Nevado Tres Cruces	Copiapó, Tierra Amarilla	Copiapó SIVICA, Copiapó, Los Volcanes, Paipote, San Fernando, Tierra Amarilla*, Pabellón ⁽²⁾
		Piedra Colgada	Copiapó	Copiapó SIVICA, Copiapó, Los Volcanes, Paipote, San Fernando
		Quebrada del Morel	Copiapó	Copiapó SIVICA, Copiapó, Los Volcanes, Paipote, San Fernando
		Quebrada Doña Inés	Diego de Almagro	CAP ⁽¹⁾ , Doña Inés ⁽²⁾

⁵ Copiapó también puede ser de interés por la Fundición HVL, aunque actualmente se encuentra con suspensión temporal de las operaciones.

		Quebrada San Andrés	Copiapó	Copiapó SIVICA, Copiapó, Los Volcanes, Paipote, San Fernando
		Quebrada de Serna	Tierra Amarilla	Tierra Amarilla*, Pabellón ⁽²⁾
		Río Copiapó	Copiapó, Tierra Amarilla	Copiapó SIVICA, Copiapó, Los Volcanes, Paipote, San Fernando, Tierra Amarilla*, Pabellón ⁽²⁾
		Río Cachitos	Tierra Amarilla	Tierra Amarilla*, Pabellón ⁽²⁾
		Río Figueroa	Tierra Amarilla	Tierra Amarilla*, Pabellón ⁽²⁾
		Río Huasco	Huasco	EME F, EME M, EME ME ⁽²⁾ , Huasco II ⁽³⁾ , SM1, SM2, SM3, SM4, SM5
		Río Manflas	Tierra Amarilla	Tierra Amarilla*, Pabellón ⁽²⁾
		Río Montosa	Tierra Amarilla	Tierra Amarilla*, Pabellón ⁽²⁾
		Río Salado	Diego de Almagro	CAP ⁽¹⁾ , Doña Inés ⁽²⁾
		RNP Huascoaltinos	Tierra Amarilla	Tierra Amarilla*, Pabellón ⁽²⁾
		Sauce Pérez	Huasco	EME F, EME M, EME ME ⁽²⁾ , Huasco II ⁽³⁾ , SM1, SM2, SM3, SM4, SM5
Área Protegida (AP)	Parque Nacional	Llanos del Challe	Huasco	EME F, EME M, EME ME ⁽²⁾ , Huasco II ⁽³⁾ , SM1, SM2, SM3, SM4, SM5
		Nevado de Tres Cruces	Copiapó, Tierra Amarilla	Copiapó SIVICA, Copiapó, Los Volcanes, Paipote, San Fernando, Tierra Amarilla*, Pabellón ⁽²⁾
		Desierto Florido	Copiapó, Tierra Amarilla	Copiapó SIVICA, Copiapó, Los Volcanes, Paipote, San Fernando, Tierra Amarilla*, Pabellón ⁽²⁾
	Santuario de la Naturaleza	Humedal Costero Carrizal Bajo	Huasco	EME F, EME M, EME ME ⁽²⁾ , Huasco II ⁽³⁾ , SM1, SM2, SM3, SM4, SM5
		Humedal Costero de Totoral	Copiapó	Copiapó SIVICA, Copiapó, Los Volcanes, Paipote, San Fernando

(1): La última medición registrada en la página web del SINCA es previa al año 2010, sin embargo, se reportan mediciones en la página web del SINCA.

(2): La última medición registrada en la página web del SINCA es previa al año 2010.

(3): La última medición registrada en la página web del SINCA corresponde al año 2021.

* Nota: Solamente la estación de monitoreo Tierra Amarilla cuenta con Representatividad de Recursos Naturales.

Fuente: (SIMBIO, n.d.-a, n.d.-b)

De los sitios prioritarios y áreas protegidas mostrados anteriormente, destaca la Zona Desierto Florido, ubicada aproximadamente a 30 km al sur de Copiapó y abarca una superficie de 677.905 hectáreas. La característica principal de esta zona se asocia a la manifestación florística que ocurre cuando las lluvias superan un umbral, producto del fenómeno asociado al ENOS (El Niño Oscilación del Sur). Presenta una gran importancia para la región, dado su reconocido valor patrimonial y biológico, alcanzando más de 200 especies de flora y fauna, en su mayoría endémicas. Además, se identifica como una zona de alto valor genético de interés mundial (SIMBIO, n.d.-d). Dentro se encuentra el Parque Nacional Desierto Florido, un área protegida de 57.104 ha que alberga especies de flora y fauna en categoría de conservación amenazada, tales como: *Eragrostis pycnantha* y *Pintoa chilensis*, ambas calificadas “En peligro”, y *Pyrrhocactus confinis*, clasificada como “Vulnerable”, todas endémicas; y *Lama guanicoe*, en categoría “Vulnerable”. Asimismo, se han registrado en el área cerca de 40 especies de aves, 17 especies de mamíferos y 8 especies de reptiles (SIMBIO, n.d.-c).

Destaca también el Parque Nacional Llanos de Challe, que cuenta con una superficie de 45.708 hectáreas y presenta flora constituida por más de 220 especies, de las cuales 206 son nativas de Chile y 14 son endémicas que solo se pueden encontrar en la Región de Atacama. El parque es refugio de múltiples especies con problemas de conservación. Actualmente alberga a 2 especies en peligro de extinción: la garra de león (*Bomarea ovallei*) y el cactus napina, además de otras 14 especies en categoría de vulnerables. Uno de los principales objetos de conservación del parque es el guanaco (*Lama guanicoe*), que posee categoría “Vulnerable” y presenta en este lugar una de las poblaciones más grandes dentro de las áreas silvestres protegidas del país (CONAF, n.d.-a).

Por otro lado, destaca el sitio prioritario Nevado Tres Cruces, que cuenta con un área de 119.929 hectáreas. Dentro se encuentra el área protegida Parque Nacional Nevado de Tres Cruces, que abarca 59.082 ha y se caracteriza por grandes salares andinos, presencia de vegas y bofedales con gramíneas cespitosas, donde destacan: *Deschampsia cespitosa*, *Deyeuxia velutina*, *Scirpus* sp. y *Triglochin palustris* (CONAF, n.d.-b). Respecto la fauna destacan tres especies de flamencos chilenos: chileno o austral (*Phoenicoparrus chilensis*), andino o parina grande (*Phoenicoparrus andinus*) y de James o parina chica (*Phoenicoparrus jamesi*); el piuquén (*Chloephaga melanoptera*), el pato juarjual (*Lophonetta specularioides*), siendo las aves las que presentan mayor cantidad de individuos. Entre los mamíferos se encuentran la vicuña (*Vicugna vicugna*), el guanaco (*Lama guanicoe*), zorros culpeos (*Lycalopex culpaeus*), chululos (*Spalacopus cyanus*) y vizcachas (*Lagidium viscacia*), los cuales son encontrados en quebradas protegidas y provistas de vegetación (CONAF, n.d.-b).

En la comuna Diego de Almagro es de gran relevancia el Salar de Pedernales, ya que corresponde al salar más grande de la región y su importancia ecológica radica en que forma parte de la red de salares altoandinos que albergan aves migratorias en sus periodos de alimentación y acoge otras aves en su proceso de nidificación, como los flamencos y las taguas que cuentan con problemas de conservación. En esta área se pueden encontrar diversas especies de fauna y flora local, especialmente aves como flamencos andinos (que nidifican en las lagunas) y guallatas o piuquenes (*Chloephaga melanoptera*), así como una gran concentración de vicuñas (*Vicugna vicugna*) y guanacos (*Lama guanicoe*). Además, el Salar presenta un alto endemismo de reptiles e insectos de la estepa desértica, como también endemismos de flora (SIMBIO, n.d.-g).

3.4.3.3 Región de Valparaíso

La Región de Valparaíso cuenta con 60 sitios prioritarios (SIMBIO, n.d.-b) y 41 áreas protegidas (SIMBIO, n.d.-a). En esta región, las comunas de Quintero, Puchuncaví y Catemu son de interés por SO₂ debido al análisis de concentraciones que se realiza en la Sección 5.3.5. Actualmente se localizan varias centrales termoeléctricas en Puchuncaví (Campiche, Nueva Ventanas, Ventanas Unidades 1 y 2), sin embargo, tienen comprometido su cierre entre 2023 y 2025. Por otro lado, en Catemu se encuentra la Fundición Chagres.

En la Tabla 3-10 se muestran los sitios prioritarios y áreas protegidas para las comunas de interés mencionadas en el párrafo anterior. En el Anexo 1 se presenta una tabla similar que comprende todas las comunas de la región de Valparaíso, además de un mapa que incluye su localización geográfica y las estaciones de monitoreo SINCA.

Tabla 3-10 Sitios prioritarios y áreas protegidas en comunas de interés para la Región de Valparaíso.

Clasificación	Designación	Nombre SP/AP	Comuna de interés	Monitores de SO ₂ *
Sitio Prioritario (SP)	Ley 19.300 art. 11, letra d	Cordillera El Melón	Catemu	Catemu, Romeral, Santa Margarita
	Estrategia Regional de Biodiversidad	Acantilados Quebrada Quirilluca	Puchuncaví	Puchuncaví, La Greda, Ventanas, Los Maitenes, Campiche ⁽¹⁾
		Cerro Tabaco	Catemu	Catemu, Romeral, Santa Margarita
		Cuesta el Melón - Altos de Pucalán - La Canela	Puchuncaví	Puchuncaví, La Greda, Ventanas, Los Maitenes, Campiche ⁽¹⁾
		Estero Catapilco	Puchuncaví	Puchuncaví, La Greda, Ventanas, Los Maitenes, Campiche ⁽¹⁾
		Estero Mantagua	Quintero	Centro Quintero, Loncura, Quintero, Sur, Valle Alegre
		Humedal de Mantagua y Dunas de Ritoque	Quintero	Centro Quintero, Loncura, Quintero, Sur, Valle Alegre
		Humedal Río Aconcagua	Quintero	Centro Quintero, Loncura, Quintero, Sur, Valle Alegre
		Río Aconcagua	Quintero, Catemu	Centro Quintero, Loncura, Quintero, Sur, Valle Alegre, Catemu, Romeral, Santa Margarita
		Zona Media Superior Aconcagua	Catemu	Catemu, Romeral, Santa Margarita
Área Protegida (AP)	Santuario de la Naturaleza	Las Petras de Quintero y su Entorno	Quintero	Centro Quintero, Loncura, Quintero, Sur, Valle Alegre
		Serranía el Ciprés	Catemu	Catemu, Romeral, Santa Margarita

(1): La última medición registrada en la página web del SINCA corresponde al año 2017.

* Nota: Solamente las estaciones de monitoreo Quintero, La Greda, Puchuncaví, Los Maitenes, Valle Alegre, Sur, Centro Quintero, Loncura, Concón, Colmo, Junta Vecinos y Las Gaviotas cuentan con Representatividad de Recursos Naturales.

Fuente: (SIMBIO, n.d.-a, n.d.-b)

De los sitios prioritarios y áreas protegidas mostrados anteriormente, se destaca en Quintero el Humedal de Mantagua que se compone de un sistema integrado por el tramo final del estero de Mantagua, originando un estuario que los lugareños denominan “laguna” y que se conecta con el mar solo durante las crecidas del estero, y un sistema dunario, conocido como Dunas de Ritoque. El humedal de Mantagua y dunas asociadas cubren una superficie aproximada de 269 hectáreas. El humedal es parte del Corredor Biológico del Litoral Costero de Chile e integra el Corredor Biológico de toda América, ruta migratoria de las aves del hemisferio norte que visitan Chile en primavera para pasar el invierno boreal. Además, en 2019 fue reconocido por la Red Latinoamericana y del Caribe para la Conservación de los Murciélagos como un “Área de

Importancia para la Conservación de Murciélagos”. En el humedal se han registrado 18 especies en categoría de conservación, como el Cuervo de Pantano (*Plegadis chihi*), el Cisne coscoroba (*Coscoroba coscoroba*) y el Playero ártico (*Calidris canutus*), todas clasificadas como “En Peligro”. Por otro lado, en la categoría “Vulnerable” se encuentran especies como el Cisne de cuello negro (*Cygnus melancoryphus*), el Gaviotín monja (*Larosterna inca*), el Gato güiña (*Leopardus guigna*), el Ratón topo del matorral (*Chelemys megalonyx*) y el Degú costino (*Octodon lunatus*) (GEF Humedales Costeros del Centro Sur de Chile, n.d.).

Por otro lado, en Catemu destaca la Cordillera El Melón que tiene una longitud de aproximadamente 47 km y representa el “Bosque Esclerófilo Costero” con una gran diversidad botánica por coexistencia de bosque esclerófilo y serranías precordilleranas. Presenta una gran cantidad de especies endémicas que se encuentran en estado crítico de conservación, amenazadas en distintos grados. Entre ellas, se destaca el Belloto del norte (*Beilschmiedia miersii*) por ser una especie con categoría “Vulnerable”, siendo la Cordillera El Melón una de las mayores concentraciones para esta especie, con alrededor de 20.000 individuos. Respecto a la fauna, presenta 22 especies endémicas con 14 amenazadas. Esta cordillera constituye un corredor biológico de fauna para distintas especies, por lo cual ha sido catalogado como sitio importante por CONAF para conservación de la diversidad biológica (CONAMA & PNUD, 2005; SIMBIO, n.d.-d).

Dentro de Puchuncaví, el sector de la Cuesta el Melón - Altos de Pucalán - La Canela destaca por su alto valor ecológico, siendo parte de la Estrategia Regional de Biodiversidad. Al igual que la Cordillera El Melón, presenta Bosquetes de belloto del norte (*Beilschmiedia miersii*), además de especies de flora endémica y especies de fauna con problemas de conservación. Es considerado un sitio importante para la conservación de la biodiversidad, ya que forma un corredor ecológico importante que conecta diferentes ecosistemas, permitiendo el flujo de genes y la migración de especies (Municipalidad de Puchuncaví, 2018).

3.4.3.4 Región de O’Higgins

La Región de O’Higgins cuenta con 31 sitios prioritarios (SIMBIO, n.d.-b) para la conservación de la biodiversidad y 9 áreas protegidas (SIMBIO, n.d.-a). La comuna de Machalí es de interés por SO₂ debido a lo mencionado en la Sección 5.3.5. En ella se encuentra la División El Teniente de CODELCO, que corresponde al yacimiento de cobre subterráneo más grande del planeta, alcanzando más de 4.500 kilómetros de galerías subterráneas (CODELCO, n.d.) y que en la actualidad, es la principal fuente emisora de SO₂ a nivel nacional.

En la Tabla 3-11 se muestran los sitios prioritarios y áreas protegidas para la comuna de interés mencionada en el párrafo anterior. En el Anexo 1 se presenta una tabla similar que comprende todas las comunas de la región de O’Higgins, además de un mapa que incluye su localización geográfica y las estaciones de monitoreo SINCA.

Tabla 3-11 Sitios prioritarios y áreas protegidas en comunas de interés para la Región de O'Higgins.

Clasificación	Designación	Nombre SP/AP	Comuna de interés	Monitores de SO ₂
Sitio Prioritario (SP)	Ley 19.300 art. 11, letra d	Altos del Río Maipo	Machalí	Sewell ⁽¹⁾ , Cipreses, Cauquenes, Coya Población
	Estrategia Regional de Biodiversidad	Precordillera Andina Norte		
		Río Cipreses		
Área Protegida (AP)	Reserva Nacional	Río Cortaderal		
		Río Los Cipreses		
	Santuario de la Naturaleza	Cruz de Piedra		

(1): La última medición registrada en la página web del SINCA corresponde al año 2005.

Fuente: (SIMBIO, n.d.-a, n.d.-b)

De los sitios prioritarios y áreas protegidas mostrados anteriormente, destaca la Reserva Nacional Río Los Cipreses que cuenta con una superficie de 38.582 hectáreas y es hábitat de varias especies de fauna protegida, como el guanaco (*Lama guanicoe*) y el loro trichahue (*Cyanoliseus patagonus*) consideras especies en categoría Vulnerable. También hay especies en categoría “Casi Amenazadas” como el puma (*Puma concolor*), el cóndor (*Vultur gryphus*), el pato cortacorrientes (*Merganetta armata*), entre otros. En cuanto a la flora es posible destacar el peumo (*Cryptocarya alba*) y una asociación de quillay-litre (*Quillaja saponaria-Lithraea caustica*). Sin embargo, la Reserva es importante por la presencia de bosques de ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis*), una especie en categoría Vulnerable, y por bosques de olivillo (*Kageneckia angustifolia*), que son hábitat de especies como el zorro culpeo (*Lycalopex culpaeus*) y zorro chilla (*Lycalopex griseus*) (CONAF, n.d.-c).

La Precordillera Andina Norte es un gran sitio a nivel regional con formaciones vegetacionales de Bosque Esclerófilo de la Precordillera andina y el Matorral Esclerófilo andino. Es considerado un centro de riqueza de plantas, mamíferos y reptiles; aquí se encuentran 47 especies amenazadas de flora vascular, destacando *Haplopappus pedunculatus* y *Tristerix aphyllus*, y entre las especies de fauna el loro trichahue (*Cyanoliseus patagonus*) y el puma (*Puma concolor*) (Serey et al., 2007)

3.4.3.5 Región del Biobío

La Región del Biobío cuenta con 17 sitios prioritarios (SIMBIO, n.d.-b) para la conservación de la biodiversidad y 17 áreas protegidas (SIMBIO, n.d.-a). La comuna de Coronel es de interés por SO₂ debido al análisis de concentraciones que se realiza en la Sección 5.3.5 y además porque en ella se localiza el Complejo Termoeléctrico Santa María⁶. Por otro lado, en esta región existen emisiones relevantes de SO₂ debido a plantas de celulosa como las de CMPC Celulosa (en las comunas de Nacimiento y Laja) y Planta Arauco, en la comuna de Arauco.

⁶No se menciona la Central Termoeléctrica Bocamina U1 debido a que cerró en diciembre de 2022.

En la Tabla 3-12 se muestran los sitios prioritarios y áreas protegidas para las comunas de interés mencionadas en el párrafo anterior. En el Anexo 1 se presenta una tabla similar que comprende todas las comunas de la región del Biobío, además de un mapa que incluye su localización geográfica y las estaciones de monitoreo SINCA.

Tabla 3-12 Sitios prioritarios y áreas protegidas en comunas de interés para la Región del Biobío.

Clasificación	Designación	Nombre SP/AP	Comuna de interés	Monitores de SO ₂
Sitio Prioritario (SP)	Estrategia Regional de Biodiversidad	Altos de Escuadrón	Coronel	Calabozo, Coronel Norte, Coronel Sur, Lagunillas ENEL, Lota rural, Lota urbana, Cerro Merquín ⁽¹⁾ , Escuadrón ENEL ⁽²⁾
		Humedales Sistema Lacustre Intercomunal Concepción	Coronel	Calabozo, Coronel Norte, Coronel Sur, Lagunillas ENEL, Lota rural, Lota urbana, Cerro Merquín ⁽¹⁾ , Escuadrón ENEL ⁽²⁾
		Humedal Tubul Raqui	Arauco	⁽³⁾
Área Protegida (AP)	Santuario de la Naturaleza	Humedal Arauco Desembocadura Río Carampangue	Arauco	⁽³⁾

(1): La última medición registrada en la página web del SINCA corresponde al año 2016.

(2): La última medición registrada en la página web del SINCA corresponde al año 2023.

(3): Actualmente en la página web del SINCA no se muestran estaciones para la comuna de Arauco, sin embargo, se reportaron operaciones de monitores en el 2009 (Carampangue y Laraquete) pertenecientes a Celulosa Arauco.

Fuente: (SIMBIO, n.d.-a, n.d.-b)

De los sitios prioritarios y áreas protegidas mostrados anteriormente, destaca en Arauco el sitio prioritario de Humedal Tubul Raqui, que tiene una extensión aproximada de 935 hectáreas y corresponde a uno de los humedales costeros naturales de mayor tamaño en Chile, presentando una gran biodiversidad y capacidad de prestar servicios ecosistémicos a las comunidades locales. Ha sido identificado como sitio prioritario para la Ruta Migratoria del Pacífico en América de aves playeras, y es reconocido como sitio IBA (*Important Bird Area*) por Birdlife International. Además, incorpora dentro de sus límites el Bien Nacional Protegido "Isla Raqui Tubul". Se han identificado alrededor de 99 especies de aves (residentes y migratorias), 107 especies de fauna terrestre y 6 especies de fauna acuáticas. Presenta especies de peces como el Robalo (*Eleginops maclovinus*), Lisa (*Mugil cephalus*), Puye (*Galaxias maculatus*) y el Cauque (*Odontesthes mauleanum*), siendo este último una especie endémica y categorizada como "Vulnerable". Destacan también los anfibios y reptiles presentes, todos clasificados en el marco del Reglamento de Clasificación de Especie (RCE) (Decreto 52 Declara Santuario De La Naturaleza Humedal Tubul-Raqui, 2024).

En la comuna de Arauco también se destaca el Santuario de la Naturaleza Humedal Arauco - Desembocadura Río Carampangue que posee una superficie aproximada de 204 hectáreas y comprende el Bien Nacional Protegido "Isla de los Pescadores, Río Carampangue". Se trata de un estuario intermareal tipo marisma, donde existe un marcado gradiente de salinidad, permitiendo

una diversidad significativa de hábitats para una gran cantidad de especies. Se han identificado más de 100 especies de aves, tanto residentes como migratorias, y destacan varias especies de invertebrados, peces, anfibios y reptiles, todos nativos. Además, los antecedentes muestran que el 37% de las especies de flora son nativas. Destaca entre sus servicios ecosistémicos la provisión de hábitats críticos para especies migratorias y para la reproducción de especies animales, donde el estuario del río Carampangue ofrece diferentes ambientes para la alimentación y el descanso de distintas especies de aves. Entre la fauna sujeta a conservación se encuentran especies “Casi amenazadas” como el sapito de cuatro ojos (*Pleurodema thaul*) y la ranita de antifaz (*Batrachyla taeniata*) (Decreto 31 Declara Santuario De La Naturaleza Humedal Arauco - Desembocadura Río Carampangue, 2022).

Por otro lado, en Coronel destaca el sitio prioritario Altos de Escuadrón que se encuentra a 15 km al sur de Concepción, al inicio del cordón montañoso de la Cordillera de Nahuelbuta, considerado el límite norte del Bosque Valdiviano. Se destaca su importancia biogeográfica al presentar especies de anfibios endémicas, además de representar el límite de distribución norte para varias especies. Se han identificado especies con categoría de conservación “Vulnerable” como el Pudú (*Pudu pudu*) y la Güiña (*Oncifelis guigna*), y otras con categoría de “Casi amenazadas” como el ave Concón (*Strix rufipes*) y la Rana de antifaz (*Batrachyla taeniata*) (MMA, 2015).

3.4.3.6 Mediciones en lugares de interés por su valor natural

A partir de la recopilación de los sitios prioritarios y áreas protegidas para las zonas de interés mencionadas anteriormente, se observó que para ciertas comunas no se encuentra un monitoreo vigente de concentración atmosférica para el SO₂, como ocurre en Mejillones, Diego de Almagro y Arauco. Por otro lado, en ciertas comunas como Antofagasta y Atacama, si bien existen estaciones monitoras, éstas se encuentran concentradas en una misma área que en ocasiones está alejada de sitios prioritarios o áreas protegidas. Por ejemplo, en Antofagasta la única estación monitora que actualmente mide SO₂ se encuentra ubicada cerca de la Península de Mejillones, por ende, está geográficamente alejada de otros sitios de interés en la comuna como el Parque Nacional Llullaillaco, el Salar Punta Negra y el Salar Aguas Calientes IV, lo cual se puede apreciar de mejor manera en las imágenes incorporadas dentro del Anexo 1 Zonas Protegidas.

Considerando fuentes cercanas, sería deseable medir el SO₂ en los ecosistemas mencionados anteriormente que son de interés por su valor natural, en especial dentro de las comunas de Mejillones, Diego de Almagro (destacando Potrerillos) y Arauco. Se podrían hacer mediciones iniciales con el fin de evaluar la necesidad de instalar estaciones de monitoreo permanentes en estos lugares (medición continua), con alguna tecnología atinente a la ubicación remota de estos sitios. Un ejemplo sería la medición de SO₂ mediante tubos pasivos, una técnica económica que permite medir en varios sitios a la vez.

3.5 Tablas resumen de información relevante

A continuación, se presentan tablas resumen con la información relevante obtenida de la revisión de antecedentes.

El plomo, presentado en la Tabla 3-13, es un metal pesado, de baja temperatura de fusión y de color gris azulado. De forma natural se encuentra en la corteza terrestre, principalmente combinado con otros elementos. En la atmósfera es parte del material particulado y su presencia se debe a las actividades humanas. Los aviones son una gran fuente de emisiones de Pb, debido a la presencia de plomo en el combustible que utilizan. Otras fuentes antropogénicas son la metalurgia, la minería, la quema de combustibles y otros procesos industriales, como también el reciclaje de las baterías de plomo. También es emitido por fuentes naturales como los volcanes, la sal marina, partículas del suelo transportadas por el viento e incendios forestales, aunque su contribución es menor en comparación a las fuentes antropogénicas.

Respecto a los efectos en la salud, para determinar desde qué nivel de exposición se considera efectos agudos se utiliza como indicador el nivel de plomo en sangre (PbB). Las observaciones generales indican que los signos y síntomas de toxicidad aguda por exposición a plomo no se observan típicamente para niveles de PbB < 30 µg/dL (ATSDR, 2020).

Resultados proporcionan un rango de estimaciones para la pendiente aire-sangre de 4 a 9 µg/dL por µg/m³ en estudios de niños. Estudios más recientes, posteriores a la retirada progresiva de la gasolina con plomo y no centrados en comunidades cercanas a fuentes significativas de Pb en el aire, muestran factores de pendiente crecientes con concentraciones decrecientes de Pb en el aire (U.S. EPA, 2024b).

Tabla 3-13 Resumen efectos a la salud por exposición al plomo (Pb).

Tipo de efecto	Efecto en la salud	Síntomas
Efecto agudo	Gastrointestinal	Cólicos, náuseas, vómitos, diarrea, estreñimiento.
	Hematológico	Anemia, disminución en la síntesis de hemoglobina y crisis hemolítica aguda
	Neurológico	Dolor de cabeza, hiperirritabilidad, dolor y debilidad muscular, edema cerebral, entre otros.
Efecto crónico	Hematológico	A niveles de PbB ≤10 µg/dL se observa una disminución de la hemoglobina en sangre. A medida que aumenta el PbB puede resultar en anemia.
	Neurológico	Reducción de la función cognitiva, cambios en el comportamiento y ánimo, alteraciones en funciones neuromotoras y neurosensoriales (asociados con rangos de PbB desde ≤10 µg/dL para niños y rangos desde ≤10 µg/dL en adultos).
	Cardiovascular	Efectos adversos cardiovasculares asociados con rangos de PbB entre ≤10 hasta >50 µg/dL (aumento de presión arterial, mayor riesgo de hipertensión y enfermedad cardíaca, entre otros).

Tipo de efecto	Efecto en la salud	Síntomas
	Renal	Daño renal y reducción de la función renal asociados a un rango de PbB $\leq 10-50 \mu\text{g/dL}$
	Inmunológico	Se han observado efectos con un PbB promedio $\leq 10 \mu\text{g/dL}$, llevando a la sensibilización, autoinmunidad e inflamación.
	Reproductivo	En hombres se ha evidenciado daño al esperma y en concentraciones más altas, disminución de la fertilidad y daño histopatológico a los testículos. En mujeres la evidencia no es consistente.

Fuente: Elaboración propia

El SO_2 , cuyos efectos en la salud y medio ambiente se presentan en la Tabla 3-14 y Tabla 3-15, respectivamente, es un contaminante primario en fase gaseosa cuando se forma a partir de la combustión de carburantes, además de representar un contaminante secundario cuando es formado a partir de la oxidación atmosférica en fase gaseosa o acuosa de sulfuros. Proviene principalmente de la combustión de combustibles fósiles (madera, carbón y derivados del petróleo), por lo que las emisiones de SO_2 proceden principalmente de fuentes puntuales, ya sea a través de generación de electricidad a partir de carbón, de las fundiciones de cobre, las fábricas de celulosa y papel, las cementeras, las siderúrgicas, las refinerías de petróleo y las plantas de procesamiento químico. En la naturaleza, el SO_2 puede ser liberado al aire por erupciones volcánicas.

Se han evidenciado efectos agudos en la salud a niveles de exposición menores a 0,1 ppm en grupos de población más sensibles. En particular, exposiciones de 5-10 minutos a niveles tan bajos como 0,2-0,6 ppm de SO_2 durante el ejercicio o hiperpnea eucápnica en adultos y adolescentes con asma, son capaces de generar efectos agudos en el sistema respiratorio, mientras que para adultos sanos se han evidenciado efectos tras la exposición a concentraciones mayores a 1,0-5,0 ppm (OMS, 2021). La Tabla 3-16 muestra algunos niveles de exposición al SO_2 que pueden causar efectos adversos.

Tabla 3-14 Resumen efectos a la salud por exposición al dióxido de azufre (SO_2).

Tipo de efecto	Efecto en la salud	Síntomas
Efecto agudo	Exacerbación del asma	Existe una clara relación dosis-respuesta para las exposiciones a SO_2 entre 0.2 y 1.0 ppm.
	Respiratorio	Asociación positiva entre exposición a corto plazo con hospitalizaciones y visitas a la sala de emergencia.
	Mortalidad	Evidencia de asociaciones positivas consistentes con las concentraciones a corto plazo y mortalidad respiratoria.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-15 Resumen de efectos al medio ambiente por exposición al dióxido de azufre (SO₂).

	Tipo de efecto	Efecto	Síntomas
Vegetación	Efecto agudo	Daño foliar	Colapso o necrosis de los tejidos vegetales. No se ha encontrado daños en concentraciones promedio menores a 0,5 ppm para periodo de 3 horas
		Metabólico	Reducción de la actividad metabólica
		Citotóxico	Pérdida de la integridad de las membranas celulares
	Efecto crónico	Fitotóxico	Disminución del crecimiento, disminución de la fotosíntesis y el rendimiento de las plantas.
Fauna	Efecto agudo	Disminución en la capacidad de neutralización ácida	Efectos en la reproducción y aptitudes físicas, ocasionando disminución en la diversidad de especies marinas.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-16 Niveles de exposición al SO₂ que pueden causar efectos adversos.

Concentración SO ₂ [ppm]	Síntomas
<0,1	Aumento de la resistencia de las vías respiratorias en asmáticos durante el ejercicio
0,76	Irritación de nariz y garganta
4	Opresión en el pecho
5	Adultos sanos experimentaron un aumento de la resistencia de las vías respiratorias
10	Estornudos y tos
20	Broncoespasmos
100	Peligro inmediato para la vida y la salud

Fuente: (Public Health England, 2015)

El O₃, cuyos efectos en la salud se resumen en la Tabla 3-17, es un gas de olor picante y actúa como un tóxico irritante para el sistema respiratorio. Generalmente no es emitido de manera directa por fuentes específicas, sino que se forma en la tropósfera a partir de reacciones fotoquímicas en presencia de luz solar involucrando a dos principales contaminantes: los compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NO_x) (U.S. EPA, 2023b). Las emisiones de NO_x son responsables de gran parte de la formación de ozono que se produce en las zonas rurales, mientras que en las regiones que tienen mayor densidad poblacional, como las ciudades, la formación de O₃ se ve reforzada por las emisiones de COV (Beck et al., 1999). La única otra fuente apreciable de ozono troposférico corresponde al transporte desde la estratósfera.

Respecto a los efectos en la salud, para determinar desde qué nivel de exposición se considera efectos agudos, estudios de exposición humana han evidenciado la disminución de la función pulmonar, síntomas respiratorios y aumento de la inflamación en adultos jóvenes sanos expuestos a concentraciones de ozono tan bajas como 60 a 70 ppb tras exposiciones de 6,6 horas con ejercicio casi continuo (U.S. EPA, 2020b).

Tabla 3-17 Resumen efectos a la salud por exposición al ozono (O₃).

Tipo de efecto	Efecto en la salud	Síntomas
Efecto agudo	Respiratorio	Disminución de la función pulmonar y otros síntomas respiratorios (dolor en la inspiración profunda, falta de aliento, tos, entre otros).
	Metabólico	Síndrome metabólico (hiperglucemia, triglicéridos elevados, bajo colesterol HDL, presión arterial alta y adiposidad central), lo cual puede predisponer a un mayor riesgo de diabetes tipo 2 y enfermedad cardiovascular.
	Cardiovascular	Existe evidencia que sugiere, pero no es suficiente para inferir una relación causal.
	Mortalidad	Probable relación causal entre la exposición a corto plazo y la mortalidad total. La asociación más fuerte ocurre en los primeros días después de la exposición (0-3 días).
Efecto crónico	Respiratorio	Probable relación causal (asma en niños y otros síntomas respiratorios).
	Metabólico	Se sugiere relación causal. Asociaciones positivas con mortalidad relacionada a diabetes, aumento en la incidencia de diabetes, mayor riesgo de sobrepeso.
	Cardiovascular, sistema nervioso, sistema reproductivo y mortalidad	Se sugiere efecto, pero no hay evidencia suficiente para establecer relación causal.

Fuente: Elaboración propia

El CO, cuyos efectos a la salud se presentan en la Tabla 3-18, es un gas incoloro, inodoro, insípido y no irritante. Se forma principalmente a partir de la combustión incompleta de combustibles fósiles y por reacciones fotoquímicas en la atmósfera. También se puede formar en la oxidación de COV antropogénico y biogénico, principalmente a partir de la fotooxidación del metano y otros COV. Las fuentes móviles son la mayor fuente antropogénica de emisiones de CO. Otra fuente importante de emisiones son los incendios forestales, junto a las quemas de campos agrícolas. Además, las emisiones también pueden venir de la combustión estacionaria en centrales eléctricas que funcionan en base a combustibles fósiles, dispositivos de calefacción residencial como estufas a leña y de calderas.

Respecto a los efectos en la salud, para determinar desde qué nivel de exposición se considera efectos agudos, en el caso del monóxido de carbono se utiliza como indicador la carboxihemoglobina (COHb). Estudios de exposición controlada en humanos aportan pruebas sólidas de efectos sobre la función cardíaca en pacientes con enfermedad arterial coronaria tras exposiciones de corta duración dando lugar a 2,0-2,4% de COHb. No se han diseñado estudios clínicos en humanos para evaluar el efecto de exposiciones que resulten en COHb < 2% (U.S. EPA, 2010).

Por otro lado, estudios evidenciaron la asociación de concentraciones medias horarias entre 0,5 ppm y 9,4 ppm con visitas a urgencias por cardiopatía isquémica, insuficiencia cardíaca congestiva y enfermedades cardiovasculares en su conjunto. Se ha observado que bajas concentraciones de CO durante varias horas puede dar lugar a niveles de COHb equivalentes en

comparación con una exposición aguda a concentraciones más elevadas. Por ejemplo, en una condición de reposo sin COHb basal adicional, la COHb resultante de 35 ppm durante 1 h (0,89%) es aproximadamente equivalente a 6 ppm durante 8 h (0,83%) o 4 ppm durante 24 h (0,82%) (U.S. EPA, 2010).

Tabla 3-18 Resumen efectos a la salud por exposición al monóxido de carbono (CO).

Tipo de efecto	Efecto en la salud	Síntomas
Efecto agudo	Cardiovascular	Probable relación causal. Asociaciones con la frecuencia de visitas a urgencias, ingresos hospitalarios por cardiopatía isquémica, insuficiencia cardíaca, entre otros, a concentraciones entre 0,5 y 9,4 ppm.
	Sistema Nervioso Central	Se sugiere relación causal. Síntomas como dolor de cabeza, mareos, dificultades cognitivas.
	Respiratorio	Se sugiere relación causal. Cambios en la función pulmonar, síntomas respiratorios, visitas a urgencias y admisiones hospitalarias.
	Riesgo de muerte	Se sugiere relación causal.
Efecto crónico	Sistema Nervioso Central	Evidencia sugerente de una relación causal
	Embarazo	Evidencia sugerente de una relación causal
	Cardiovascular, respiratorio y mortalidad	La evidencia es menos consistente.

Fuente: Elaboración propia

4. Recopilación y comparación de los valores de las normas de calidad del aire adoptadas o recomendadas a nivel internacional para SO₂ (primaria y secundaria), O₃, Pb y CO

En este capítulo se presenta recopilación y comparación de los valores de las normas de calidad del aire adoptadas o recomendadas a nivel internacional para SO₂ (primaria y secundaria), O₃, Pb y CO. Si bien se presentan tablas resúmenes, el detalle de los valores recopilados puede ser consultado en el anexo digital NCAire-Revision_normativas.xlsx.

4.1 Análisis de la normativa internacional

En esta sección se muestra la recopilación de normas internacionales para los contaminantes SO₂, O₃, Pb y CO, además de valores de referencia proporcionados por la Organización Mundial de la Salud. En la Tabla 4-1 se muestran los tipos de instrumentos de los diferentes países y organizaciones comprendidos en la recopilación.

Tabla 4-1 Estado de los instrumentos en los países y organizaciones revisados.

País	Tipo Instrumento	Categoría Instrumento
OMS	Guía	Valor de referencia
Alemania	Norma	Vinculante
Argentina		
Brasil		
Canadá		
China		
Colombia		
España		
Estados Unidos		
Italia		
Japón		
México		
Perú		
Reino Unido		
Suecia		
Suiza		
Unión Europea		

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4-2 se muestra en más detalle las regulaciones o guías recopiladas de diferentes países y organizaciones. En particular, los países de la Unión Europea establecen mediante leyes nacionales los lineamientos de esta organización, por lo que, en general, tienen los mismos estándares de calidad del aire. Se observa que varias de las normativas recopiladas fueron publicadas o revisadas después del año 2010, excepto las regulaciones recopiladas para Argentina, China, Japón y monóxido de carbono en Canadá. Las instituciones asociadas a las

diferentes normativas corresponden a autoridades similares al Ministerio del Medio Ambiente o al Presidente de la República.

Tabla 4-2 Regulaciones de calidad del aire por país u organización.

País	Nombre Oficial	Institución	Año publicación	Enlace
Alemania	39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes	Bundesministerium für Umwelt	2010	https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_39/BJNR106510010.html
	GMBI 2021 Nr. 48-54, S. 1050: Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft)	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz	2021	https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_18082021_IGI25025005.htm
Argentina	LEY L - Nº 1.356 CALIDAD ATMOSFÉRICA	Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires	2004	https://www.argentina.gob.ar/normativa/provincial/ley-1356-123456789-0abc-defg-653-1000xvorpyel/actualizacion
Brasil	Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013 Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas	Secretaría de Salud	2013	https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-59113-23.04.2013.html
	Resolução Nº 491 Dispõe sobre padrões de qualidade do ar	Ministério do Meio Ambiente/Conselho Nacional do Meio Ambiente	2018	https://www.in.gov.br/web/guest/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/do-1-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603
Canadá	Canadian Ambient Air Quality Standards	Minister of the Environment, Minister of Health	2012	https://www.gazette.gc.ca/rp-pr/p1/2013/2013-05-25/html/notice-avis-eng.html#d106
			2017	https://www.gazette.gc.ca/rp-pr/p1/2017/2017-10-28/html/notice-avis-eng.html#na3

País	Nombre Oficial	Institución	Año publicación	Enlace
	National Ambient Air Quality Objectives for Air Contaminants	Department of the Environment	1989	http://central.bac-lac.gc.ca/.redirect?app=canga&z&id=9744&lang=eng
China	Ambient Air Quality Standard	MINISTRY OF ECOLOGY AND ENVIRONMENT	1982, última revisión 2012	https://english.mee.gov.cn/Resources/standards/Air_Environment/quality_standard1/201605/W020160511506615956495.pdf
Colombia	Resolución N°2254 "Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones"	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible	2017	http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/2.+Resoluci%C3%B3n+2254+de+2017+-+Niveles+Calidad+del+Aire..pdf/c22a285e-058e-42b6-aa88-2745fafad39f
España	Real Decreto 34/2023, de 24 de enero	Ministerio de la presidencia, relaciones con las cortes y memoria democrática	2023	https://www.boe.es/boe/dias/2023/01/25/pdfs/BOE-A-2023-2026.pdf
Estados Unidos	National Primary Ambient Air Quality Standards for Carbon Monoxide	United States Environmental Protection Agency	1985, revisado 2011	https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-1985-09-13/pdf/FR-1985-09-13.pdf
	National Primary Ambient Air Quality Standards for Lead	United States Environmental Protection Agency	2008, revisado 2016	https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2008-11-12/pdf/E8-25654.pdf
	National Primary Ambient Air Quality Standards Ozone	United States Environmental Protection Agency	2015, revisado 2020	https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2015-10-26/pdf/2015-26594.pdf
	National Primary Ambient Air Quality Standards Sulfur Dioxide	United States Environmental Protection Agency	1971, revisado 2012	https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-07/documents/fr-1971-04-30-co_phchemoxids_hcs_no2finaldecision_0.pdf
			2010, revisado 2019	https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2010-06-22/pdf/2010-13947.pdf
	Review of the Secondary National Ambient Air Quality Standards for Oxides of Nitrogen, Oxides of Sulfur, and Particulate Matter	United States Environmental Protection Agency	2024	https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2024-04-15/pdf/2024-07397.pdf

País	Nombre Oficial	Institución	Año publicación	Enlace
Italia	Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n. 155 Attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualita' dell'aria ambiente e per un'aria piu' pulita in Europa.	Presidente de la República	2010	https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2010/09/15/010G0177/sg
Japón	Environmental Quality Standards in Japan	Ministry for the Environment	1973	https://www.env.go.jp/en/air/aq/aq.html
			1997	https://www.env.go.jp/en/air/aq/aq.html
México	NORMA Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2021	Secretaría de Salud	2021	https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633956&fecha=28/10/2021#gsc.tab=0
	NORMA Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-2021	Secretaría de Salud	2021	https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634084&fecha=29/10/2021#gsc.tab=0
	NORMA Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2019	Secretaría de Salud	2019	https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5568395&fecha=20/08/2019#gsc.tab=0
OMS	Air Quality Guidelines for Europe	World Health Organization Regional Office for Europe	2000, revisado 2021	https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/107335/9789289013581-eng.pdf?sequence=1
	WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide	World Health Organization	2006, revisado 2021	https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/69477/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y
	WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM _{2.5} and PM ₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide	World Health Organization	2021	https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1
	WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants	World Health Organization Regional Office for Europe	2010, revisado 2021	https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/260127/9789289002134-eng.pdf?sequence=1
Perú	DS N°003-2017-MINAM "Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias"	Presidente de la República	2017	https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-003-2017-MINAM.pdf
Reino Unido	2010 No. 1001 ENVIRONMENTAL PROTECTION "The Air Quality Standards Regulations 2010"	Secretary of State	2010	https://www.legislation.gov.uk/ukxi/2010/1001/made

País	Nombre Oficial	Institución	Año publicación	Enlace
Suecia	Luftkvalitetsförordning (2010:477)	Klimat- och näringslivsdepartementet	2010	https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_39/BJNR106510010.html
				https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/luftkvalitetsforordning-2010477_sfs-2010-477#:~:text=26%20C2%A7%20Varje%20kommun%20ska,g-enom%20samverkan%20mellan%20flera%20kommuner.
Suiza	814. 318. 142.1 Luftreinhalte-Verordnung (LRV)	Swiss Federal Council	1985, revisada 2023	https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1986/208_208_208/de#app7ahref0
Unión Europea	DIRECTIVA 2008/50/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa	Parlamento europeo y el consejo de la unión europea	2008, revisada 2015	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&from=en
	Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa		2008, revisado 2015	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&from=en
			2024	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A52022PC0542

Fuente: Elaboración propia

Para la recopilación de las normas se elaboró una base de datos que se presenta en el anexo digital, en el documento NCAire-Revision_normativas.xlsx y que contiene la estructura descrita en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Estructura de la base de datos recopilada.

N° Columna	Nombre del campo	Descripción
1	País	País u organización internacional que emitió el valor límite o de referencia.
2	Nombre Oficial	Nombre oficial de la regulación o guía del que proviene el valor límite o de referencia.
3	Código Oficial	Código identificador de la regulación o guía establecido por el autor.
4	Categoría Instrumento	Clasificación del instrumento recopilado en vinculante (norma) o valor de referencia.
5	Institución	Institución que crea la regulación o guía.

N° Columna	Nombre del campo	Descripción
6	Fecha Publicación	Fecha (día/mes/año) en que se publica de forma oficial la normativa. En el caso de ser un valor de referencia es la fecha en que se publica la guía que lo contiene.
7	Año publicación	Año de la fecha de publicación.
8	Año vigencia	Año en el que se empieza a aplicar la normativa.
9	Tipo Instrumento	Clasificación en norma o valor de referencia.
10	Tipo norma	Clasificación de la norma en primaria o secundaria.
11	Actividad regulada	Actividad sobre la que se aplica la regulación o la guía, se puede presentar en distintos niveles de detalle según cómo esta se define en los instrumentos revisados.
12	Actividad regulada-detalle	Descripción completa de las actividades a las que se les aplican los valores de referencia o límites.
13	Contaminante	Nombre del contaminante para el cual se entrega un valor límite o de referencia.
14	Valor original	Valor límite o de referencia.
15	Valor medio	Corresponde al valor promedio de rango, cuando el valor original corresponde a un rango. En otro caso es el mismo valor que el valor original.
16	Unidad de medida	Unidad de medida en que se mide el valor original del contaminante.
17	Métrica	Métrica considerada para la medición del contaminante (media anual, media horaria, máxima diaria, media móvil, entre otras).
18	Verificador	Forma matemática en la que se calcula el valor de la norma/valor de referencia a partir de los datos de calidad ambiental para asegurar el cumplimiento de la norma.
19	Criterio de excedencia	El criterio de excedencia para la norma (si es que incluye).
20	Valor estándar	Corresponde al valor original o medio convertido a la unidad de medida estándar propuesta para homologar los valores de diferentes países. La unidad de medida estándar se establece según el Sistema Internacional.
21	Unidad de medida (valor estándar)	Unidad de medida estándar establecida para homologar los valores de diferentes países.
22	ODP-Primario	Objeto De Protección (ODP) (receptor) principal que busca proteger la normativa o guía. Se establecen tres categorías: Salud, Bienestar, Vegetación.
23	ODP-secundario	Objeto De Protección (ODP) (receptor) secundario que busca proteger la normativa o guía, es decir, en segunda prioridad.
24	ODP-Clase	Clasificación del ODP según tipo de receptor. Se establecen dos categorías: Humanos y Ecosistemas.
25	ODP	Información adicional sobre el ODP.
26	Alcance territorial	Alcance territorial de la aplicación de la normativa o recomendación. Puede ser Nacional, Regional, Internacional o la Unión Europea.
27	Región	Nombre de la región en la cual se aplica la normativa/recomendación cuando el alcance territorial es regional
28	Implementación	Si es valor límite o referencia para largo o corto plazo.
29	Observaciones	Observaciones o detalles adicionales sobre las normas/valores de referencia.
30	Origen	Origen técnico de la regulación/guía, es decir, en que se basan los valores propuestos. Por ejemplo, en estudios de evaluación de riesgo, guías internacionales, etc.

N° Columna	Nombre del campo	Descripción
31	Enlace	Página web de la referencia de la regulación o guía.
32	Punto de Control	Punto o medio de exposición que regula la norma o guía. Se puede clasificar en: Ambiente, Ambiente-Inmisión total o Interior.
33	CAS NR	Número de identificación único asignado a cada sustancia química por el Chemical Abstracts Service (CAS).
34	Normado en Chile	Indica si la métrica también se encuentra regulada en Chile.

Fuente: Elaboración propia

Respecto a los objetivos de protección primarios y secundarios, la Tabla 4-4 muestra sus definiciones. El ODP relacionado al bienestar de la población se asocia principalmente a las normativas secundarias de la USEPA, ya que este tipo de normativa tiene por objetivo resguardar el bienestar público, lo cual incluye la protección de los ecosistemas.

Tabla 4-4 Clasificaciones de ODP empleadas en la recopilación.

ODP-Clase	ODP-Primario/Secundario	Descripción ODP-Primario/Secundario
Humanos	Salud	Salud física de la población humana.
	Bienestar	Se distingue del anterior ya que considera salud mental y emocional de la población humana. Se relaciona con la calidad de vida.
Ecosistemas	Vegetación	Conjunto de plantas, árboles, hierbas, arbustos y organismos vegetales que cubren y habitan un área específica.
	Ecosistemas	Sistemas formados por un conjunto de organismos, el medio ambiente físico y las relaciones bióticas y abióticas. Principalmente se abordan ecosistemas terrestres, pero la definición incluye los acuáticos continentales y marinos.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, de la Tabla 4-5 hasta la Tabla 4-8 se resumen los valores límites o de referencia recopilados dentro de la base de datos. Las métricas mostradas en ellas consideran la forma en que se mide el contaminante respecto al valor límite establecido, y su medición se puede conocer con más detalle en la columna “Métrica detallada” de la base de datos.

En Chile los valores límites se normalizan a condiciones estándar (presión 1 atm y temperatura 25°C). Al realizar la revisión de normativas y recomendaciones, los valores se establecían con unidades de medida que no indicaban una normalización de forma explícita, pero indagando en los documentos anexos a las normas, se pudo determinar que países como México y Brasil normalizan a condiciones estándar igual que Chile, mientras que en la Unión Europea para los contaminantes gaseosos el volumen debe normalizarse a una temperatura de 293 K (aprox 20°C) y una presión atmosférica de 101,3 kPa (aprox 1 atm), pero en lo que respecta a las partículas y sustancias que deben analizarse en fase de partículas (por ejemplo, el plomo) el volumen de muestreo se expresa en condiciones ambientales en términos de temperatura y presión atmosférica en el momento de las mediciones.

Como se observa en la Tabla 4-5, de catorce países u organizaciones recopiladas, doce cuentan con un valor límite para el plomo que considera una media anual de $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la cual también corresponde a la norma primaria vigente en Chile. Los únicos dos países que no cuentan con este límite anual corresponden a Estados Unidos (tiene una media móvil trimestral de $0,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Argentina (tiene una media trimestral de $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tabla 4-5 Resumen valores límite o de referencia para el Plomo [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

Tipo norma	País	Media mensual	Media trimestral	Media anual
Primaria ⁽¹⁾	Chile ⁽²⁾			0,5
	Alemania ⁽³⁾			0,5
	Argentina		1,5	
	Brasil			0,5
	China		1	0,5
	Colombia			0,5
	España			0,5
	Estados Unidos		0,15	
	Italia			0,5
	OMS			0,5
	Perú	1,5		0,5
	Reino Unido			0,5
	Suecia			0,5
	Suiza ⁽³⁾			0,5
	Unión Europea			0,5

(1): Se encontró norma secundaria de plomo en Estados Unidos y Argentina equivalente a su norma primaria de plomo, incluida en la base de datos entregada en anexo digital.

(2): En Chile se normaliza a condiciones estándar (presión 1 atm, temperatura 25 °C).

(3): Tiene una norma adicional de inmisión anual de $100 [\mu\text{g}/\text{m}^2] \times \text{día}$ para la protección contra los efectos ambientales nocivos causados por la deposición del plomo.

Fuente: Elaboración propia

Para la norma primaria de SO_2 (ver Tabla 4-6) la mayoría de las normativas revisadas establece límites para concentraciones medias de 1 hora y 24 horas. Para la media de 1 hora el valor más restrictivo lo establece Colombia con $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el valor menos estricto es de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ correspondiente a China. Para la media de 24 horas los valores límite están entre $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dado por la OMS y $365 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Argentina, mientras que la de Chile corresponde a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$. También varios países presentan una media anual cuyos límites están entre $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Canadá y $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Argentina, comparado con Chile, que establece una media anual de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, Suiza cuenta con una norma adicional de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como media de 30 minutos y la OMS cuenta adicionalmente con una media de 10 minutos de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Recientemente se aprobó la revisión de la Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la calidad del aire ambiente y una atmósfera más limpia en Europa, en la cual se establecen nuevos valores límites exigibles al 2030 para ciertos contaminantes, entre ellos el SO_2 . Estos nuevos valores corresponden a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la media de 24 horas y $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la media anual, ambas cifras tres veces menor a lo establecido en Chile.

Respecto a la norma secundaria de SO_2 , Argentina y Estados Unidos establecen un valor límite para concentraciones medias de 3 horas, de $1300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $1310 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Países de Europa y China cuentan con una media anual de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En contraste, la media anual de la norma secundaria vigente en Chile corresponde a $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la zona sur del país y $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la zona norte. En China, al igual que en Chile, se cuenta con un valor límite para la media de 1 hora de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, además de un valor límite para la media de 24 horas de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos valores son significativamente más estrictos que los establecidos en Chile, pero solamente son aplicados en regiones especiales como parques nacionales. Recientemente la EPA comenzó un proceso de revisión de su norma secundaria a una media anual, promediada durante tres años consecutivos, con un nivel dentro del intervalo de 10 a 15 ppb (equivalente a 26,2 a $39,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente).

Tabla 4-6 Resumen valores límite o de referencia para el Dióxido de Azufre [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

Tipo norma	País	Media 10 min	Media 30min	Media 1h	Media 3h	Media 24h	Media anual
Primaria	Chile ⁽¹⁾			350		150	60
	Alemania			350		125	50
	Argentina					365	80
	Brasil					50	30
	Canadá			183			13
	China			500		150	60
	Colombia			100		50	
	España			350		125	
	Estados Unidos			197			
	Italia			350		125	
	Japón			262		105	
	México			197		105	
	OMS	500				40	
	Perú					250	
	Reino Unido			350		125	
	Suecia			200		100	
	Suiza		100			100	30
	Unión Europea			350		125	
	Unión Europea (al 2030)			350		50	20
Secundaria	Chile (Norte) ⁽¹⁾			1.000		365	80
	Chile (Sur) ⁽¹⁾			700		260	60
	Alemania						20 ⁽³⁾
	Argentina				1300		
	China ⁽²⁾			150		50	20
	España						20 ⁽³⁾
	Estados Unidos				1310		
	Estados Unidos (Propuesta de revisión 2024)						26,2 - 39,3
	Italia						20 ⁽³⁾
	Reino Unido						20 ⁽³⁾
	Suecia						20 ⁽³⁾
	Unión Europea						20 ⁽³⁾

(1): En Chile se normaliza a condiciones estándar (presión 1 atm, temperatura 25 °C).

(2): Se aplican a regiones especiales como los parques nacionales.

(3): Este valor se establece también para la media invernal (1 de octubre hasta el 31 de marzo).

Fuente: Elaboración propia

De 18 países u organizaciones recopiladas, 16 cuentan con un valor límite para el ozono que considera las concentraciones medias móviles de 8 horas, como se presenta en la Tabla 4-7. El valor más restrictivo está dado por la OMS para largo plazo con $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para corto plazo es de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (OMS, Colombia y Perú). El valor menos estricto es de $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en China. La norma vigente chilena establece $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la norma de 8 horas. Argentina, China, Japón, México y Suiza establecen un valor límite para la media de 1 hora, donde la cifra más estricta corresponde a $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Japón y Suiza), mientras que la más permisiva es de $235 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Argentina. Japón establece que los valores horarios no pueden superar el valor límite de 120

$\mu\text{g}/\text{m}^3$. Suiza es el único país que establece un valor límite para la media de 30 minutos, con $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que no deben ser excedidos por al menos 98% de las medias de 30 minutos en cada mes.

Tabla 4-7 Resumen valores límite o de referencia para el Ozono [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

Tipo norma	País	Media 30min	Media 1h	Media 8h
Primaria ⁽¹⁾	Chile ⁽²⁾			120
	Alemania ⁽³⁾			120
	Argentina		235	157
	Brasil			130
	Canadá			122
	China		200	160
	Colombia			100
	España ⁽³⁾			120
	Estados Unidos			137
	Italia ⁽³⁾			120
	Japón		120	
	México		176	118
	OMS ⁽⁴⁾			100
	OMS ⁽⁵⁾			60
	Perú			100
	Reino Unido ⁽³⁾			120
	Suecia			120
	Suiza	100	120	
	Unión Europea ⁽³⁾			120

(1): Se encontró norma secundaria de ozono en Estados Unidos y Argentina equivalente a su norma primaria de ozono, y la Unión Europea establece una norma secundaria de ozono para corto y largo plazo, incluidas en la base de datos entregada en anexo digital.

(2): En Chile se normaliza a condiciones estándar (presión 1 atm, temperatura 25 °C).

(3): Valor límite establecido para corto y largo plazo.

(4): Valor límite establecido para exposición a corto plazo (medida diaria).

(5): Valor límite establecido para exposición a largo plazo (vinculado a la temporada alta de ozono, definida como los seis meses consecutivos del año con la mayor concentración media móvil semestral de O_3). Por lo tanto, el nivel recomendado se aplicaría a la media de las máximas diarias de los promedios móviles octohorarios durante los seis meses.

Fuente: Elaboración propia

Para el monóxido de carbono, presentado en la Tabla 4-8, la mayoría establece valores límite para la media de 1 hora y 8 horas. Para la media de 1 hora el valor más restrictivo lo establece China con $10 \text{ mg}/\text{m}^3$, mientras que el valor más permisivo corresponde a $40 \text{ mg}/\text{m}^3$ en Estados Unidos y Argentina (Chile establece $30 \text{ mg}/\text{m}^3$ para la media de 1 hora). Respecto al límite de 8 horas, los valores están entre $5 \text{ mg}/\text{m}^3$ en Colombia y $23 \text{ mg}/\text{m}^3$ en Japón, mientras que la de Chile corresponde a $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ (al igual que la mayoría que cuenta con esta norma). Pocos países cuentan un valor límite para la media de 24 horas, siendo el valor más restrictivo $4 \text{ mg}/\text{m}^3$ (OMS y China) y el más permisivo $11 \text{ mg}/\text{m}^3$ (Japón).

Tabla 4-8 Resumen valores límite o de referencia para el Monóxido de Carbono [mg/m³].

Tipo norma	País	Media 1h	Media 8h	Media 24h
Primaria	Chile ⁽¹⁾	30	10	
	Alemania		10	
	Argentina	40	10	
	Brasil		10	
	Canadá	25	13	
	China	10		4
	Colombia	35	5	
	España		10	
	Estados Unidos	40	10	
	Italia		10	
	Japón		23	11
	México	30	10	
	OMS ⁽²⁾	30	10	4
	Perú	30	10	
	Reino Unido		10	
	Suecia		10	
	Suiza			8
	Unión Europea		10	

(1): En Chile se normaliza a condiciones estándar (presión 1 atm, temperatura 25 °C).

(2): También posee recomendación para monóxido de carbono en interiores, incluida en la base de datos entregada en anexo digital.

Fuente: Elaboración propia

4.1.1 Síntesis del análisis de la normativa internacional

A partir de la revisión de normativas y recomendaciones internacionales, no se considera que exista una justificación sólida para actualizar el valor límite actualmente vigente para el plomo, ya que se encuentra en línea con los estándares establecidos por otros países. Si bien se podría considerar la incorporación de una normativa adicional para otro periodo de medición, como una media trimestral o mensual, no es algo imperativo.

En cuanto a la norma primaria de SO₂, se observa la posibilidad y pertinencia de seguir avanzando e ir actualizando de manera gradual los valores límites, para estar alineados con los estándares internacionales. De esta manera, se podría reducir el estándar actual chileno para la media de 1 hora a 197 µg/m³ como la norma de Estados Unidos, y seguir la recomendación de la OMS de 40 µg/m³ para la media de 24 horas, así como adoptar con gradualidad la reciente revisión a la norma anual de la Unión Europea con un valor límite aún más estricto de 20 µg/m³.

En lo que respecta a la norma secundaria de SO₂, también existe evidencia que refleja la necesidad de actualización del valor límite de manera que se encuentre en consonancia con los estándares internacionales. De esta manera, se podría avanzar gradualmente hasta una media anual de 20 µg/m³ como establece la normativa de la Unión Europea, lo que reflejaría una postura más alineada con las mejores prácticas globales y garantizaría una mayor protección para el medio ambiente. Además, es relevante mencionar que Estados Unidos se encuentra revisando su norma secundaria para actualizar a una media anual en el rango de 26,2 - 39,3 µg/m³.

En cuanto a la normativa sobre CO, el estándar nacional vigente para la métrica de 1 hora se encuentra a la par con la recomendación de la OMS, aunque se podría considerar seguir avanzando hacia un valor más exigente como establece la norma canadiense de 25,2 mg/m³. Sin embargo, en relación con la normativa que considera las máximas diarias de las medias móviles octohorarias, la mayoría de los países considera un valor límite de 10 mg/m³ al igual que el estándar nacional vigente, aunque Colombia establece un valor más estricto de 5 mg/m³. Por otro lado, la OMS establece un valor guía para la media de 24 horas que corresponde a 4 mg/m³. Como esta métrica no se regula actualmente en Chile, sería pertinente evaluar la factibilidad de implementar un nuevo estándar que incluya este valor.

Respecto a la norma de O₃, en base a la revisión internacional se observa la posibilidad y pertinencia de seguir avanzando en la reducción del valor límite de manera gradual hasta alcanzar la recomendación de la OMS, que corresponde a 60 µg/m³ para las máximas diarias de las medias móviles octohorarias.

4.2 Análisis y sistematización de los criterios de excedencia en EEUU, comunidad europea, países OCDE y Japón, entre otros

Los criterios de excedencia recopilados corresponden a los mencionados dentro de las normativas y guías de referencia revisados en la elaboración de la base de datos de la sección anterior. Las tablas a continuación muestran el resumen de criterios de excedencia para los distintos contaminantes dependiendo de la métrica evaluada. Para más información de las regulaciones asociadas a cada criterio se puede consultar el Excel del anexo digital “NCAire-Revision_normativas.xlsx”.

Tabla 4-9 Criterios de excedencia para el Pb.

Métrica	País/Organización	Criterio de excedencia
Media mensual	Perú	No exceder más de 4 veces al año.
Media trimestral	Estados Unidos	Evaluado dentro de un periodo de tres años, no puede ser sobrepasado.
	Argentina, China	N/E
Media anual	Perú	Media aritmética de los valores mensuales de todo un año.
	Colombia	Nivel máximo permisible.
	Alemania, España, Italia, Reino Unido, Suecia	Al menos 90 % de los valores horarios o, si no están disponibles, de los valores correspondientes a 24 horas a lo largo del año.
	Brasil, China, OMS, Suiza	N/E

N/E: No Especifica

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-10 Criterios de excedencia para el SO₂.

Norma	Métrica	País/Organización	Criterio de excedencia
Primaria	Media 10 min	OMS	N/E
	Media 30 min	Suiza	El 95% de las medias de 30 minutos para un año no deben exceder el valor establecido.
	Media 1 hora	Suecia	Este valor podrá superarse 175 veces por año natural, siempre que el nivel de contaminación nunca supere el valor establecido durante una hora más de 24 veces por año natural.
		Alemania, España, Italia, Reino Unido	No podrá superarse en más de 24 ocasiones por año civil. Porcentaje requerido de datos válidos: al menos 75% (es decir, 45 minutos).
		Estados Unidos	Promedio de tres años del percentil 99 anual de las máximas diarias de las concentraciones promedio de 1 hora.
		Canadá	Promedio de tres años del percentil 99 anual de las máximas diarias de las concentraciones promedio de 1 hora
		México	Promedio de tres años del percentil 99 anual de las máximas diarias de las concentraciones promedio de 1 hora. Al menos 75% de los días de cada trimestre deben reportar el máximo diario (máximo diario se calcula si al menos cuenta con 75% de las concentraciones horarias, es decir, 18 registros).
		Colombia, Japón	No puede ser sobrepasado
		China	N/E
	Media 24 horas	Suecia	Este valor podrá superarse 7 veces por año natural, siempre que el nivel de contaminación nunca supere el valor establecido más de 3 veces por año natural.
		Alemania, España, Italia, Reino Unido	No podrá superarse en más de 3 ocasiones por año civil. Porcentaje requerido de datos válidos: al menos 75% de las medias horarias (es decir, valores correspondientes a 18 horas como mínimo).
		Japón	El promedio diario de los valores horarios no puede exceder el valor establecido.
		Colombia	Nivel máximo permisible.
		Suiza	No puede ser sobrepasado más de una vez por año.
		OMS	Percentil 99 de la distribución anual de las concentraciones medias de 24 horas (equivalente a 3-4 días con valores excedentes por año).
		México	El valor máximo de los promedios de 24 horas de tres años consecutivos debe ser menor o igual al valor establecido.
		Perú	No puede ser sobrepasado más de 7 veces por año
		Argentina, Brasil, China	N/E

Norma	Métrica	País/Organización	Criterio de excedencia
Secundaria	Media anual	Canadá	Promedio sobre un año calendario de todas las concentraciones medias de 1 hora.
		Alemania, Argentina, Brasil, China, Suiza	N/E
	Media 1h	China	N/E
	Media 3h	Estados Unidos	No puede ser sobrepasado más de una vez por año
		Argentina	N/E
	Media 24h	China	N/E
	Media anual	Alemania, España, Italia, Reino Unido, Suecia	Al menos 90 % de los valores horarios o, si no están disponibles, de los valores correspondientes a 24 horas a lo largo del año (no incluyen las pérdidas de datos debido a la calibración periódica o mantenimiento de la instrumentación). Para la aplicación de este valor sólo se tomarán en consideración los datos obtenidos en las estaciones de medición dirigidos a la protección de los ecosistemas naturales y de la vegetación (situados a una distancia superior a 20 km de las aglomeraciones o a más de 5 km de otras zonas edificadas, instalaciones industriales o carreteras).
		China	N/E

N/E: No Especifica

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-11 Criterios de excedencia para el O₃.

Métrica	País/Organización	Criterio de excedencia
Media 30 min	Suiza	98% de las medias de 30 minutos para un mes no deben exceder el valor establecido
Media 1h	México	El máximo anual de los máximos diarios de las concentraciones horarias debe ser menor o igual al valor establecido. En un año calendario se requieren mínimo de 275 o 274 (75%) de los máximos diarios de las concentraciones horarias para un año bisiesto o no bisiesto, respectivamente.
	Suiza	No puede ser sobrepasado más de una vez por año
	Japón	No puede ser sobrepasado
	Argentina, China	N/E
Media 8h	Alemania, España, Italia, Reino Unido, Suecia	Largo plazo. Máxima diaria de las medias móviles octohorarias en un año civil. Se requiere 75 % de las medias octohorarias móviles calculadas a partir de datos horarios (es decir, 18 medias octohorarias móviles calculadas a partir de datos actualizados cada hora).
	Alemania, España, Italia, Reino Unido, Suecia	Corto plazo. No debe superarse más de 25 días por cada año civil de promedio en un periodo de 3 años. Si las medias de tres años no pueden determinarse a partir de una serie completa y consecutiva de datos anuales, para verificar el cumplimiento será necesario mínimo los datos válidos correspondientes a un año. Se requiere 75 % de las medias octohorarias móviles calculadas a partir de datos horarios (es decir, 18 medias octohorarias móviles calculadas a partir de datos actualizados cada hora).
	México	El máximo anual de los máximos diarios de las concentraciones de los promedios móviles de 8 horas debe ser menor o igual al valor establecido. En un año calendario se requieren mínimo de 275 o 274 (75%) de los máximos diarios de las concentraciones horarias para un año bisiesto o no bisiesto, respectivamente. Para la máxima de los promedios móviles de 8 horas por día, se debe contar con al menos 18 registros.
	OMS	Corto plazo. Percentil 99 de la distribución anual de las concentraciones máximas diarias de las medias móviles de 8 horas (equivalente a 3-4 días con valores excedentes por año).
	OMS	Largo plazo. Promedio de las concentraciones máximas diarias promediadas en 8 horas correspondientes a la temporada alta (período de seis meses consecutivos con el promedio móvil semestral de concentración de ozono más alto).
	Estados Unidos	La cuarta concentración más alta entre las máximas diarias de un año para una concentración de 8 horas, promediada durante 3 años.
	Colombia	Nivel máximo permisible.
	Perú	No exceder más de 24 veces al año.
	Canadá	Promedio trianual de la cuarta concentración más alta para cada año, entre las máximas diarias de las medias de 8 horas.
	Argentina, Brasil, China	N/E

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-12 Criterios de excedencia para el CO.

Métrica	País/Organización	Criterio de excedencia
Media 1h	Colombia	Nivel máximo permisible
	Estados Unidos, Perú	No puede ser sobrepasado más de una vez por año
	México	El máximo de las concentraciones horarias para un año calendario debe ser menor o igual al valor establecido. En caso de que se tenga menos del 75% de los registros horarios en el periodo y al menos 1 de las concentraciones horarias sea mayor que el valor establecido, se incumplirá la norma.
	OMS	Las excursiones a este nivel no deben realizarse más de una vez al día.
	Canadá, Argentina, China	N/E
Media 8h	Colombia, Japón	Nivel máximo permisible.
	Estados Unidos	No puede ser sobrepasado más de una vez por año. Un promedio de 8 horas se considerará válido si se dispone de al menos el 75% del promedio horario para el período de 8 horas. En caso de que solo se disponga de seis (o siete) promedios horarios, el promedio de 8 horas se calculará sobre la base de las horas disponibles utilizando seis (o siete) como divisor.
	Alemania, España, Italia, Reino Unido, Suecia	Al menos 75 % de las medias octohorarias móviles calculadas a partir de datos horarios (es decir, 18 medias octohorarias móviles calculadas a partir de datos actualizados cada hora).
	México	El valor máximo de los promedios móviles de 8 horas en un año calendario debe ser menor o igual al valor establecido. En caso de que se tenga menos del 75% de los registros en el periodo y al menos 1 de las concentraciones de los promedios móviles de 8 horas sea mayor que el valor establecido, se incumplirá la Norma.
	Argentina, Brasil, Canadá, Perú, OMS	N/E
Media 24h	Japón	No puede ser sobrepasado.
	Suiza	No puede ser sobrepasado más de una vez por año
	OMS	Percentil 99 de la distribución anual de las concentraciones medias de 24 horas (equivalente a 3-4 días con valores excedentes por año).
	China	N/E

N/E: No Especifica

Fuente: Elaboración propia

4.2.1 Síntesis del análisis de los criterios de excedencia

Los criterios de excedencia para el Plomo para la media anual se establecen como máximo permisible en el caso de Colombia y que al menos el 90% de los valores horarios estén disponibles. Para el caso de la media trimestral, Estados Unidos declara que el valor no puede ser

sobrepasado, mientras que la norma mensual de Perú no puede ser excedida más de 4 veces por año.

Respecto al SO_2 los criterios de excedencia para la norma primaria son variados, pero en general establecen el número de excedencias por año que puede tener el valor límite. Para la media de 24 horas la cantidad de superaciones varía desde 0 hasta 7 superaciones por año, mientras que para la media de 1 hora se puede superar entre 24 y hasta 175 veces por año, dependiendo del criterio. Estados Unidos, Canadá y México establecen como criterio de excedencia el promedio de tres años del percentil 99 anual de las máximas diarias de las concentraciones promedio de 1 hora. Sobre la norma secundaria de SO_2 , países europeos exigen que la métrica anual debe evaluarse con al menos 90% de los valores horarios, y solo en las estaciones de medición dirigidas a la protección de los ecosistemas naturales y de vegetación. Estados Unidos establece para la norma de 3 horas que ésta no puede ser sobrepasada más de una vez por año.

Para el ozono se tiene que la métrica de 1 hora puede ser sobrepasada entre 0 y 1 vez por año. En particular, México exige al menos 75% de los máximos diarios de las concentraciones horarias para evaluar la norma. Para la media de 8 horas los criterios de excedencia son variados, algunos diferenciados para corto o largo plazo. En general, se puede encontrar que la norma no puede ser sobrepasada, puede ser sobrepasada entre 3-4 días, o hasta 24 días dentro de un año civil, dependiendo del país. México y países europeos establecen que para evaluar la norma se requiere al menos 75 % de las medias octohorarias móviles.

En relación con el CO , se tiene que la métrica de 1 hora puede ser sobrepasada entre 0 y 1 vez por año. En particular, México establece que, si se tiene menos del 75% de los registros horarios en el periodo y al menos 1 de las concentraciones horarias es mayor al valor establecido, se incumple la norma. Respecto a la media de 8 horas, los criterios de excedencia van entre 0 a 1 vez por año. Estados Unidos, México y países europeos proponen que la norma debe evaluarse con al menos 75% de las medias octohorarias móviles. Por último, para la media de 24 horas el criterio de excedencia más permisivo corresponde a 3-4 días de superaciones al año, mientras que el más exigente establece que el valor límite no puede ser excedido.

4.3 Estudio y síntesis de metodologías de monitoreo continuo y discreto

4.3.1 Protocolo general de muestreo de gases

Para el monitoreo continuo de gases, se aspira un caudal de gases utilizando un tubo que sale del techo de la caseta donde están los equipos; ese tubo alimenta a todos los analizadores continuos de CO , O_3 y SO_2 . El caudal está dado para cada equipo de monitoreo continuo según las indicaciones del fabricante. El propósito de la caseta es proteger los equipos de las condiciones ambientales y también proporcionar climatización para la correcta operación de las componentes electrónicas de dichos equipos.

El monitoreo debe realizarse con instrumentos de medición que hayan sido reconocidos, aprobados o certificados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos o por las Directivas de la Comunidad Europea.

Las estaciones de monitoreo de estos contaminantes deben tener representatividad poblacional para gases (EMRPG), es decir, se deben encontrar en un área habitada. Entre las características que deben cumplir los sistemas de toma de muestra en las estaciones de monitoreo de contaminantes atmosféricos (de acuerdo con la Resolución Exenta N° 1449/2023 de SMA) se encuentran:

- Los sistemas de tomas de muestras de gases deben estar contruidos de vidrio de borosilicato, politetrafluoroetileno (PTFE), perfluoroalcoxi (PFA) o fluoroetileno propileno (FEP), materiales no reactivos con los gases muestreados (EPA 2017, Apéndice F). El diseño de estos sistemas debe ser tal que asegure que el tiempo de residencia de la muestra no sea mayor a 20 segundos, entendiendo por ello aquel que tarda la muestra en viajar desde la entrada de la toma de muestra hasta la entrada del analizador de gas.
- Además, el sistema de toma de muestra debe tener un sistema de extracción de la humedad del flujo muestreador.
- La entrada de la toma de muestra debe estar a una distancia de al menos un metro horizontalmente respecto a muros, estructuras de soporte o barandas en el techo de la estación. La entrada de la toma de muestra o el cabezal del instrumento deben estar ubicados a una distancia respecto a cualquier obstáculo de al menos 2 veces la altura de ese obstáculo. Y el flujo de aire no debe tener obstrucciones a lo menos en un arco de 270°.
- El cabezal del instrumento de medición o de la toma de muestra debe ubicarse a una distancia mayor o igual a diez metros de la línea de goteo de un grupo de árboles y mayor o igual a veinte metros cuando un grupo de árboles actúen como obstrucción de la libre circulación del flujo de aire.

Para la entrada de la toma de muestra o el cabezal del instrumento debe existir un ángulo mínimo de 120° por encima de la entrada de muestreo.

4.3.2 Descripción de las técnicas específicas para cada especie gaseosa

Desde el apartado 4.3.2.1 hasta el 4.3.2.4 se muestran las técnicas continuas que establece la normativa vigente para medir O₃, CO y SO₂. Luego, en el apartado 4.3.2.4 se comenta respecto a las técnicas discontinuas de monitoreo.

4.3.2.1 Ozono

El D.S. N°112/2002, MINSEGPRES establece los siguientes métodos de medición de ozono:

- a. Quimioluminiscencia con etileno
- b. Fotometría de absorción ultravioleta
- c. Cromatografía líquida gas/sólido
- d. Espectrometría de absorción óptica diferencial, con calibración in situ y,
- e. Un método de medición de referencia o equivalente designado o aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos o por las Directivas de la Comunidad Europea (U.S. EPA, 2016b).

La técnica de quimioluminiscencia con etileno consiste en la detección de los fotones producidos en la reacción química del ozono con etileno. La intensidad de emisión de luz a una longitud de onda entre 350 y 550 nm es proporcional a la concentración de ozono en la muestra de aire, siempre que el etileno esté en exceso. La ventaja de esta técnica es que, a presión atmosférica la radiación quimio luminiscente es fácil de detectar. Funciona bien para concentraciones de ozono entre 0,001 a 100 ppm y la respuesta es lineal si se mantienen constantes los flujos de muestra y etileno. No tiene interferencias conocidas y puede alcanzar una precisión del 2% a 50 ppb de ozono (Amado & Garrido, 2013).

En la fotometría de absorción atómica, la muestra de aire con ozono pasa a través de un tubo de absorción donde recibe luz ultravioleta, la cual es absorbida por las moléculas de ozono presentes en la muestra. Un detector ubicado en el extremo final del tubo mide la intensidad de la luz y guarda esa información. Luego, se hace pasar por el mismo tubo de absorción aire sin ozono, se mide la intensidad de la luz, y se comparan ambas mediciones. La concentración de ozono es calculada como la razón entre las dos mediciones de intensidad de luz (Trost, 2016). Tradicionalmente se han utilizado lámparas de mercurio como fuente de luz, sin embargo, estudios recientes están empleando fuentes UV-LED (Degner et al., 2009).

Espectrometría de absorción óptica diferencial (DOAS), con calibración in situ se basa en la absorción molecular UV y se puede utilizar para medir simultáneamente gases a bajas concentraciones, como el ozono y el dióxido de azufre. Esta técnica mide la disminución de la luz solar en la atmósfera producida por absorción de un determinado gas traza. Este método permite medir gases a kilómetros de distancia y a muy bajas concentraciones (López & Mandujano Mejía, 2005).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos ha reconocido y certificado una gran cantidad de equipos para muestrear O₃. La Tabla 4-13 resume algunos de ellos.

Tabla 4-13 Equipos aprobados por la EPA para medir O₃.

Marca	Modelo	Técnica de medición	Rango de medición	Temperatura
Horiba	APOA-360 o APOA-360-CE	Absorptiometry UV	0 – 0,50 ppm	10 – 40 °C
Horiba	APOA-370	Absorción UV	0 – 0,50 ppm	20 – 30 °C
Teledyne Advanced Pollution Instrumentation	400E o T400	Absorción UV	0-100 ppb 0-1000 ppb	5 – 40 °C
Thermo Electron/Thermo Environmental Instruments	49, 49C, 49i	Fotometría ultravioleta	0-0.5 ppm 0-1.0 ppm	20 – 30 °C

Fuente: List of designated reference and equivalent methods (U.S. EPA, 2024c).


Figura 4-1 Monitor de ozono ambiental Horiba APOA-370

Fuente: Elaboración propia


Figura 4-2 Analizador de ozono ambiental Teledyne T400

Fuente: Elaboración propia

4.3.2.2 Monóxido de carbono

El D.S. N°115/2002, MINSEGPRES establece los siguientes métodos de medición de monóxido de carbono:

- Fotometría infrarroja no dispersiva y,
- Un método de medición de referencia o equivalente designado o aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos o por las Directivas de la Comunidad Europea (U.S. EPA, 2016b).

En la técnica de fotometría infrarroja no dispersiva, la radiación infrarroja incide en forma alternada entre una celda de referencia (contiene solo un gas inerte que no absorbe radiación infrarroja) y la celda con el gas de muestra (contiene gas con CO). La absorción de radiación genera calor en forma proporcional al número de moléculas de CO presentes en el gas de muestra, lo que produce diferencias de presión que generan señales eléctricas. Estas señales eléctricas permiten conocer la concentración de CO.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos ha reconocido y certificado una gran cantidad de equipos para muestrear CO. La Tabla 4-14 resume algunos de ellos.

Tabla 4-14 Equipos aprobados por la EPA para medir CO.

Marca	Modelo	Técnica de medición	Rango de medición	Temperatura
Horiba	APMA-370	Non-dispersion cross modulation infrared	0-50 ppm	20 – 30°C
Teledyne Advanced Pollution Instrumentation	300EU, T300U	Correlación de filtros de gas	0 – 0,1°C	10 – 40°C
Teledyne Advanced Pollution Instrumentation	TML-30	Correlación de filtros de gas	0-10 ppm 0-50 ppm	10 – 40°C
Thermo Electron/Thermo Environmental Instruments	48C, 48i	Correlación de filtros de gas	ppm 0-100 ppm	20 – 30°C

Fuente: List of designated reference and equivalent methods (U.S. EPA, 2024c).



Figura 4-3 Analizador de CO ambiental Horiba APMA-370

Fuente: Elaboración propia



Figura 4-4 Analizador de CO ambiental Thermo Scientific 48i

Fuente: Elaboración propia

4.3.2.3 Dióxido de azufre

El D.S. N°22/2009, MINSEGPRES establece los siguientes métodos de medición de dióxido de azufre:

- Fluorescencia ultravioleta;
- Espectrometría de absorción diferencial con calibración in – situ y;
- Un método de medición de referencia o equivalente designado o aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos o por las Directivas de la Comunidad Europea (U.S. EPA, 2016b).

En el método de fluorescencia ultravioleta, una radiación ultravioleta con una longitud de onda de 214 nm ilumina la muestra provocando una excitación electrónica de las moléculas de SO₂, cuando estas vuelven a su estado normal, emiten una radiación fluorescente visible característica

de 350 nm de longitud de onda. La intensidad de esta fluorescencia visible es proporcional a la concentración de SO₂.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos ha reconocido y certificado una gran cantidad de equipos para muestrear SO₂. La Tabla 4-15 resume algunos de ellos.

Tabla 4-15 Equipos aprobados por la EPA para medir SO₂.

Marca	Modelo	Técnica de medición	Rango de medición	Temperatura
Horiba	APSA-370	Fluorescencia UV	0 - 0,5 ppm	20 - 30 °C
Horiba	APSA-360, APSA-360-CE, or APSA-360A-CE	Absorción UV	0 - 0,5 ppm	5 - 40 °C
Teledyne	100A, 100AS, 100E, 100EU, T100, T100U	Fluorescencia	0 - 50 ppb y 0 - 1000 ppb	5 - 40 °C
Thermo Environmental Instruments	43A, 43B, 43C, 43C-TLE, 43i, 43i-TLE	Fluorescencia	0 - 0,1 ppm 0 - 0,2ppm 0-0.5 ppm 0-1.0 ppm	20 - 30 °C

Fuente: List of designated reference and equivalent methods (U.S. EPA, 2024c).



Figura 4-5 Muestreador Horiba APSA 370

Fuente: Elaboración propia



Figura 4-6 Muestreador de SO₂ Thermo 43i

Fuente: Elaboración propia

4.3.2.4 Técnicas de medición discontinuas para gases

Existen técnicas maduras de medición discontinua de gases que se basan en el uso de tubos pasivos. Estos consisten en tubos de plástico que están recubiertos internamente con un gel y un reactivo químico que permite fijar moléculas reactivas gaseosas tales como ozono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno. El gas por medir difunde al interior del tubo y queda fijado en el gel. Posteriormente al muestreo, los tubos se llevan a análisis químico y se expresa la concentración promedio del gas muestreado.

Debido a que el muestreo es pasivo, se debe muestrear al menos por 7 días para poder obtener resultados sobre el límite de detección de cada gas (Eurofins, 2024). Aunque el método permite medir varios sitios a un costo menor que usando medidores continuos, no es posible usar estos sistemas para la evaluación de cumplimiento de normativa diaria u horaria, solo para normas anuales. Por esta razón, son técnicas que no permiten una evaluación completa de cumplimiento de normas ambientales de gases.

4.3.2.5 Metodologías de medición emergentes

En esta sección se comentan brevemente varias técnicas emergentes para la medición continua de gases en el ambiente: sensores de bajo costo, sensores electroquímicos y espectroscópicos avanzados.

Los sensores de bajo costo son pequeños y su precio es considerablemente menor que los equipos ya descritos en las secciones previas de este informe. Esta tecnología varía en su principio de operación (la mayoría operan por absorción de luz a una longitud de onda específica), se pueden usar estacionarios o bien instalar en vehículos o ser usados por personas para mediciones de exposición a contaminantes criterios: CO, SO₂, NO₂, O₃.

Aunque estos sensores de bajo costo son útiles para entregar información sobre la calidad del aire, tienen ciertas limitaciones, por lo que podrían eventualmente reportar datos cuestionables

y entregar concentraciones sobre o subestimadas. Entre estas limitaciones se encuentran, por ejemplo: las altas y bajas temperaturas (y humedad) podrían afectar la medición, algunos sensores de gases pierden sensibilidad con el tiempo pudiéndose usar solo por un par de años. Siempre es necesario verificar que estén funcionando bien, ya que problemas de electricidad o el clima pueden afectar su funcionamiento.

Debido a las limitaciones que aún tiene esta tecnología, los sensores de bajo costo no son reconocidos por la EPA para ser utilizados con propósitos regulatorios. Sin embargo, la EPA reconoce que son de ayuda para entender la calidad del aire, ya que permiten identificar lugares para posteriormente instalar monitores regulatorios, y para identificar “hot spots” o zonas muy contaminadas (U.S. EPA, 2023d).

Los sensores electroquímicos se empezaron a desarrollar en 1950 y hoy son una tecnología popular para determinar gases tóxicos en el ambiente. Estos sensores operan haciendo reaccionar al gas de interés, lo cual produce una señal eléctrica que es proporcional a la concentración de este gas en el ambiente.

Como toda tecnología, estos sensores tienen ventajas y desventajas. Entre las ventajas, se encuentran: pueden ser específicos para un gas en ppm, tienen respuesta lineal, bajo requerimiento de potencia y buena resolución, excelente precisión, no se dañan con la presencia de otros gases o vapores y es más barato que la mayoría de las tecnologías regulatorias para detectar gases. Entre las desventajas que tienen estos sensores se puede mencionar que trabajan en un rango de temperatura limitado, su vida útil es corta (entre 6 meses un año), algunos sensores son afectados por la interferencia de otros gases, por lo que podrían generar lecturas falsas y mientras más expuestos están al gas objetivo, más corta es su vida útil. Esta tecnología es conocida, ha sido usada por muchos años y seguirá siendo una piedra base en los sensores de detección de gas. Su tamaño pequeño y variadas cualidades los hacen ser muy convenientes como equipos de detección personal de gases, pero hay que tener presente sus limitaciones (Mark Baldigowski, 2011).

Entre los métodos espectroscópicos, uno recientemente desarrollado es el método Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS) o espectroscopia de absorción láser en cavidades ópticas. Esta técnica permite monitorear gases en segundos a nivel de partes por billón o por trillón, superando con creces a los espectrómetros convencionales, los cuales generalmente en el mejor de los casos miden hasta partes por millón. En CRDS, un haz de luz de una sola frecuencia entra a una cavidad definida por dos o más espejos de alta reflectividad. Un fotodetector rápido detecta una pequeña cantidad de luz que se escapa a través de uno de los espejos para producir una señal que es directamente a la intensidad en la cavidad. Los analizadores Picarro usan una cavidad de tres espejos, lo que proporciona una mejor señal al ruido en comparación a una cavidad con solo dos espejos (Picarro, n.d.).

Las principales ventajas de los sistemas CRDS sobre otros métodos de absorción es que no se ve afectado por las fluctuaciones en la intensidad del láser, y la alta sensibilidad que tiene debido a

la larga distancia de absorción de luz que recorre la muestra gaseosa, ya que la luz se refleja muchas veces en los espejos. Entre sus desventajas se encuentran que el espectro no se puede obtener rápidamente debido a que se utiliza una fuente de laser monocromático (aunque se está empezando a desarrollar el uso de fuentes LED de banda ancha), hay limitaciones en la disponibilidad de luz laser ajustable en la longitud de onda adecuada, y es más cara que otras técnicas espectroscópicas (AcademiaLab, n.d.). Debido a estas características, este tipo de métodos se ha empleado para la detección de gases traza en el ambiente, particularmente GEI como metano (CH_4), CO_2 y N_2O ; gases muy reactivos como amoníaco (NH_3), formaldehído (HCHO), cloruro de hidrógeno (HCl), fluoruro de hidrógeno (HF) y también algunos gases presentes en mayor abundancia como el CO .

4.3.2.6 Pertinencia de incluir nuevas metodologías de medición de contaminantes gaseosos regulados

Resumiendo la recopilación de técnicas de monitoreo para contaminantes gaseosos, todas las técnicas de referencia son continuas debido a que las respectivas normas de calidad incluyen métricas que usan valores horarios de dichas concentraciones ambientales. Luego, no se justifica el uso de técnicas discontinuas en estos casos.

La revisión muestra que, para cada contaminante gaseoso regulado, existe más de una tecnología de referencia aprobada. Estas tecnologías han alcanzado madurez, por lo que se trata de técnicas robustas; sin embargo, su aplicación requiere seguir un protocolo estricto de calibración periódica de los respectivos sensores empleando gases patrones, además de cumplir con los requerimientos ya resumidos para este tipo de monitoreos: ubicación del sitio de muestreo, requerimientos mínimos de la toma de muestras de aire, etc.

Las tecnologías emergentes que se mencionaron en el apartado 4.3.2.5 (sensores de bajo costo, electroquímicos y espectroscópicos avanzados) no están orientadas a monitoreo de cumplimiento normativo, sino más bien al monitoreo de barrido de corto plazo (sensores de bajo costo), a aplicaciones industriales o de corto plazo (sensores electroquímicos) o para el caso de gases traza específicos (no regulados) como es el caso de la tecnología CRDS.

En conclusión, se recomienda mantener las actuales técnicas de monitoreo continuo de referencia ya aprobadas por las agencias ambientales de EE. UU. y Europa, las que están disponibles comercialmente y se han usado extensivamente en el país tanto en la red SINCA como en redes privadas.

Con respecto al uso de sensores de bajo costo, éstos se podrían emplear como técnicas exploratorias para detectar zonas con altas concentraciones, donde posteriormente iniciar un programa de monitoreo regulatorio con equipos continuos.

4.3.3 Monitoreo discreto de Plomo

De acuerdo con la normativa chilena, el monitoreo de plomo se realiza en dos etapas: primero se colecta el material particulado respirable (MP₁₀) en filtros y después se realiza el análisis químico en un laboratorio. En la Sección 7.1 de este informe se presentan las técnicas de análisis de plomo en el MP₁₀.

El muestreo de MP₁₀ se puede realizar en un muestreador de alto, medio o bajo volumen, ya que no existe un protocolo estandarizado para el muestreo de metales desde la toma de la muestra en MP₁₀ hasta su envío al laboratorio. Tampoco se exige un límite mínimo de detección de los equipos que analizan el MP₁₀. Por otro lado, los equipos de muestreo deben estar en la lista de Métodos denominados de Referencia y Equivalentes publicada por la EPA o que cuenten con aprobación de alguna de las agencias de los países miembros de la Comunidad Europea que implementan las directrices del Comité Europeo para Estandarizaciones o equivalente, y deben ser configurados según lo indica el fabricante. La Tabla 4-16 presenta algunos de los equipos reconocidos y certificados por la EPA para muestrear MP₁₀ (U.S. EPA, 2024c).

En la actualidad existen monitores semi-continuos de metales (AyT Grupo, n.d.), como el Xact-625i que mide en forma semi-continua (ciclos de 15, 30, 60 o 120, 180 o 240 minutos) hasta 23 elementos simultáneamente, incluyendo Sb, As, Ba, Cd, Ca Cr, Co, Cu, Fe, Pb, Hg, Mn, Ni, Se, Ag, Sn, Ti, Tl, V y Zn. El sistema utiliza el muestreo continuo sobre cinta de filtro y el análisis de fluorescencia de rayos X dispersivo de energía no destructiva (EDXRF). El aire es muestreado a través de un cabezal selectivo de tamaño de partícula (PM) de volumen bajo (16,7 l / min) y estirado a través de una cinta de filtro. El depósito de PM resultante se hace avanzar en el área de análisis donde la muestra es analizada por EDXRF para metales seleccionados mientras se recoge la siguiente muestra.

Tabla 4-16 Equipos aprobados por la EPA para medir MP₁₀.

Marca	Modelo	Tipo de filtro	Flujo L/min
Met One Instruments, Inc	E-FRM– PM10	Filtro 47 mm PFTE	16,7
Thermo Fisher Scientific Partisol	2000i	Filtro 47 mm	16,7

Fuente: List of designated reference and equivalent methods (U.S. EPA, 2024c).



Figura 4-7 Muestreador de MP₁₀ MetOne E-FRM

Fuente: Elaboración propia



Figura 4-8 Muestreador de MP₁₀ Thermo Fisher Scientific Partisol 2000i

Fuente: Elaboración propia

5. Análisis del origen, comportamiento, tendencia histórica y proyección de la concentración de SO₂, O₃, Pb y CO, a nivel nacional, regional y/o por área de interés incluyendo la actualización y proyección de inventarios de emisión

En este capítulo se presenta análisis del origen, comportamiento, tendencia histórica y proyección de la concentración de SO₂, O₃, Pb y CO, a nivel nacional, regional y/o por área de interés incluyendo la actualización y proyección de inventarios de emisión.

5.1 Síntesis descriptiva de SO₂, O₃, Pb y CO

5.1.1 Plomo

Para la elaboración de la síntesis descriptiva del Plomo se utilizó como referencia el informe “*Overview of Lead (Pb) Air Quality in the United States*” (U.S. EPA, 2022). Se menciona que las emisiones de plomo provienen principalmente de fuentes antropogénicas en forma de partículas de distintos tamaños, aunque en algunas circunstancias el plomo puede emitirse de forma gaseosa, para lo cual se puede esperar que los compuestos de plomo que puedan producirse inicialmente en fase de vapor se condensen en partículas al enfriarse a temperatura ambiente o al oxidarse al mezclarse en la atmósfera.

La distancia que puede llegar a transportarse el Pb unido a partículas va a depender del tamaño de estas. En general, las partículas más grandes tienden a depositarse más rápidamente por lo que recorren distancias más cortas desde la fuente emisora, mientras que las partículas más pequeñas permanecen en fase de aerosol y viajan distancias más largas antes de depositarse. Se puede explicar este fenómeno de transporte como Ley de Stokes. Se usa para describir el movimiento de partículas coloidales bajo un campo eléctrico, en la teoría de la sedimentación, y en el estudio del movimiento de partículas de aerosoles. Si una pequeña esfera, inicialmente en reposo, se deja caer en un fluido viscoso, ya sea líquido o gaseoso, adquiere un movimiento acelerado hasta alcanzar una velocidad constante: la velocidad final. Una vez que se alcanza esta condición de estado estacionario, la suma de todas las fuerzas que actúan sobre la esfera debe ser cero. La fuerza de gravedad actúa sobre el sólido en la dirección de la caída, y las fuerzas de flotación y cinética actúan en la dirección opuesta:

Ecuación 1 Ley de Stokes

$$\frac{4}{3} * \pi * R^3 * \rho_s * g = \frac{4}{3} * \pi * R^3 * \rho * g + 6 * \pi * \eta * R * v_t$$

Al despejar la velocidad final en esta ecuación se obtiene:

Ecuación 2 Velocidad final Ley de Stokes

$$u = \frac{2}{9} * R^2 * (p_s - p) * \frac{g}{v_i}$$

En donde

- u : velocidad terminal de la esfera
- R : radio de la esfera
- p_s : densidad del material de la esfera
- p : densidad del fluido
- g : aceleración de gravedad
- v_i : viscosidad del fluido
- $\frac{2}{9}$: factor constante de las características del fluido

Podemos concluir que la velocidad terminal de la esfera en el fluido depende del radio de la esfera. Entre mayor es el radio, mayor es la viscosidad, por lo que mayor resistencia le ejerce a la partícula, y menor será su velocidad (Bird et al., 2002).

El tamaño es el parámetro más relevante en cuanto al comportamiento de las partículas suspendidas, estas varían entre 0,005 hasta 100 μm . Las partículas finas o ultrafinas varían entre 2,5 y 1 μm , tienen periodos de vida en la atmósfera de días a semanas y recorren distancias de cientos y miles de kilómetros, por lo que tienden a ser más homogéneas en áreas urbanas. Por otro lado, el MP_{10} se puede subdividir en partículas gruesas, finas y ultrafinas. Las partículas gruesas, cuyo diámetro se encuentra entre 2,5 y 10 μm , se depositan en menor tiempo, y tienen una vida media en la atmósfera de minutos u horas, recorriendo distancias menores a 10 km (Rojas & Garibay, 2003).

El Pb ingresa a los ecosistemas a través de vías de deposición atmosférica seca y húmeda, afectando el agua, el suelo, las plantas y los árboles. Una vez que las partículas se depositan en la superficie del suelo, pueden sufrir fenómenos de movimiento o reacciones químicas. Las partículas pueden resuspenderse atmosféricamente o meteorizarse, adsorberse a las partículas del suelo, disolverse parcialmente con iones solubles precipitados como fases minerales, quelarse o ser absorbidas por las raíces de las plantas (Xing et al., 2020).

El uso de la tierra también afecta el comportamiento deposicional de los metales pesados, ya que, en muchos suelos de tierras de cultivo convencionales, las partículas depositadas en la superficie se labran y mezclan con el suelo alcanzando mayor profundidad, lo que reduce las concentraciones globales de plomo en la superficie del suelo. Sin embargo, tanto en la siembra

directa como en las superficies de suelos no agrícolas, la falta de arado mantiene elevadas las concentraciones de plomo y otros metales en la superficie del suelo, así como las características minerales originales de las partículas (Xing et al., 2020). Las partículas que contienen plomo pueden depositarse en la superficie de plantas como sus hojas, y también pueden ingresar al suelo y el plomo es absorbido por las plantas a través de las raíces. Por lo tanto, los cultivos domésticos también pueden contribuir a la exposición de plomo en humanos si los productos se cultivan en suelos con alto contenido de este metal (ATSDR, 2007).

La abundancia relativa de partículas va a depender de la velocidad del viento, de modo que a bajas velocidades se provoca resuspensión de las partículas de mayor diámetro, mientras que con el aumento de la velocidad del viento se resuspenden también las partículas de menor diámetro (EcuRed, n.d.-a). La variación del contenido de plomo en el suelo también puede deberse a factores históricos como la congestión del tráfico en el pasado, la industria y el tipo de suelo (Tiwari et al., 2013).

Los aviones son una gran fuente de emisiones de Pb, debido a la presencia de plomo en el combustible que utilizan. Otras fuentes antropogénicas son la metalurgia, la minería, la quema de combustibles y otros procesos industriales, como también el reciclaje de las baterías de plomo. También es emitido por fuentes naturales como los volcanes, la sal marina, partículas del suelo transportadas por el viento e incendios forestales, aunque su contribución es menor en comparación a las fuentes antropogénicas.

5.1.2 Dióxido de Azufre

La síntesis descriptiva concerniente al SO_2 ha sido elaborada a partir del informe “*Overview of Sulfur Dioxide (SO_2) Air Quality in the United States*” (U.S. EPA, 2023c), que proporciona información detallada y relevante sobre este compuesto químico. Se menciona la relevancia del SO_2 en la química de la capa límite atmosférica y la tropósfera, ya que corresponde a un contaminante primario en fase gaseosa cuando se forma a partir de la combustión de carburantes, además de representar un contaminante secundario cuando es formado a partir de la oxidación fotoquímica de compuestos de azufre como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) o sulfuros metálicos.

El SO_2 presenta una oxidación escalonada por el OH, oxidándose para producir el radical bisulfito (HSO_3), el cual seguido por otra reacción generará SO_3 . La abundancia de vapor de agua en la tropósfera genera que el SO_3 se convierta rápidamente en ácido sulfúrico (H_2SO_4), el cual es extremadamente soluble en agua, por lo que se disolverá rápidamente en la fase acuosa de partículas de aerosol y gotas de nubes. La generación de H_2SO_4 aumenta con el incremento de la humedad relativa y los niveles de O_3 .

La oxidación del SO_2 en fase acuosa implica la disolución de este, seguido por la formación y disociación del ácido sulfuroso (H_2SO_3). En entornos abundantes de NH_3 , el SO_2 está sujeto a una rápida eliminación a través de las gotas de las nubes y niebla, formando en última instancia

sulfato de amonio. Del mismo modo que se elimina de la fase gaseosa disolviéndose en las gotas de las nubes, el SO_2 puede eliminarse por deposición seca sobre superficies húmedas y deposición húmeda a través de la lluvia.

El SO_2 también se adhiere a las partículas de polvo y reacciona con ellas, oxidándose a H_2SO_4 y reaccionando con el glioxal presente en la atmósfera generando oligómeros y compuestos organosulfatos. El proceso anterior se ve potenciado en condiciones de alta humedad, además de que la absorción del SO_2 sobre las partículas de polvo es sensible a la humedad relativa, la composición mineral de la partícula y la disponibilidad de H_2O_2 , el oxidante relevante. Por otro lado, la velocidad de reacción entre el SO_2 y el radical NO_3 es demasiado pequeña para ser importante en la reducción de las concentraciones de SO_2 a escala urbana o regional, lo que también ocurre para la reacción entre el SO_2 y el radical hidropéroxilo (HO_2).

Las emisiones antropogénicas de SO_2 proceden principalmente de fuentes puntuales, ya sea a través de generación de electricidad a partir de carbón, de las fundiciones de cobre, las fábricas de celulosa y papel, las cementeras, las siderúrgicas, las refinerías de petróleo y las plantas de procesamiento químico.

El azufre está presente en todos los combustibles fósiles, especialmente en el carbón, cuyo contenido de azufre varía entre el 0,4 y 4% en masa dependiendo del tipo (los más comunes son antracita, bituminoso, subbituminoso y lignito). Este contenido de azufre se convierte casi por completo en SO_2 durante la combustión, por lo que corresponde a la principal fuente antropogénica de SO_2 primario, mientras que las principales fuentes naturales de SO_2 primario son los volcanes y los incendios forestales. Otras fuentes antropogénicas son las embarcaciones marítimas comerciales, los vehículos de motor, los incendios agrícolas y autorizados. Por otro lado, las industrias químicas, de producción de celulosa y papel, las operaciones de fundición, de acería y los volcanes son fuentes de compuestos de azufre reducido que contribuyen a la formación de SO_2 secundario. Además, el SO_2 natural también puede derivarse de la oxidación de sulfuros emitidos por el océano y suelos húmedos.

5.1.3 Ozono

El ozono troposférico generalmente no es emitido de manera directa por fuentes específicas, sino que se forma en la troposfera a partir de reacciones fotoquímicas en presencia de luz solar involucrando a dos principales contaminantes: los compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NO_x , donde $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) (U.S. EPA, 2023b). Las emisiones de NO_x son responsables de gran parte de la formación de ozono que se produce en las zonas rurales, mientras que en las regiones que tienen mayor densidad poblacional como las ciudades, la formación de O_3 se ve reforzada por las emisiones de COV (Beck et al., 1999). La única otra fuente apreciable de ozono troposférico corresponde al transporte desde la estratosfera.

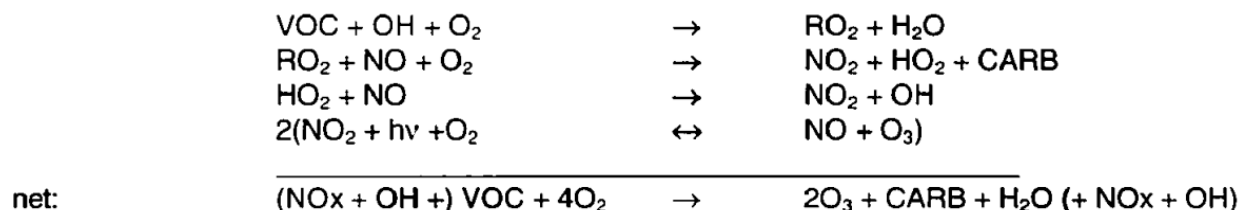
La reacción se ve alterada por la presencia de COV, el radical resultante de la oxidación del metano (CH_4) o una reacción entre el monóxido de carbono (CO) y el radical hidroxilo (OH) en la

atmósfera. Así, las sustancias NO_x, COV y CO se consideran los principales precursores en la formación del ozono troposférico a través de una función compleja y no lineal de muchos factores, entre los que se incluye la intensidad y la distribución espectral de la luz solar; la mezcla atmosférica; las concentraciones de los precursores en el ambiente y sus velocidades de reacción; y el procesamiento de partículas de nubes y aerosoles. (U.S. EPA, 2023b).

Los COV se liberan principalmente por el tráfico rodado y el uso de productos que contienen disolventes orgánicos, mientras que los NO_x y el CO se asocian al transporte y procesos de combustión (Beck et al., 1999). El CH₄ se emite principalmente a partir de fuentes antropogénicas, incluida la producción y el consumo de combustibles fósiles para la energía, la agricultura y los sistemas de eliminación de residuos. Los precursores del ozono también pueden ser emitidos por fuentes naturales como procesos biológicos de organismos vivos y procesos químicos o físicos como la quema de biomasa, rayos y fuentes geogénicas. Se plantean retos adicionales porque gran parte del O₃ es el resultado de reacciones entre precursores antropogénicos y naturales (U.S. EPA, 2023b).

La reacción fotoquímica en cadena que produce al ozono se inicia y se mantiene gracias a los radicales reactivos. En el proceso, se forman otros productos fotoquímicos como el nitrato de peroxiacetilo (PAN), ácido nítrico (HNO₃), ácido sulfúrico (H₂SO₄), y otros compuestos gaseosos como el formaldehído (HCHO), entre muchas otras especies radicales de vida corta. Los COV actúan como “combustible” en el proceso de formación de ozono, mientras que el NO funciona más o menos como un catalizador, ya que se regenera en el proceso de formación. El NO también desempeña un papel clave en la regeneración de los radicales reactivos y en el progreso de las reacciones (Beck et al., 1999).

La fotoquímica simplificada del ozono, que en realidad es un proceso complejo y altamente no lineal, se muestra en la Figura 5-1. En ella se puede ver cómo los radicales hidroxilo (OH) participan en la oxidación de los COVs, generando peróxidos y otros compuestos que contribuyen a la posterior formación del ozono. La luz solar (hν) descompone el dióxido de nitrógeno (NO₂) en óxido nítrico (NO) y un átomo de oxígeno (O), el cual reacciona con el oxígeno molecular (O₂) para formar ozono.



Nota: VOC corresponde a los compuestos orgánicos volátiles, RO₂ es un peróxido orgánico y CARB son compuestos carbonílicos, que desempeñan el papel de los hidrocarburos en etapas posteriores de oxidación. El radical hidroxilo (OH) y el radical hidroperóxido (HO₂) son de vida corta y de gran relevancia en la formación de ozono.

Figura 5-1 Fotoquímica de la formación de ozono de forma simplificada.

Fuente: Beck et al. (1999)

En la Figura 5-2 se presenta un esquema con el proceso de formación de ozono a partir de sus precursores.

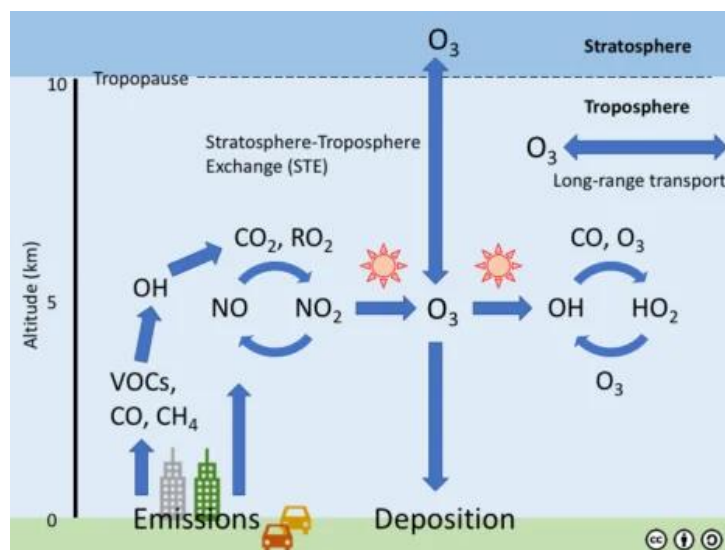


Figura 5-2 Formación de ozono a partir de sus precursores.

Fuente: (LADCO, n.d.)

Las altas concentraciones de NO recién emitido eliminan localmente el O₃, a partir de un proceso de regeneración de NO₂ ($NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$), por lo que cerca de las fuentes de emisión este proceso podría considerarse como un sumidero de ozono. Además, las altas concentraciones de NO₂ desvían el paso de oxidación inicial de los COV formando otros productos (por ejemplo, HNO₃), lo que impide la formación neta de O₃. Debido a estas reacciones, una disminución de NO_x puede conducir a un aumento de O₃ cuando se tienen proporciones COV/NO_x bajas, como ocurre en las ciudades. En este régimen limitado por COV, las reducciones de NO_x generan un aumento del ozono, mientras que el control de las emisiones de COV resulta lo más eficiente para reducir los niveles de ozono de manera local (Beck et al., 1999).

A medida que la masa de aire se aleja de un centro urbano, su relación COV/NO_x cambia debido a reacciones fotoquímicas adicionales, procesos meteorológicos y la aparición de nuevas emisiones. Esto genera que la concentración de NO_x disminuya más rápidamente que la de COV y en consecuencia la relación COV/NO_x aumente, de manera que se tiene un régimen limitado por NO_x, para el cual las medidas que reducen los NO_x se consideran más efectivas al momento de buscar reducir el ozono. Es relevante mencionar que reducciones iniciales y pequeñas de NO_x, en ausencia de reducciones simultáneas en las emisiones de COV, puede ser contraproducente debido a un efecto que se conoce como "fin de semana". Este es un fenómeno observado en algunas ciudades donde los niveles de ozono pueden ser más altos durante los fines de semana a pesar de que las emisiones de NO_x son más bajas. Esto ocurre porque la reducción de NO_x sin una reducción correspondiente en los COV puede alterar la química del aire de manera que aumente la formación de ozono. Por lo tanto, para alcanzar niveles aceptables de ozono, es esencial una reducción significativa de ambos contaminantes (Beck et al., 1999).

Un régimen limitado por NO_x también tiende a ocurrir en condiciones cálidas y soleadas cuando la química de NO_x es relativamente rápida, lo cual es más común durante las horas diurnas en verano, en zonas con altas emisiones de COV biogénicos. Por el contrario, un régimen limitado por COV se puede observar en momentos y lugares con niveles más bajos de luz, lo que provoca una formación fotoquímica más lenta de O_3 , lo que es más común durante las horas nocturnas, en invierno y en zonas urbanas densamente pobladas o en penachos industriales (U.S. EPA, 2023b).

Como se mencionó antes, la formación de ozono está influenciada por factores meteorológicos como la intensidad de la luz solar y la mezcla atmosférica. En el este de EE. UU., los altos niveles de O_3 suelen ocurrir durante sistemas de alta presión de movimiento lento en las estaciones cálidas. Estos sistemas provocan el hundimiento del aire, creando condiciones estables con cielos despejados y vientos ligeros, lo que reduce la mezcla vertical de los precursores del ozono y los concentra cerca de la superficie. La actividad fotoquímica que involucra estos precursores aumenta con temperaturas más altas y mayor disponibilidad de luz solar (U.S. EPA, 2023b).

Las concentraciones de O_3 y otros oxidantes en el este de EE. UU. suelen abarcar áreas extensas, por lo que estos episodios se consideran regionales, aunque también pueden ser más locales debido a fuentes de contaminación específicas en verano. En lugares como Los Ángeles, las barreras montañosas limitan la dispersión del ozono, aumentando la frecuencia y duración de días con altos niveles de O_3 (U.S. EPA, 2023b).

Resultados de recientes estudios de modelización sugieren que la fotólisis de los COV proporciona la fuente de especies químicas necesarias para iniciar la química que impulsa los episodios invernales de altas concentraciones de ozono, lo cual es diferente al mecanismo que impulsa la formación en verano, el cual se inicia con la fotólisis de NO_2 seguida de la formación de radicales OH. Las concentraciones de O_3 en una región se ven afectadas tanto por la formación local como por el transporte de ozono y sus precursores desde zonas situadas a barlovento, lo cual se produce en distintas escalas espaciales (de manera local, regional e incluso transporte internacional). Además, el O_3 puede transferirse a la troposfera desde la estratosfera, rica en O_3 natural, en situaciones con frentes fríos que traen consigo aire estratosférico, lo cual afecta típicamente las áreas de mayor elevación (por ejemplo, sobre los 1500 metros).

5.1.4 Monóxido de Carbono

Para la elaboración de la síntesis descriptiva del Plomo se utilizó como referencia el informe *“Overview of Carbon Monoxide (CO) Air Quality in the United States”* (U.S. EPA, 2023a) En él se menciona que el CO se forma principalmente a partir de la combustión incompleta de combustibles que contienen carbono y por reacciones fotoquímicas en la atmósfera. Una fuente secundaria importante de CO corresponde a la oxidación de COV antropogénico y biogénico, principalmente a partir de la fotooxidación del metano (CH_4) y otros COV, incluidos los

hidrocarburos no metánicos (NMHC) presentes en la atmósfera y las moléculas orgánicas de las aguas superficiales y el suelo. La fotólisis del formaldehído (CH_2O) capaz de generar CO se produce de dos maneras. En una, se obtiene H_2 y CO, mientras que en la otra manera se produce H y HCO, reaccionado este último con O_2 para formar un radical hidroperoxi (HO_2) y CO. También se da que el CH_3O_2 reacciona con el HO_2 formando CH_3OOH y que el CH_2O reacciona con el HO_2 generando pequeñas cantidades de ácido fórmico (CH_2O_2). La eliminación heterogénea de productos intermedios parcialmente solubles en agua, como el CH_3OOH y CH_2O , disminuirá el rendimiento de CO procedente de la oxidación de CH_4 .

La oxidación del CH_3CHO no siempre termina en dos moléculas de CO, ya que a veces cuando reacciona con el OH puede producir CH_3CO , los que reaccionan con el oxígeno formando radicales peroxiacilo, que a su vez pueden reaccionar con óxido nítrico (NO) para formar CH_3 y CO_2 . La cantidad de CO producido por estas vías depende de la concentración de OH y NO, además de la rapidez de la fotólisis de CH_3CHO . Para estimar el rendimiento de CO procedente de la oxidación de hidrocarburos mayores que CH_4 es necesario calcular los rendimientos de CH_2O , CH_3CHO , CH_3CO y radicales análogos procedentes de la oxidación de las moléculas originales.

La principal manera en que el CO se elimina de la atmósfera es reaccionando con el OH y convirtiéndose en CO_2 , junto con la formación de radicales H que se mezclan rápidamente con O_2 para convertirse en HO_2 . Debido a la variación del vapor de agua atmosférico, la concentración de OH y la insolación, el CO tiene una vida fotoquímica más corta cerca de los trópicos y más larga en latitudes altas, especialmente durante el invierno, por lo que se genera un gradiente de concentración entre los hemisferios. En general el tiempo de residencia típico del CO en áreas urbanas es de aproximadamente 16 días, luego del cual suele mezclarse a escalas continentales y mayores.

Las fuentes móviles son la mayor fuente antropogénica de emisiones de CO, aunque varían según la temperatura ambiente y las condiciones de funcionamiento. Durante el arranque en frío se producen importantes emisiones de CO en los vehículos ligeros de gasolina, y estas emisiones se ven aumentadas frente a altas tasas de aceleración, fluctuaciones rápidas de velocidad, el uso de aire acondicionado y demandas de carga de vehículos pesados, como tirar de un remolque o subir una colina empinada. El aumento del contenido de O_2 en el combustible, de la temperatura de combustión o del tiempo de mezcla en la zona de combustión tiende a disminuir la producción de CO. Esto se puede observar en los motores de gasolina en vehículos livianos, los cuales emiten más CO porque suelen funcionar con una mezcla de aire y combustible más equilibrada estequiométricamente, tienen tiempos de residencia más cortos y un enfriamiento muy rápido de los gases de escape, a diferencia de los motores diésel predominantes en vehículos pesados que emiten menos CO fuera del motor porque suelen funcionar con relaciones aire/combustible muy elevadas, lo que favorece la presencia de oxígeno y mejora la combustión del carbono.

Otra fuente importante de emisiones de CO son los incendios forestales, junto a las quemas de campos agrícolas para controlar el crecimiento de plantas no deseadas y las quemas prescritas para gestionar los recursos forestales. Además, las emisiones también pueden venir de la

combustión estacionaria en centrales eléctricas que funcionan en base a combustibles fósiles, dispositivos de calefacción residencial como estufas a leña y de calderas. También contribuyen en las emisiones ciertos procesos industriales como la producción química, la refinación de petróleo y la producción de metales, además de ciertas emisiones naturales provenientes del suelo y las plantas.

5.1.5 Aspectos relevantes de la descripción de contaminantes

De la síntesis descriptiva de los contaminantes destaca la información relacionada con las fuentes emisoras, aunque también resaltan aspectos relacionados con la formación, dispersión y eliminación de contaminantes específicos como el O_3 y CO , permitiendo una visión más completa de la química atmosférica y los procesos que contribuyen a la presencia y variación de estos contaminantes.

Al momento de establecer la norma vigente de plomo se tenía conocimiento de que la fuente emisora principal de este contaminante al aire correspondía a las fuentes móviles, en particular los vehículos que utilizaban gasolina con plomo como combustible. Dado que en la actualidad ya no se utiliza gasolina con plomo en vehículos, la emisión antropogénica se da principalmente por el combustible de aviones, plantas de reciclaje de baterías de plomo, industrias de metalurgia, minería, y otros procesos industriales.

Además de las fuentes emisoras de SO_2 que se mencionan en la normativa primaria vigente (fundiciones de cobre, centrales termoeléctricas a carbón, industrias que utilizan petróleo pesado, transporte marítimo y terrestre), también son fuentes relevantes a considerar las fábricas de celulosa y papel, cementeras, siderúrgicas, refinerías de petróleo, plantas de procesamiento químico y, en menor medida, los incendios agrícolas y autorizados. Por otro lado, las industrias químicas, de producción de celulosa y papel, las operaciones de fundición y de acería también emiten compuestos de azufre reducido, que pueden contribuir a la formación de SO_2 secundario en la atmósfera.

Los precursores principales en la formación del ozono incluyen NO_x , COV , CH_4 y CO , cuya interacción está influenciada por múltiples factores como la intensidad y distribución de la luz solar, la composición atmosférica, las condiciones meteorológicas y la presencia de partículas de nubes y aerosoles. El régimen atmosférico desempeña un papel crucial: en áreas con altas concentraciones de NO_x y bajas de COV , como condiciones cálidas y soleadas o durante el verano, el ozono tiende a aumentar, mientras que en zonas urbanas densamente pobladas o en momentos con menos radiación solar, como en invierno o durante la noche, la formación de ozono se ve limitada. La presencia de barreras montañosas puede agravar este efecto al restringir la dispersión del ozono, aumentando la frecuencia y duración de los días con altas concentraciones de O_3 . Los precursores NO_x , COV y CO son emitidos antropogénicamente en procesos de combustión como vehículos y centrales eléctricas, mientras que el CH_4 proviene principalmente de actividades humanas como la producción y consumo de combustibles fósiles para la energía, la agricultura y la gestión de residuos.

En relación con el CO, se forma principalmente por dos procesos: la combustión incompleta de combustibles que contienen carbono y reacciones fotoquímicas en la atmósfera, como la oxidación de COV. Para su eliminación, el CO reacciona con el radical hidroxilo (OH), transformándose en CO₂. La vida fotoquímica del CO varía según la ubicación geográfica, siendo más corta cerca de los trópicos y más larga en latitudes altas, especialmente durante el invierno. La principal fuente de emisiones corresponde a los vehículos, aunque también son fuentes importantes los incendios forestales y las quemas agrícolas o forestales autorizadas. En menor medida, se generan emisiones en centrales eléctricas que emplean combustibles fósiles, por la calefacción residencial (uso de leña y calderas) y en procesos industriales, como la producción química, la refinación de petróleo y la fabricación de metales.

5.2 Elaboración de ciclos anuales, mensuales, diarios y horarios que muestren la evolución de SO₂, O₃, Pb y CO

Se realizaron los ciclos de concentraciones diarias para cada contaminante, por monitor y por región. Además, se les ajustó una línea de tendencia para evaluar su comportamiento.

Los ciclos diarios muestran la continuidad de la información por estación de monitoreo, la cual varía según el contaminante. También se observa el patrón estacional de las concentraciones, teniéndose valores más altos en los períodos de invierno. Esa información se complementa con los ciclos mensuales y la línea de tendencia asociada.

Dada la cantidad de información, en el Anexo 2 de los anexos digitales se presenta el detalle de los ciclos de las concentraciones por región.

5.3 Diagnóstico de la calidad del aire para SO₂, O₃, Pb y CO

Para realizar el diagnóstico de la calidad del aire se utilizaron mediciones de concentraciones de distintas fuentes de información que se resumen en la Tabla 5-1. Para los contaminantes SO₂, CO y O₃, se utilizaron las mediciones registradas en la página web del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA), que cuenta con una base de datos de concentraciones horarias. Para el caso del plomo, los registros del SINCA eran insuficientes, por lo que se utilizó información proporcionada por la contraparte del estudio, la Subsecretaría del Medio Ambiente, que facilitó distintos documentos con mediciones diarias de plomo en la zona norte y centro del país.

El diagnóstico se realizó para el periodo 2013-2023 de acuerdo con el cumplimiento normativo respecto a la norma vigente. Para cada contaminante y en cada monitor se estimaron los verificadores para cada normativa y contaminante: máximo de una hora, máximo de 8 horas, medias diarias y anuales. Todas las estaciones, a nivel nacional, fueron incluidas en el presente

estudio, de forma de tener un entendimiento a cabalidad de la calidad del aire, más allá de las estaciones con representatividad poblacional o de recursos naturales.

Tabla 5-1 Fuentes de información para el diagnóstico de calidad del aire.

Contaminante	Fuente de información	Región	Periodo de registro
Pb	Monitoreo zona norte del país	Antofagasta	2018-2022
		Atacama	2014-2023
	Monitoreo cercano a fundiciones	Antofagasta	2012-2021
		Atacama	2012-2020
		Valparaíso	2014-2021
		O'Higgins	2014-2021
		Atacama	2021-2023
		Valparaíso	2021-2023
SO ₂ , O ₃ , CO	SINCA	Metropolitana	2016-2023
		Todas las disponibles	2013-2023

(1): En el Anexo 10 Fiscalizaciones SNIFA Pb se detallan los documentos utilizados.

Fuente: Elaboración propia.

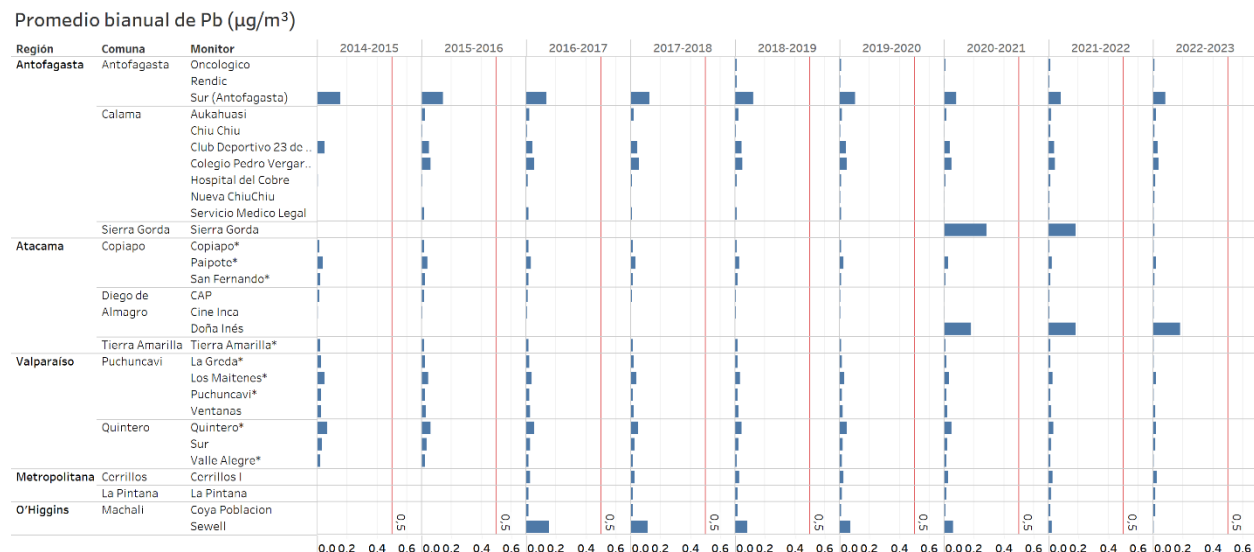
5.3.1 Plomo

A continuación, se muestra el cumplimiento normativo respecto a la norma anual de Plomo. La Figura 5-3 muestra el promedio bianual para las concentraciones anuales de plomo por estación de monitoreo. Se incluye una línea roja de referencia con la norma anual de plomo vigente en el país, la cual corresponde a 0,5 µg/m³N como promedio aritmético de los valores de concentración anual de dos años sucesivos. Se observa que la estación Sierra Gorda en Antofagasta es la que ha registrado niveles más elevados en el último tiempo, pero aun así se mantiene por debajo del estándar actual. Este fenómeno se alinea con los registros de MP₁₀ observados entre los años 2019 y 2021, durante los cuales los promedios anuales excedieron los límites establecidos por la norma⁷. Sin embargo, es relevante señalar que los resultados de los análisis dependen de la metodología de medición, así como los niveles de detección de dichas metodologías. Además, el tipo de muestras empleadas, ya sean compósitos o recolectadas individualmente por filtro, también afectan de distinta manera los resultados. Por ende, para realizar conclusiones acertadas sería necesario realizar un análisis previo de estos aspectos mencionados.

También otras estaciones han registrado valores altos, pero sin infringir la norma, como la estación Doña Inés en la comuna Diego de Almagro (Región de Atacama), la estación Sur en

⁷ Información de acuerdo a "Informe Técnico cumplimiento de norma de calidad del aire por MP₁₀, Red de calidad del aire de Sierra Gorda, Región de Antofagasta". Elaborado por Sección de Calidad del Aire y Cambio Climático, División de Fiscalización y Conformidad Ambiental, Superintendencia del Medio Ambiente, Marzo 2022.

Antofagasta y Sewell en la Región de O'Higgins, aunque las últimas dos han disminuido sus niveles en los años más recientes.



* Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional.

Figura 5-3 Análisis de cumplimiento norma anual de plomo.

Fuente: Elaboración propia a partir de información proporcionada por la SMA.

5.3.2 Dióxido de azufre

La norma primaria para SO_2 considera concentraciones horarias, diarias y anuales. Desde la Figura 5-4 hasta la Figura 5-6 se muestra el cumplimiento normativo para cada caso.

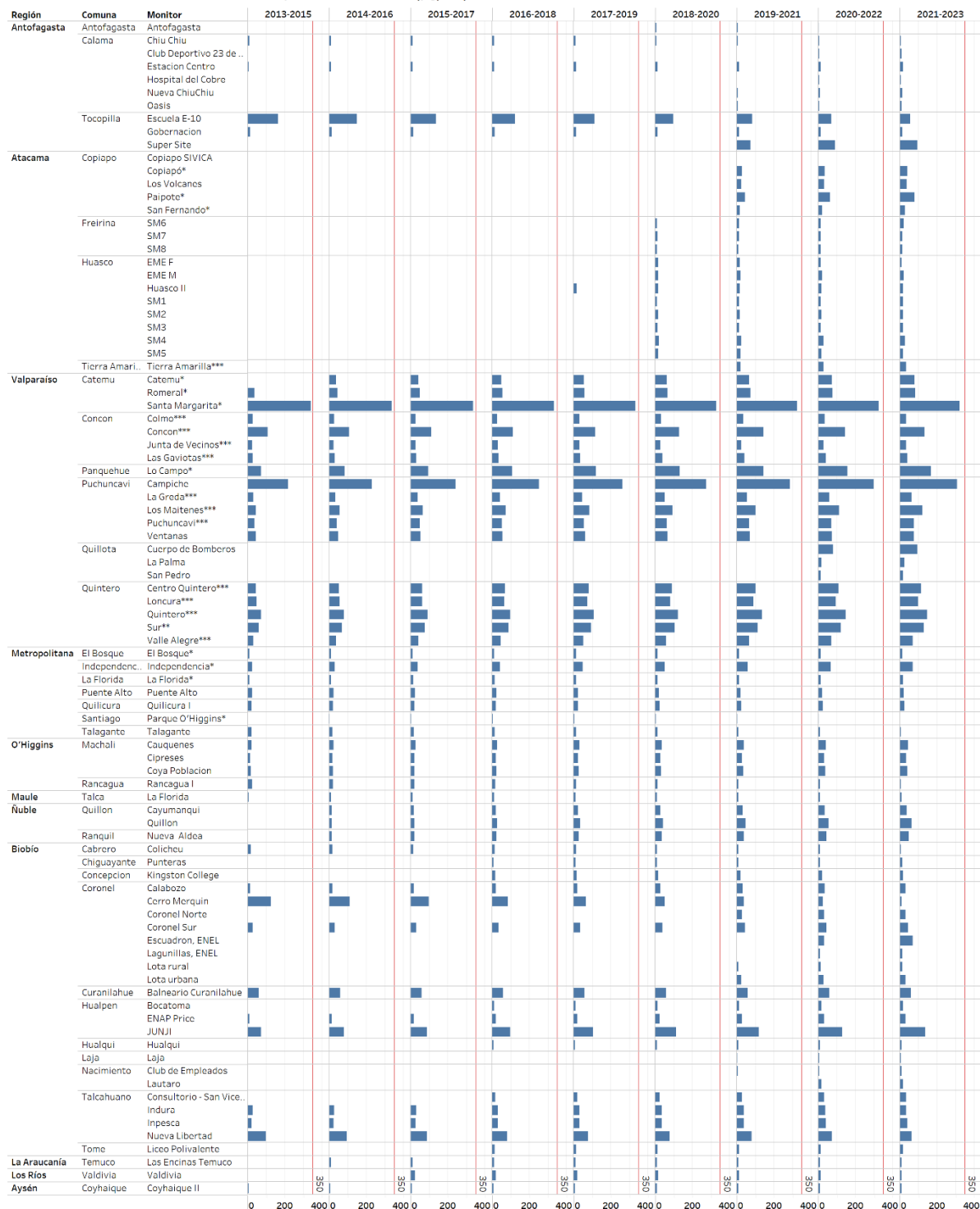
La Figura 5-4 muestra el promedio trianual para el percentil 99 de las concentraciones horarias de SO_2 por estación de monitoreo. Se incluye una línea roja de referencia con la norma horaria vigente en el país, la cual corresponde a $350 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ como promedio aritmético de tres años sucesivos, del percentil 99 de los valores de las concentraciones de 1 hora registrados durante un año calendario. Se observa que en general, los niveles de SO_2 son buenos, y que en ningún caso se supera la norma nacional, aunque en las comunas de Catemu y Puchuncaví los promedios son altos.

La Figura 5-5 muestra el promedio trianual para el percentil 99 de las concentraciones diarias de SO_2 por estación de monitoreo. Se incluye una línea roja de referencia con la norma diaria vigente en el país, la cual corresponde a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ como promedio aritmético de tres años sucesivos, del percentil 99 de los valores de las concentraciones de 24 horas registradas durante un año calendario. Se vuelve a observar que en Catemu y Puchuncaví se dan los niveles más altos de SO_2 , donde la estación Campiche en Puchuncaví superó la norma nacional para el año 2023 y la estación Santa Margarita en Catemu la superó durante el 2015 y 2016. Sin embargo, dado que la norma vigente se publicó en 2019, desde esa fecha solamente la estación Campiche, que no

cuenta con representatividad poblacional, ha incumplido la norma. Por otro lado, si comparamos con el valor guía establecido por la OMS ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se observan varias estaciones que estarían superando dicho valor en los últimos años, como Tocopilla, Catemu, Concón, Puchuncaví, Quillota, Quintero, Independencia, Quillón, Coronel, Curanilahue y Hualpén.

La Figura 5-6 muestra el promedio trianual de las concentraciones anuales de SO_2 por estación de monitoreo. Se incluye una línea roja de referencia con la norma anual vigente en el país, la cual corresponde a $60 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ como promedio aritmético de los valores de concentración anual de tres años calendarios sucesivos. Se vuelve a observar niveles altos en Catemu y Puchuncaví, y durante los últimos años se aprecia un incremento en el promedio de la estación Independencia en la Región Metropolitana. Sin embargo, en ningún caso se supera la norma nacional desde su entrada en vigor.

P.99 concentraciones horarias de SO₂, promedio trianual (µg/m³)



* Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional.

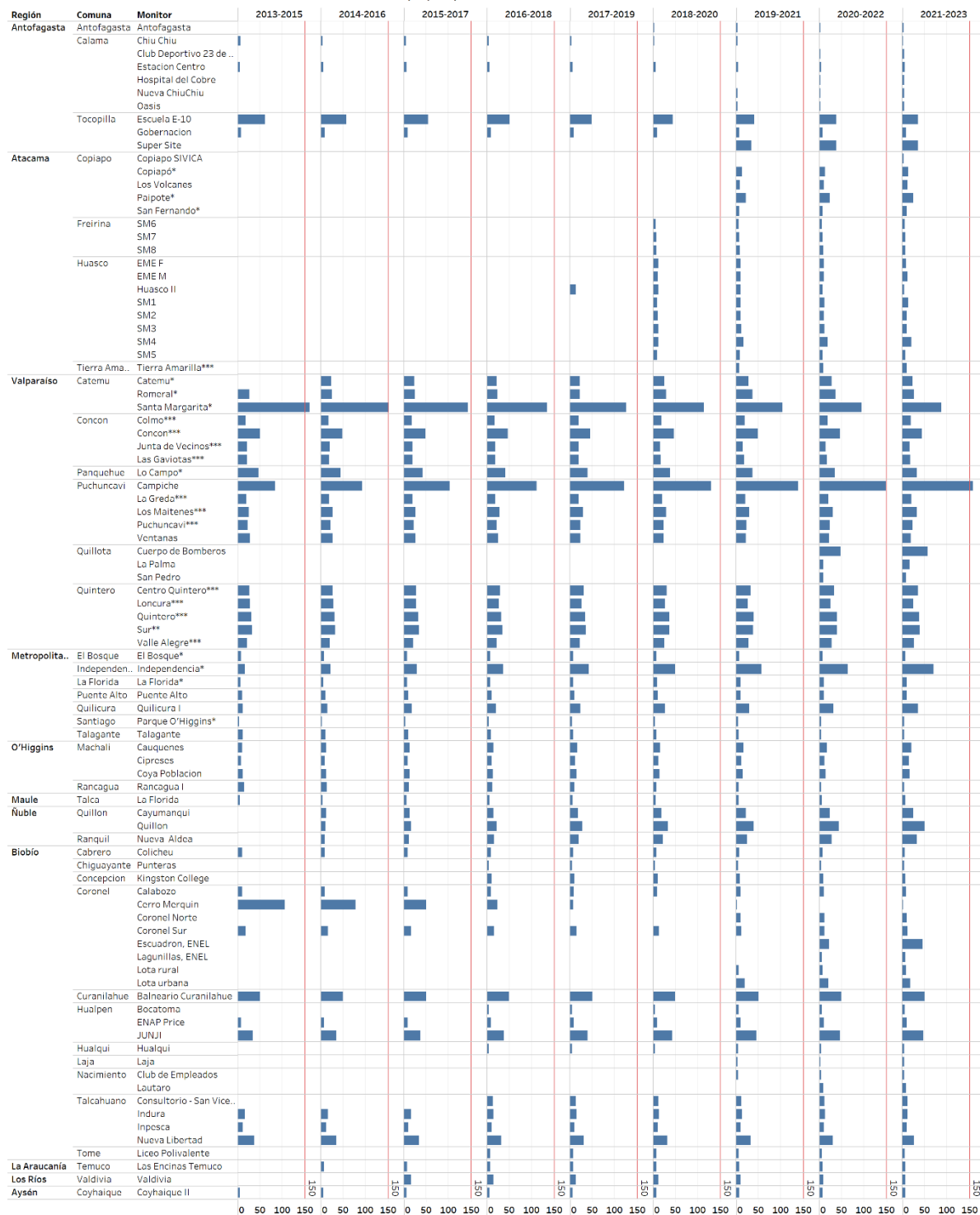
** Corresponde a una estación monitora con representatividad de recursos naturales.

*** Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional y también con representatividad de recursos naturales.

Figura 5-4 Análisis de cumplimiento de la norma horaria de SO₂.

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

P.99 concentraciones diarias de SO₂, promedio trianual (µg/m³)



* Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional.

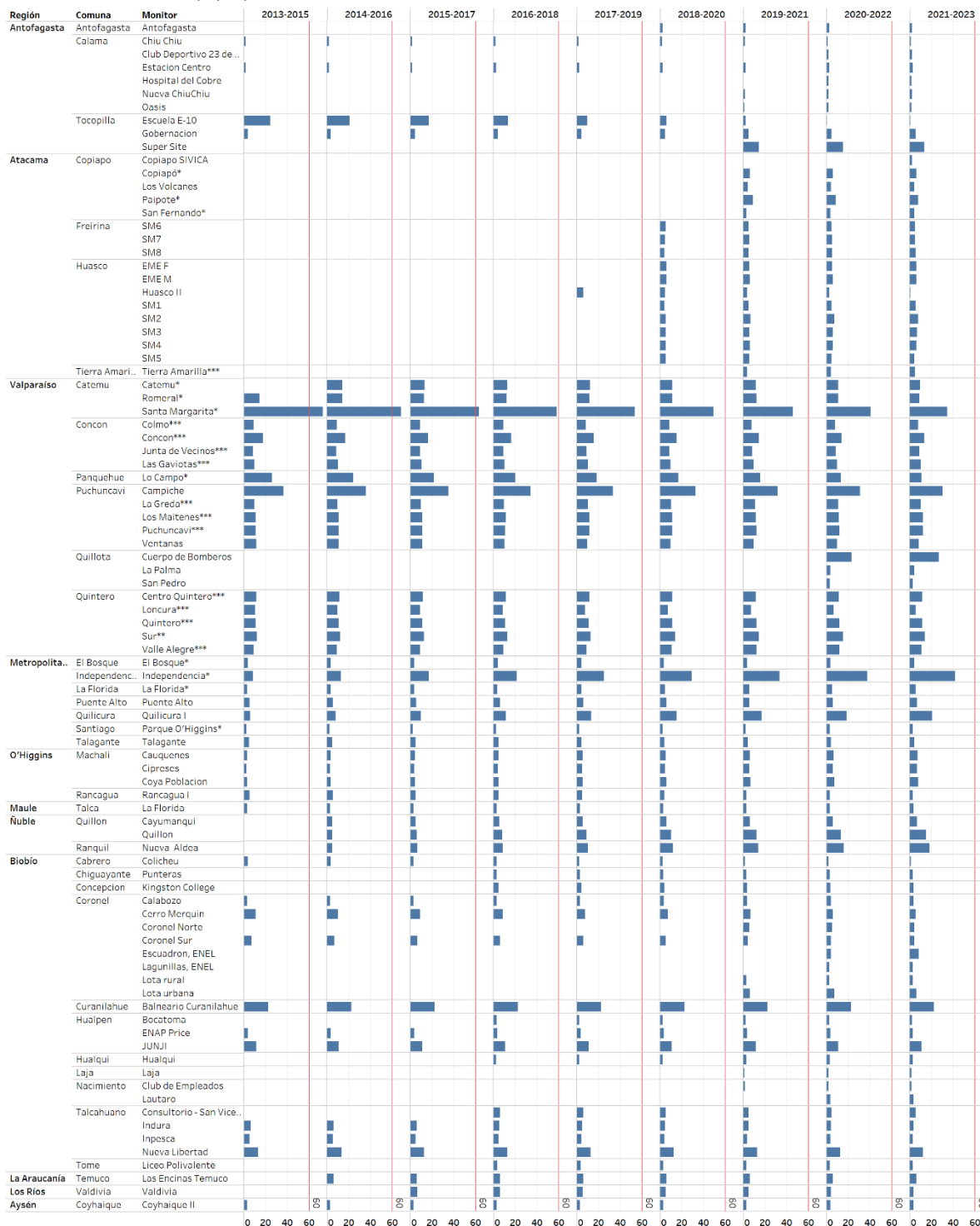
** Corresponde a una estación monitora con representatividad de recursos naturales.

*** Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional y también con representatividad de recursos naturales.

Figura 5-5 Análisis de cumplimiento de la norma diaria de SO₂.

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

Promedio trianual de SO₂ (µg/m³)



* Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional.

** Corresponde a una estación monitora con representatividad de recursos naturales.

*** Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional y también con representatividad de recursos naturales.

Figura 5-6 Análisis de cumplimiento de la norma anual de SO₂.

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

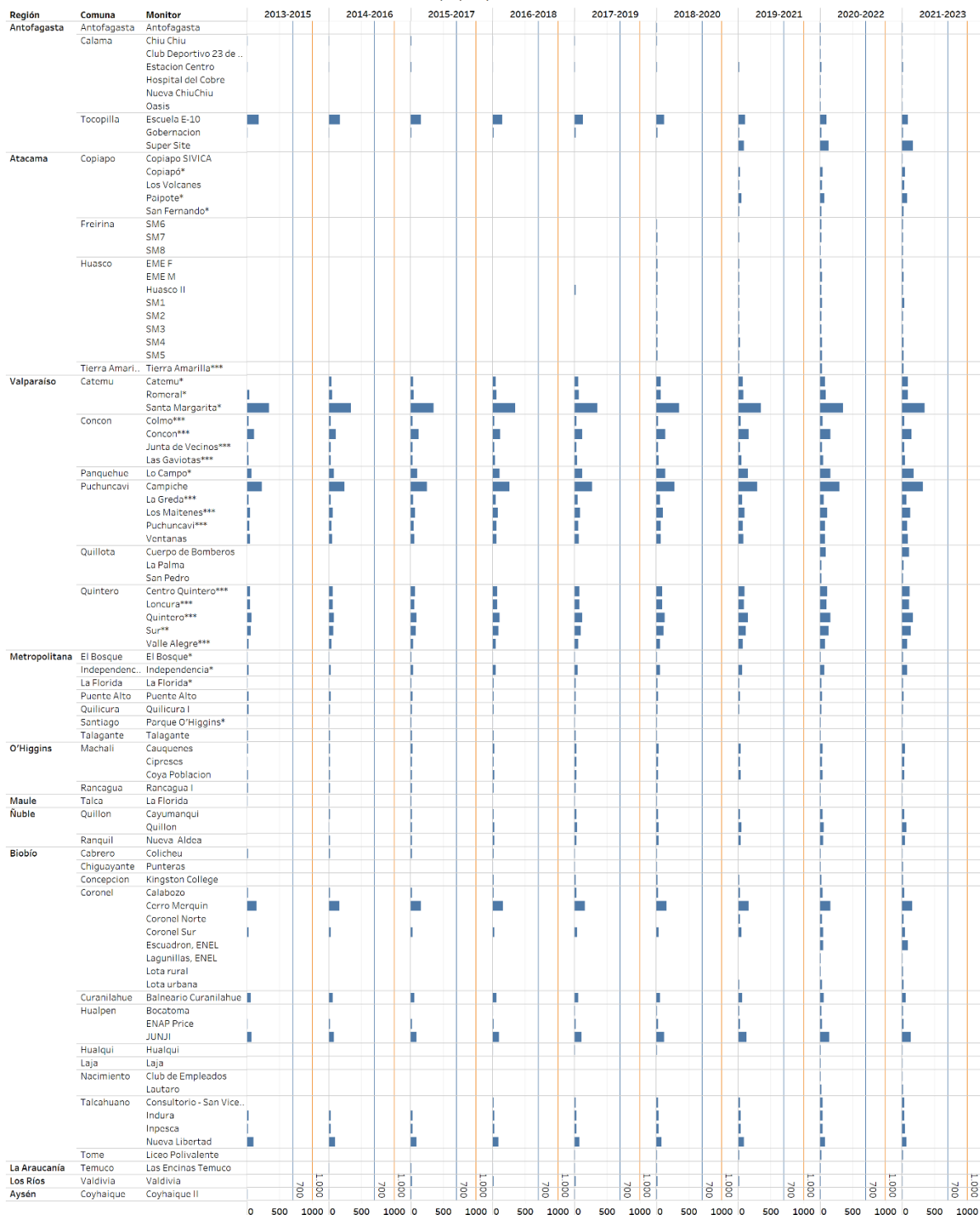
Respecto a la norma secundaria de SO₂, ésta también considera concentraciones horarias, diarias y anuales. A partir de la Figura 5-6 se puede evaluar el cumplimiento de la norma anual, que establece como promedio aritmético de los valores de concentración anual de tres años calendarios sucesivos, un valor límite de 80 µg/m³N para la zona norte del país y 60 µg/m³N para la zona sur⁸. Como se vio anteriormente, en ningún caso se superó la norma primaria anual de 60 µg/m³N, por lo que tampoco se habría superado la norma secundaria de 1 año en ninguna de las dos zonas del país.

Por otro lado, la Figura 5-7 muestra el promedio trianual para el percentil 99,73 de las concentraciones horarias de SO₂ por estación de monitoreo. Se incluye una línea naranja de referencia con la norma horaria vigente en el país para la zona norte, la cual corresponde a 1.000 µg/m³N, y en color azul el valor establecido para la zona sur, de 700 µg/m³N. Se observa que en ningún caso se supera la norma, y nuevamente destaca Catemu, Puchuncaví y Quintero entre las comunas con los promedios más altos.

La Figura 5-8 muestra el promedio trianual para el percentil 99,7 de las concentraciones diarias de SO₂ por estación de monitoreo. Se incluye una línea naranja de referencia con la norma diaria vigente en el país para la zona norte, la cual corresponde a 365 µg/m³N, y en color azul el valor establecido para la zona sur, de 260 µg/m³N. Se vuelve a observar que en Catemu y Puchuncaví se dan los niveles más altos de SO₂, sin embargo, en ningún caso se llega a superar la norma de 24 horas.

⁸ Considerando la definición del límite entre las zonas, establecido en el D.S. N° 22 de 2009 de MINSEGPRES, para simplificar el análisis de cumplimiento normativo se estableció como Zona Sur a partir de la región del Libertador Bernardo O'Higgins, incluyéndola en su totalidad.

P.99,73 concentraciones horarias de SO₂, promedio trianual (µg/m³)



* Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional.

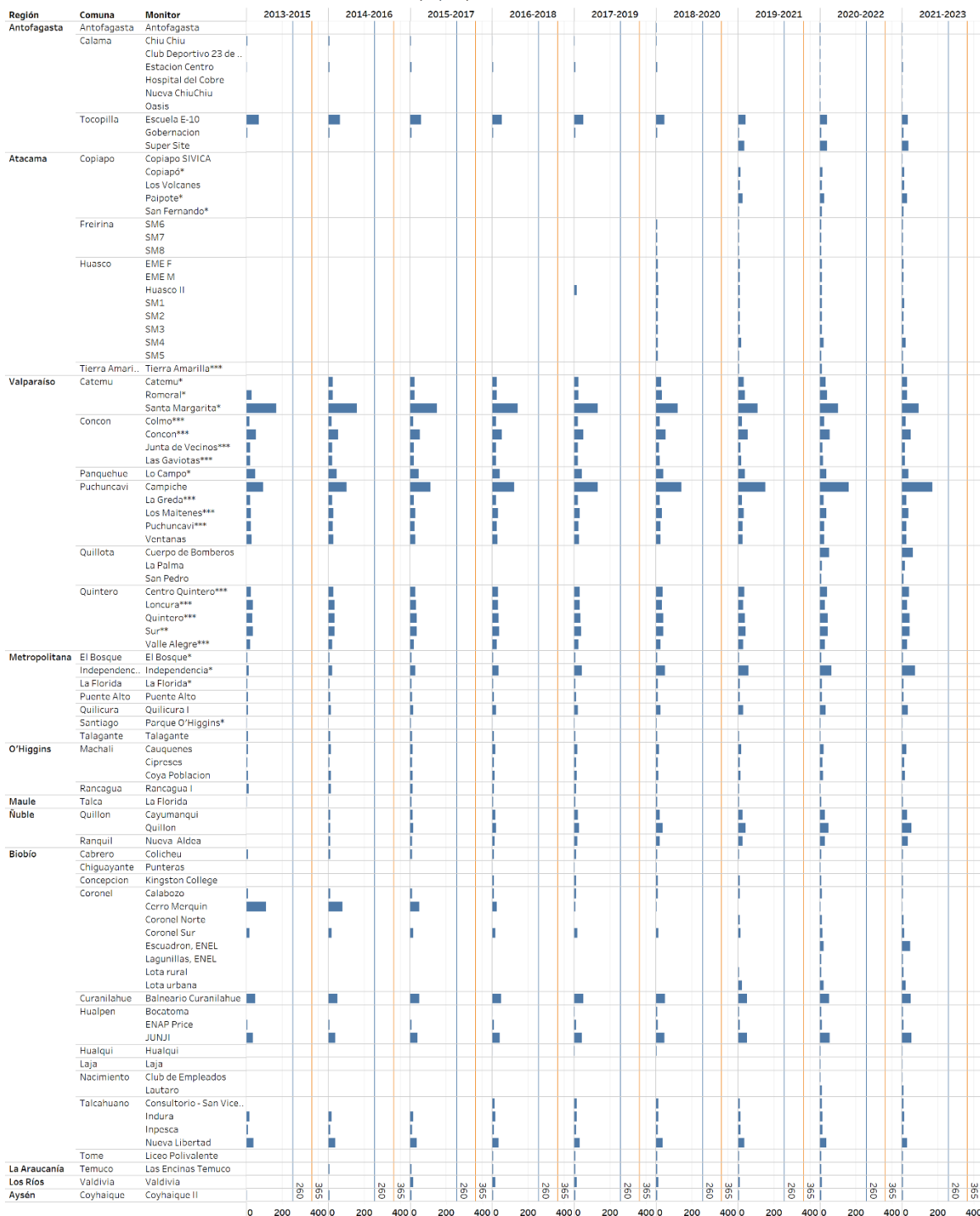
** Corresponde a una estación monitora con representatividad de recursos naturales.

*** Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional y también con representatividad de recursos naturales.

Figura 5-7 Análisis de cumplimiento de la norma secundaria de 1 hora SO₂.

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

P.99,7 concentraciones diarias de SO₂, promedio trianual (µg/m³)



* Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional.

** Corresponde a una estación monitora con representatividad de recursos naturales.

*** Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional y también con representatividad de recursos naturales.

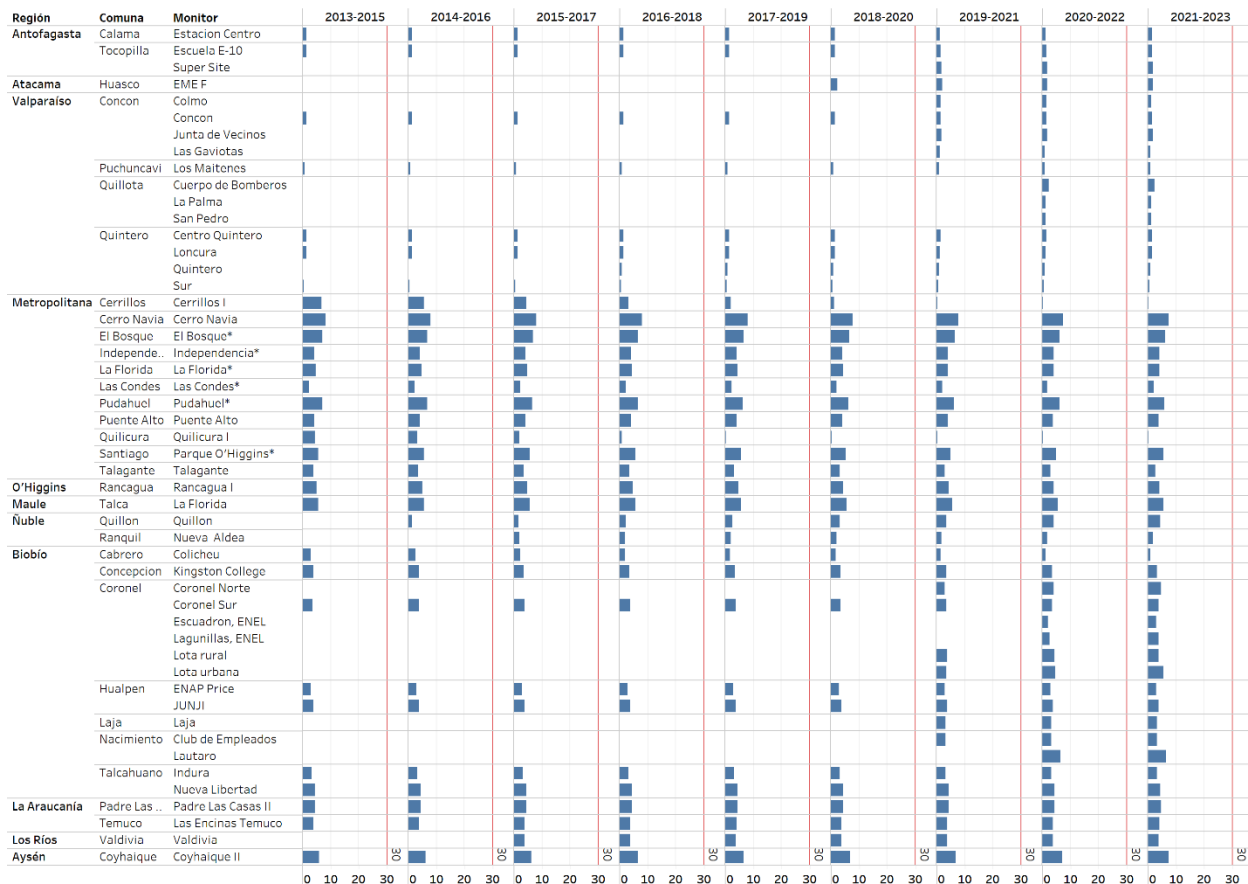
Figura 5-8 Análisis de cumplimiento de la norma secundaria de 24 horas SO₂.

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

5.3.3 Monóxido de carbono

En el caso del CO la norma se aplica para los máximos de 8 horas y de 1 hora. La Figura 5-9 muestra el promedio trianual para el percentil 99 de los máximos diarios de las concentraciones horarias de CO por estación de monitoreo. Se incluye una línea roja de referencia con la norma horaria vigente en el país, la cual corresponde a 30 mg/m³N como promedio aritmético de tres años sucesivos, del percentil 99 de los máximos diarios de concentración de 1 hora registrados durante un año calendario. Se observa que en ningún caso se supera la norma nacional y los niveles de CO son buenos, sin existir zonas que muestren concentraciones elevadas.

P.99 máximos diarios de concentraciones horarias de CO, promedio trianual (mg/m³)



* Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional.

Figura 5-9 Análisis de cumplimiento de la norma horaria de CO.

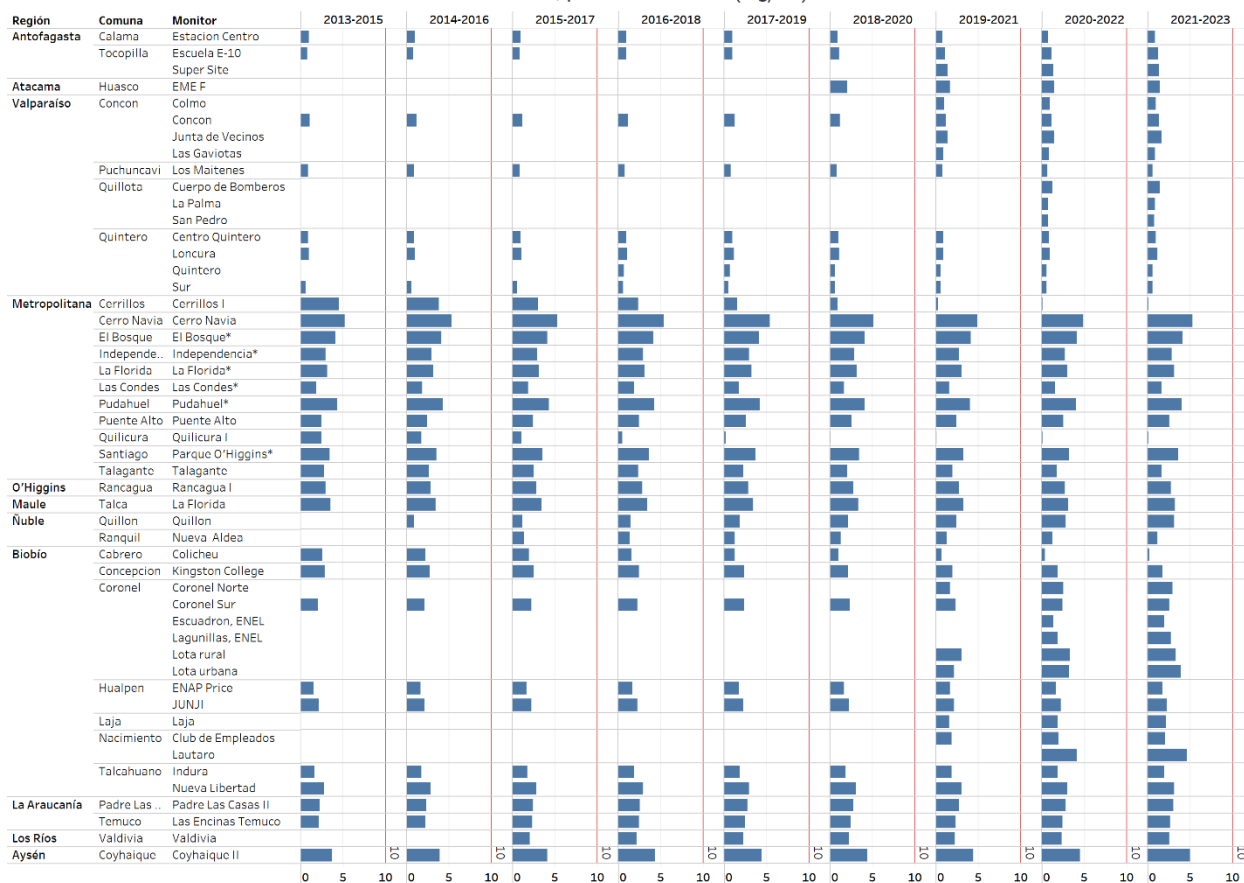
Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

La Figura 5-10 muestra el promedio trianual para el percentil 99 de los máximos diarios⁹ de las concentraciones octohorarias de CO por estación de monitoreo. Se incluye una línea roja de referencia con la norma horaria vigente en el país, la cual corresponde a 10 mg/m³N como promedio aritmético de tres años sucesivos, del percentil 99 de los máximos diarios de

⁹ O del cuarto nivel más alto de los máximos de 8 horas.

concentración de 8 horas registrados durante un año calendario. Nuevamente se observa que en todas las comunas del país los niveles de concentración se mantienen por debajo de la norma actual. Sin embargo, se logra apreciar que el monitor Cerro Navia, en la Región Metropolitana, y el monitor Coyhaique II en la Región de Aysén, históricamente han presentado los mayores niveles de concentración.

P.99 máximos diarios de concentraciones octohorarias de CO, promedio trianual (mg/m³)



* Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional.

Figura 5-10 Análisis de cumplimiento de la norma octohoraria de CO.

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

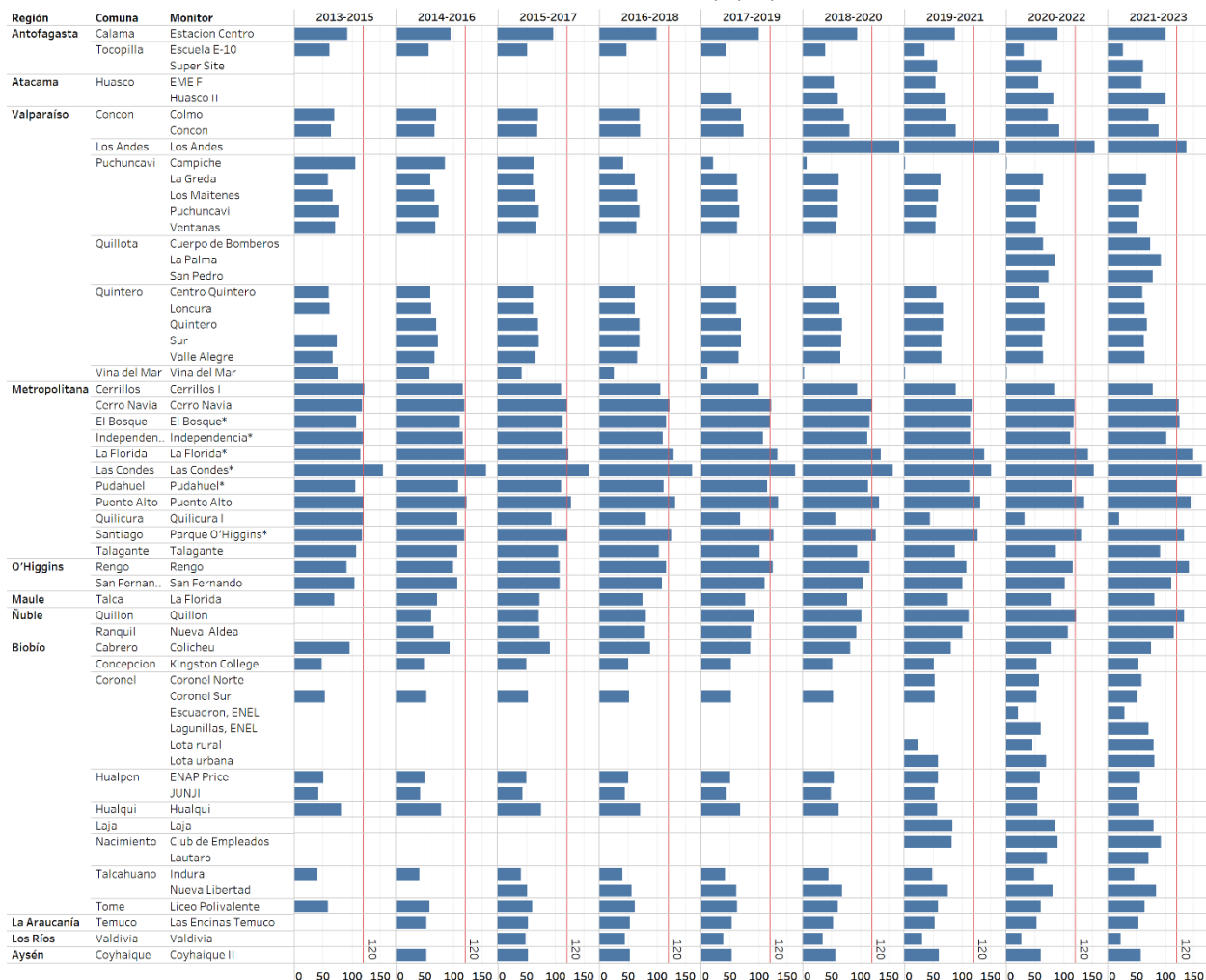
5.3.4 Ozono

La norma nacional para O₃ considera concentraciones máximas de 8 horas. La Figura 5-11 muestra el promedio trianual para el percentil 99¹⁰ de los máximos diarios de las concentraciones octohorarias de O₃ por estación de monitoreo. Se incluye una línea roja de referencia con la norma horaria vigente en el país, la cual corresponde a 120 µg/m³N como promedio aritmético de tres años sucesivos, del percentil 99 de los máximos diarios de concentración de 8 horas registrados durante un año calendario. Se observa que la Región Metropolitana presenta los niveles más elevados, incumpliendo cada año la norma establecida. También se ha incumplido la

¹⁰ O del cuarto nivel más alto de los máximos de 8 horas.

norma en Rengo (Región de O'Higgins) durante los años 2019 y 2023, en Quillón (Región de Ñuble) durante los años 2022 y 2023, y en Los Andes (Región de Valparaíso) desde el año 2020 en adelante.

P.99 máximos diarios de concentraciones octohorarias de O₃, promedio trianual (µg/m³)



* Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional.

Figura 5-11 Análisis de cumplimiento de la norma octohoraria de O₃.

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

5.3.5 Zonas de interés

A partir del análisis realizado en las secciones previas, se pudo ver que existen zonas que históricamente, o en el periodo de los últimos años, presentan niveles elevados de concentración para uno o más contaminantes. Estas zonas son de especial interés para continuar el análisis en las secciones posteriores y mantener su monitoreo futuro. De esta manera, a partir de la evolución de la tendencia de los contaminantes (Anexo 2) y el análisis de cumplimiento normativo, se definieron zonas de interés por cada contaminante (ver Tabla 5-2). En este último

caso, se consideró comuna de interés cuando presentaba concentraciones cercanas (más del 60% del valor establecido) o superiores a la norma de calidad del aire. Además, se incluye Copiapó, Tierra Amarilla y Machalí en las zonas de interés para el SO₂ debido a la presencia de fuentes emisoras relevantes, principalmente asociadas a la minería y fundiciones. Si bien existen otras comunas que también presentan fuentes emisoras significativas para este contaminante, como Diego de Almagro por la División Salvador de CODELCO, no cuentan con información en línea de las estaciones de monitoreo, necesario para etapas posteriores de este informe, por lo que no se incluyen como zona de interés.

Tabla 5-2 Zonas de interés por contaminante.

Contaminante	Región	Zona de interés	Comuna
SO ₂ primario y secundario	Antofagasta	Tocopilla	Tocopilla
	Atacama	Copiapó	Copiapó ⁽¹⁾
		Copiapó	Tierra Amarilla ⁽²⁾
	Valparaíso	Puchuncaví	Puchuncaví ⁽²⁾
		Catemu	Catemu ⁽¹⁾
		Puchuncaví	Quintero ⁽²⁾
	O'Higgins	Machalí	Machalí
	Biobío	Coronel	Coronel
O ₃	Atacama	Huasco	Huasco
	Valparaíso	Los Andes	Los Andes
		Quillota	Quillota
		Concón	Concón
	Metropolitana	Santiago	Todas ⁽¹⁾
	O'Higgins	Rengo	Rengo
		San Fernando	San Fernando
Pb	Antofagasta	Sierra Gorda	Sierra Gorda

(1): Posee estaciones monitoras con representatividad poblacional.

(2): Posee estaciones monitoras con representatividad poblacional y también con representatividad de recursos naturales.

Fuente: Elaboración propia.

5.4 Relación concentraciones de SO₂, O₃, Pb y CO con sus principales fuentes emisoras para elaboración de inventario

En base a los datos de las emisiones al aire del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) se realiza un análisis con la información recopilada desde los años 2008 a 2022 para las emisiones de fuentes puntuales y desde los años 2008 a 2021 para las emisiones de transporte en ruta. Se entregarán las principales características de las fuentes emisoras en todo el país, caracterizándolas por rubro, ubicación geográfica y tipo de contaminante para fuentes puntuales y en el caso de fuentes móviles se caracterizará los principales tipos de vehículos emisores. A continuación, se presenta el análisis por tipo de emisión. Además, se entrega el inventario de emisiones para el año 2019, representado a través de mapas regionales con las respectivas emisiones para cada contaminante.

5.4.1 Fuentes puntuales

5.4.1.1 Análisis emisiones históricas de fuentes puntuales

Para realizar el inventario de fuentes puntuales a nivel país se analizó la información desde 2008 a 2022 de los datos públicos en el RETC. En la Tabla 5-3 se muestran las emisiones totales de fuentes puntuales por contaminantes cada año a lo largo del país y en la Figura 5-12 se muestra la evolución de las emisiones de SO₂, NO_x y CO en el tiempo. La Figura 5-13 muestra la tendencia de emisiones para Pb. Se excluyen los datos del año 2022 para mejorar la visualización, ya que éstos son significativamente más altos.

Tabla 5-3 Emisiones de fuentes puntuales a nivel país por contaminante (kton/año)

Contaminante	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
CO	60	61	64	70	73	63	123	128	131	132	126	108	119	153	193
NO _x	131	143	147	160	168	124	138	104	100	95	83	106	184	132	1.038
SO ₂	344	324	297	318	235	215	144	148	339	296	271	119	71	120	5.358
Pb	0,059	0,092	0,044	0,085	0,075	0,054	0,129	0,098	0,004	0,096	0,020	0,025	0,078	0,454	0,811

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC¹¹

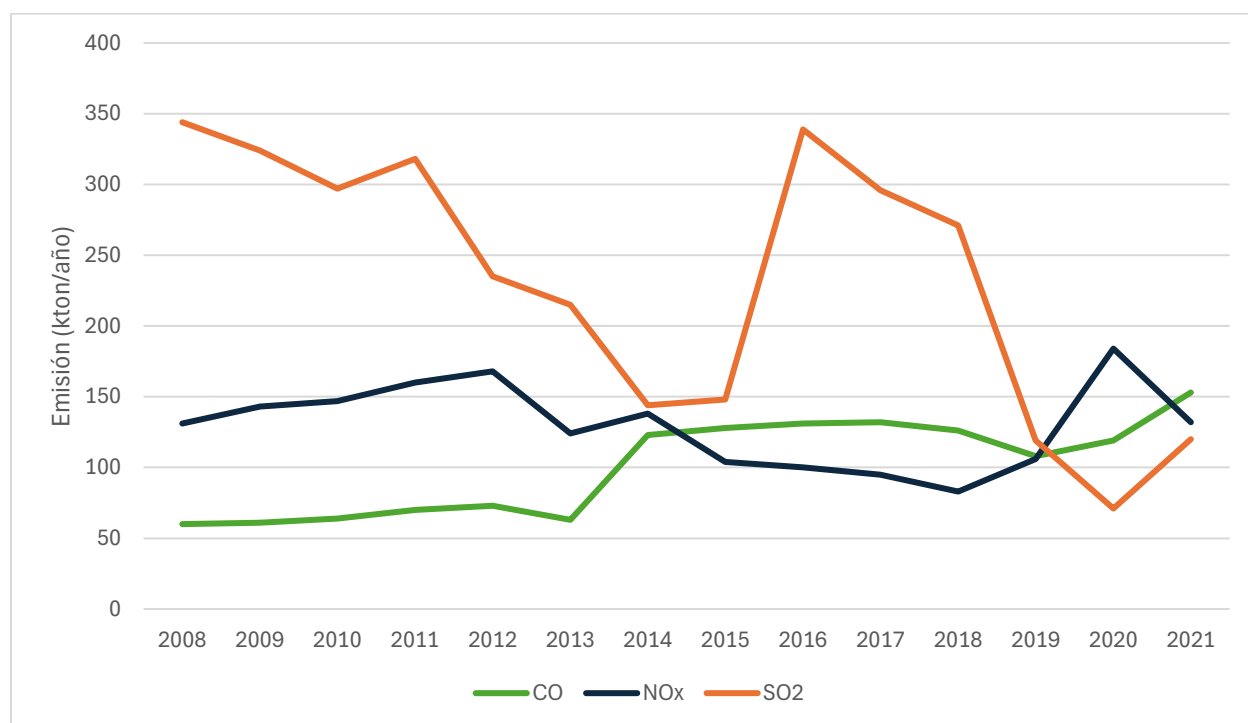


Figura 5-12 Evolución de las emisiones de fuentes puntuales para SO₂, NO_x y CO (kton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

¹¹ Obtenidas de <https://datosretc.mma.gob.cl/dataset/emisiones-al-aire-de-fuente-puntuales>

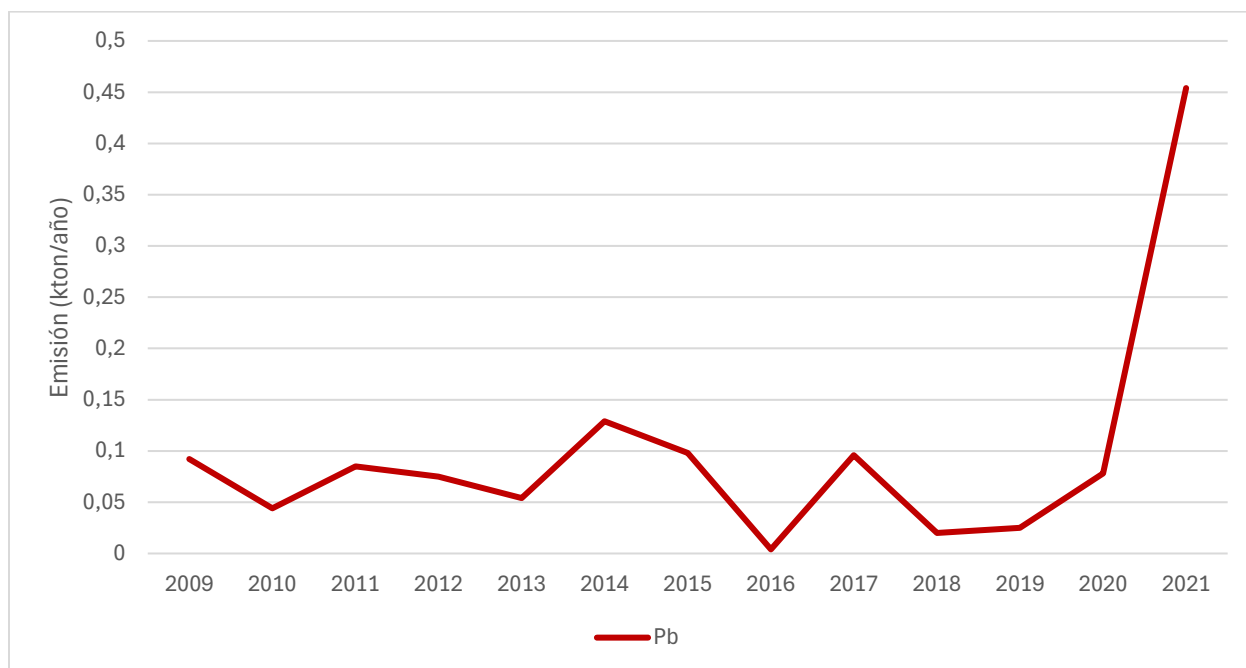


Figura 5-13 Evolución de las emisiones de fuentes puntuales de Pb (kton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

Para observar la participación de cada rubro en el inventario emisiones se realizó una clasificación por sector, en el que se asignó cada rubro designado en el RETC a un sector determinado. En la Tabla 5-4 se muestra la clasificación. El rubro es una agrupación interna elaborada por el RETC de actividades económicas de los establecimientos registrados en Ventanilla Única.

Tabla 5-4 Clasificación de Rubro RETC por sector

Sector	Rubro RETC
Comercio	Comercio mayorista
	Comercio minorista
	Ventas y mantención de vehículos automotores
Construcción	construcción
Energía	Otras centrales de generación eléctrica
	Refinería de petróleo
	Termoeléctricas
Industria	Industria de la madera y silvicultura
	Industria del papel y celulosa
	Industria química, de plástico y caucho
	Otras industrias manufactureras
	Producción de cemento, cal y yeso
Minería	Minería
NA	Establecimiento que no tiene rubro identificado en la base de datos
Otras	Otras actividades
Residuos	Captación, tratamiento y distribución de agua
	Gestores de residuos
	Plantas de tratamiento de aguas servidas
Recursos Naturales (RRNN)	Pesca y acuicultura
	Producción agropecuaria

Fuentes Elaboración propia

De esta forma, se presenta la evolución de emisiones por contaminante y sector. En la Figura 5-14 se muestra la evolución de emisiones por sector para el contaminante SO₂, Figura 5-15 para el NO_x, en la Figura 5-16 para el Pb y Figura 5-17 para el CO.

En las figuras se observan diferencias significativas de emisiones entre los años 2013 – 2014 y 2020 – 2022. Estos saltos en las emisiones se deben a varios hitos. En el año 2014 entró en vigor el registro de ventanilla única generando un único identificador para cada establecimiento que reporta en el RETC, en esta instancia hay cambios en la cuantificación de establecimientos. En el 2019 en tanto, se realizó un cambio en la metodología de cuantificación de emisiones, se ejecuta un nuevo proceso de registro de las fuentes emisoras realizando nuevos códigos únicos para las fuentes por lo que no se puede deducir una total continuidad.

El cambio más notorio se observa en las emisiones de NO_x, SO₂ y Pb del año 2021 al 2022. Una de las razones de la variación se debe principalmente a que el sistema de registro es auto declarativo, los establecimientos auto reportan sus emisiones, es decir que la base de los datos de aire es estimada con consumos de combustibles declarados por los regulados. Además, el año 2022 aún no ha sido sometido al proceso de validación de información por parte de los usuarios ni al procesamiento de datos por parte del RETC, por lo que la información aún no está validada para ser procesada.

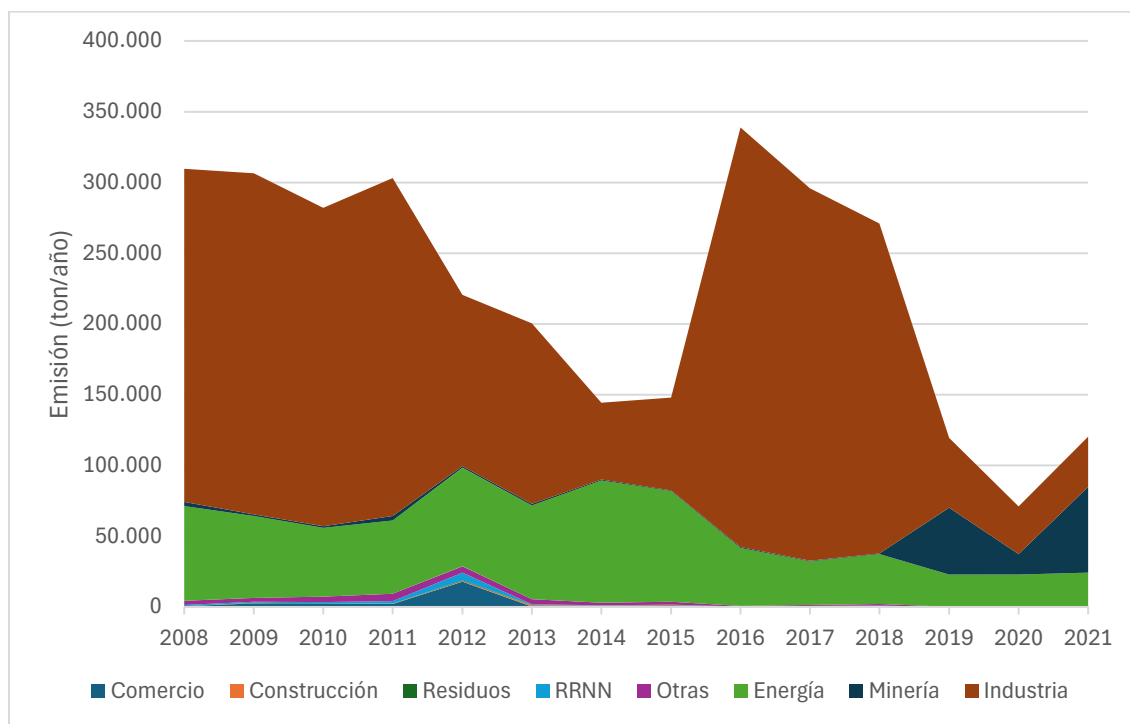


Figura 5-14 Evolución de emisiones de SO₂ de fuentes puntuales por Sector (ton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

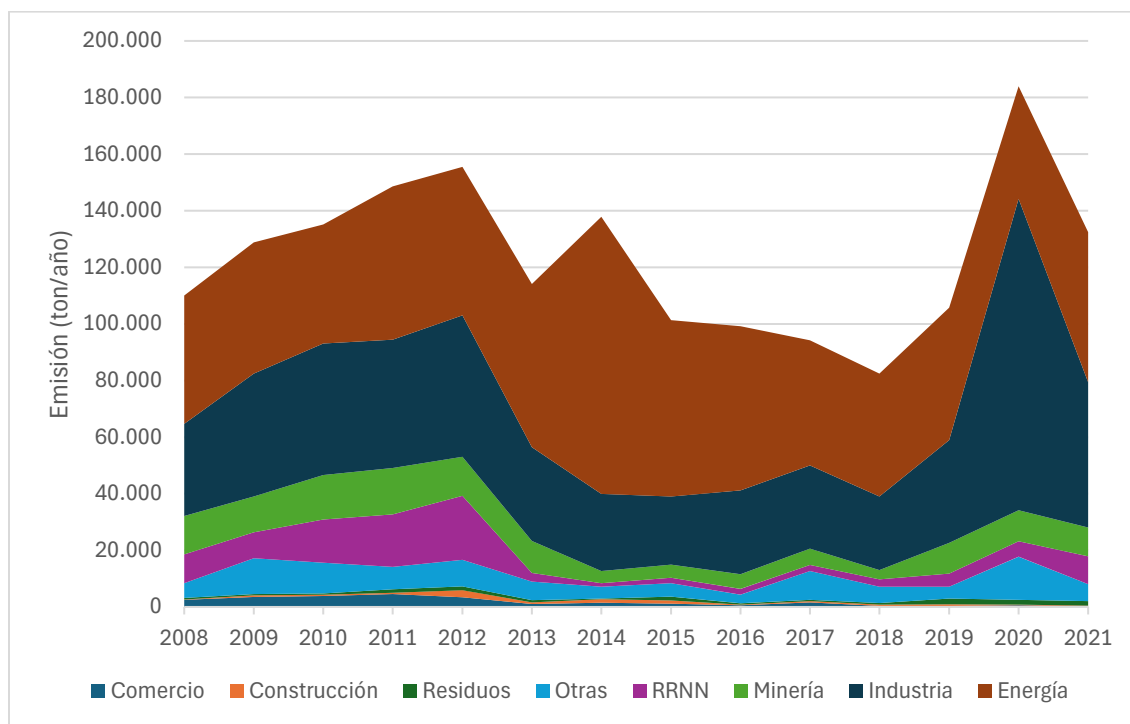


Figura 5-15 Evolución de emisiones de NO_x de fuentes puntuales por Sector (ton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

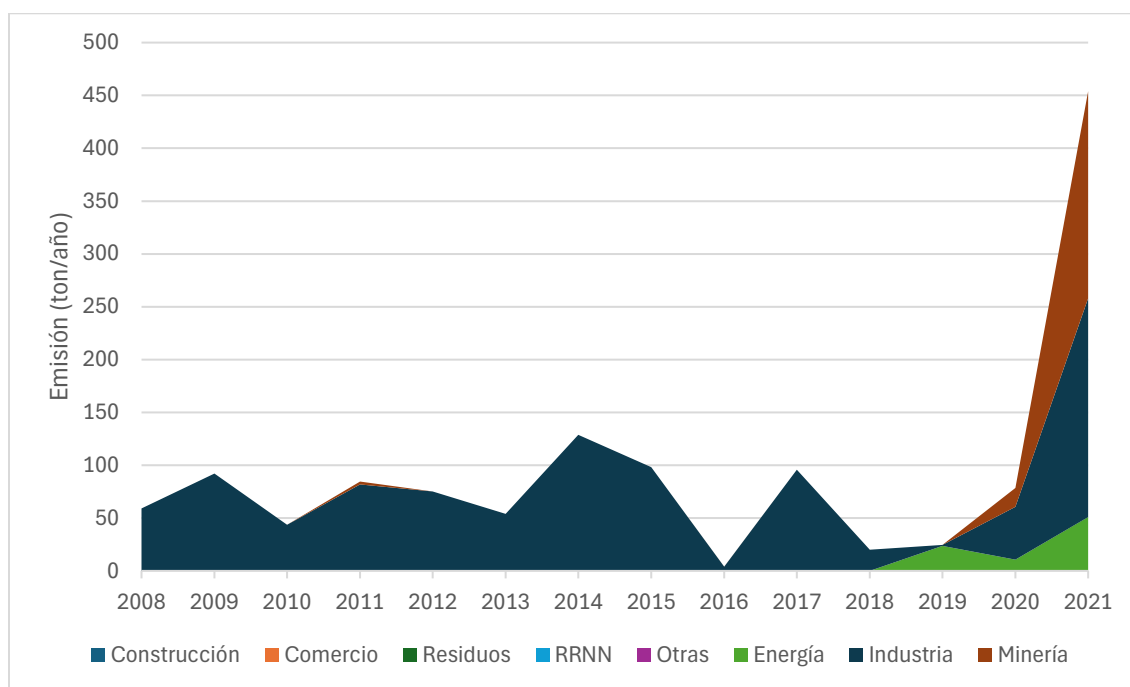


Figura 5-16 Evolución de emisiones de Pb de fuentes puntuales por Sector (ton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

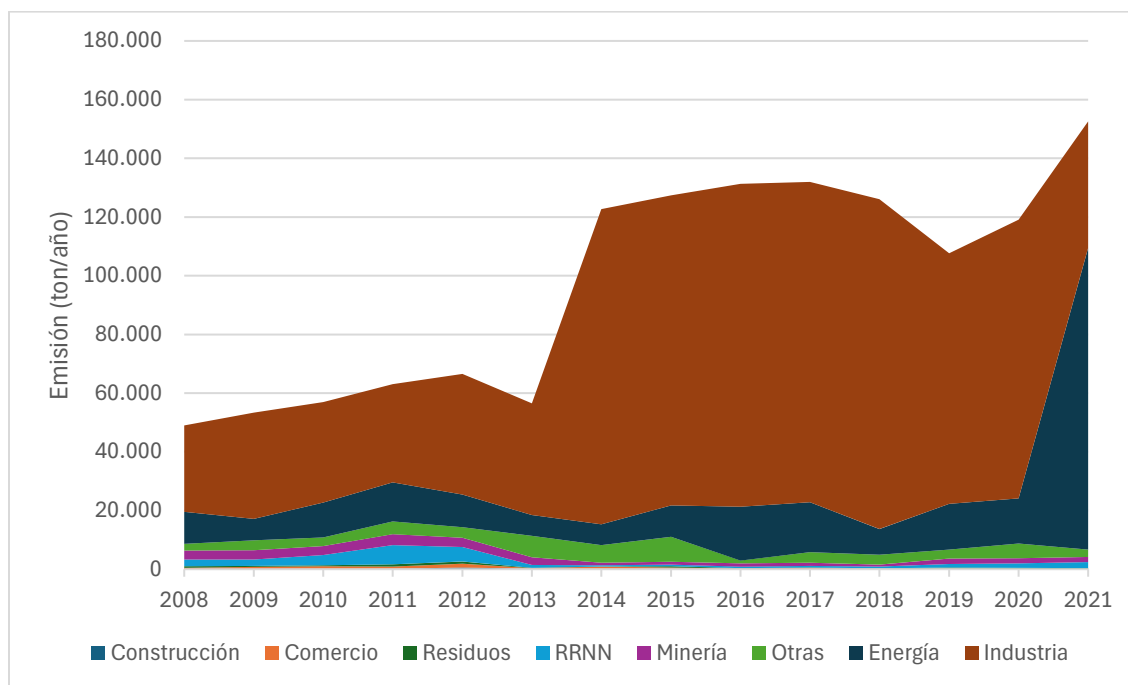


Figura 5-17 Evolución de emisiones de CO de fuentes puntuales por Sector (ton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

Como complemento a lo anterior, se analizó la evolución anual de los establecimientos que registran sus emisiones, así como las fuentes asociadas. Como se muestra en la Figura 5-18, existe una diferencia importante entre los años 2013 y 2014 con relación a los establecimientos que reportan. Esta variación no se ve claramente en las fuentes.

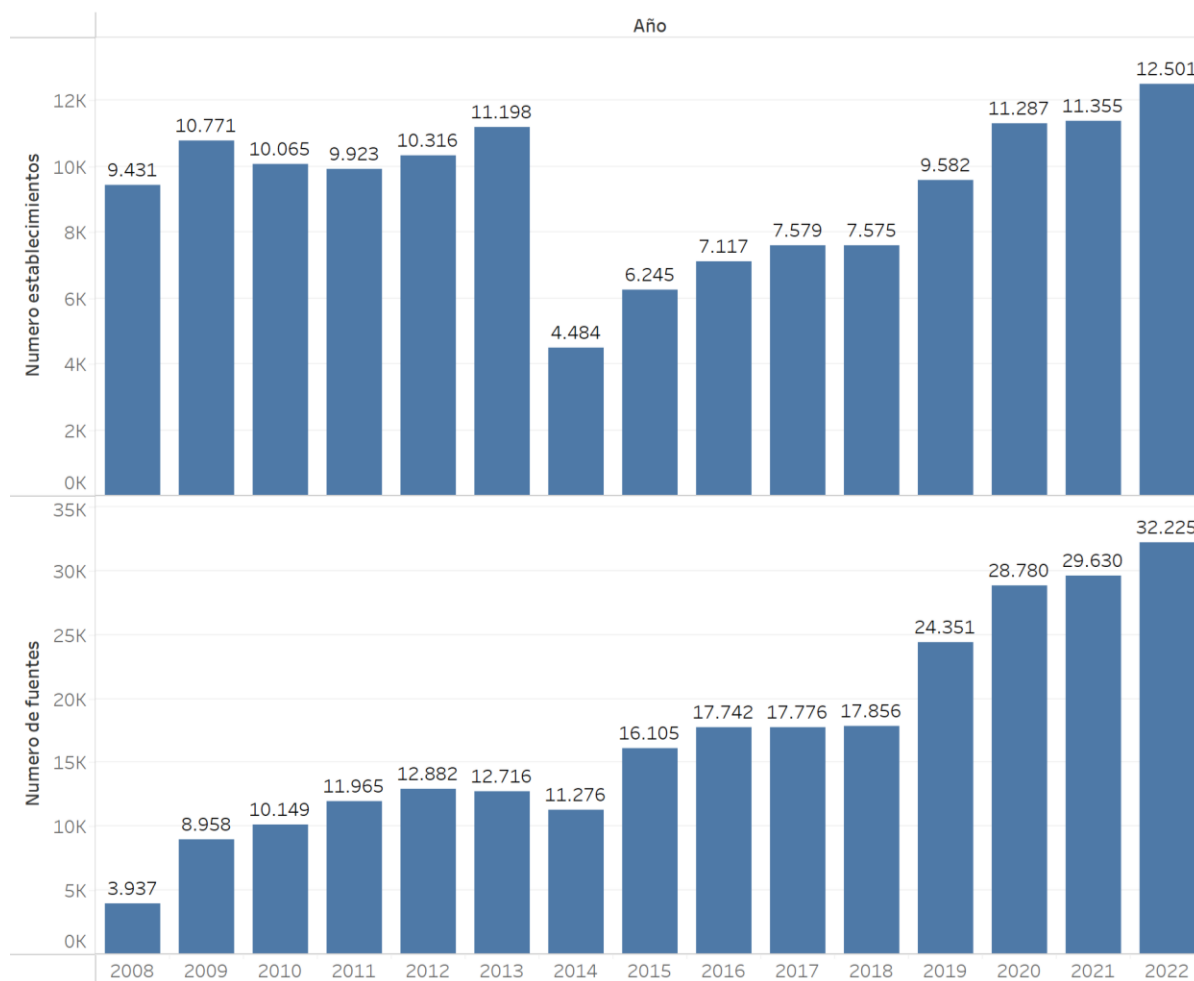


Figura 5-18 Variación de establecimientos y fuentes puntuales

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

Al observar en conjunto las figuras anteriores, se observa que el 2014 existe un aumento brusco de emisiones, pero el número de establecimientos sufre un descenso, y también las fuentes emisoras, pero en menor medida. Para los años posteriores, las tendencias de las emisiones se observan desacopladas respecto de la cantidad de establecimientos y fuentes.

Con la contraparte técnica se llega al acuerdo de analizar las empresas que están sujetas al sistema de declaración de Impuesto Verde. Esta decisión se realiza considerando que este subgrupo contiene información sujeta a Monitoreo, Reporte y Validación (MRV), lo que genera información del universo más validado y con precisión en la calidad de la información. Además, como se mencionó anteriormente, la información pública del RETC al ser un sistema auto declarativo por parte de los establecimientos, puede presentar errores por parte de los declarantes.

El Sistema de Impuesto Verde comenzó a reportarse en la ventanilla única desde el año 2017, teniendo datos desde ese año hasta el 2022. Para el inventario de emisiones se plantea su realización en años que tengan representatividad de emisiones. Debido a que los años 2020 – 2021 están vinculados a pandemia y las actividades en esos años no se ejecutaron de manera habitual, no se pueden considerar como significativo. Además, a la fecha de levantamiento de información para este estudio, el año 2022 aún no se había realizado la validación de las emisiones reportadas, por lo que también se excluyeron para el análisis del inventario.

Los establecimientos afectos al Sistema de Impuesto Verde son aquellos con fuentes emisoras que emitan por sobre 100 ton MP o 25.000 ton de CO₂ al año. Estos establecimientos representan aproximadamente el 80% de las emisiones totales de todos los contaminantes en un año. Cabe destacar que la información de emisiones obligatoria a reportar por estos usuarios son para CO₂, MP, NO_x y SO₂, por tanto, es la información que se encuentra disponible para el análisis.

Considerando los contaminantes de interés, en la Tabla 5-5 se muestran las emisiones totales de SO₂ y NO_x en comparación con la base de datos total del RETC. Para el NO_x las emisiones en promedio 2017-2019 representan el 53% de las emisiones totales y el SO₂ representa el 22% en promedio de las emisiones totales reportadas en el RETC entre los años 2017 – 2019. Bajo el sistema de impuesto verde la cantidad de establecimientos que reportan mediante este sistema son 91 en el año 2019. En la Figura 5-19 se muestra la tendencia de los contaminantes en el tiempo. Se observa una tendencia a la baja para ambos contaminantes para este tipo de establecimientos. Lo anterior cobra sentido debido a que el impuesto verde es un instrumento de mitigación, que busca la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

En Anexos Digitales se entrega el archivo “NCAire-Inventario_FuentesPuntualesIV.xlsx” con la información recopilada y procesada.

Tabla 5-5 Emisiones de SO₂ y NO_x de empresas con Impuesto Verde entre los años 2017 – 2019 (ton/año) y contribución del total de emisiones RETC

Contaminante	Fuente	2017	2018	2019
SO ₂	Sistema Impuesto Verde	43.771	43.732	41.761
	RETC total	295.931	270.894	119.356
% del total del RETC		15%	16%	35%
NO _x	Sistema Impuesto Verde	50.316	50.340	47.369
	RETC total	94.605	82.777	105.716
% del total del RETC		53%	61%	45%

Fuente: Elaboración propia en base a información enviada por contraparte técnica de Impuesto Verde

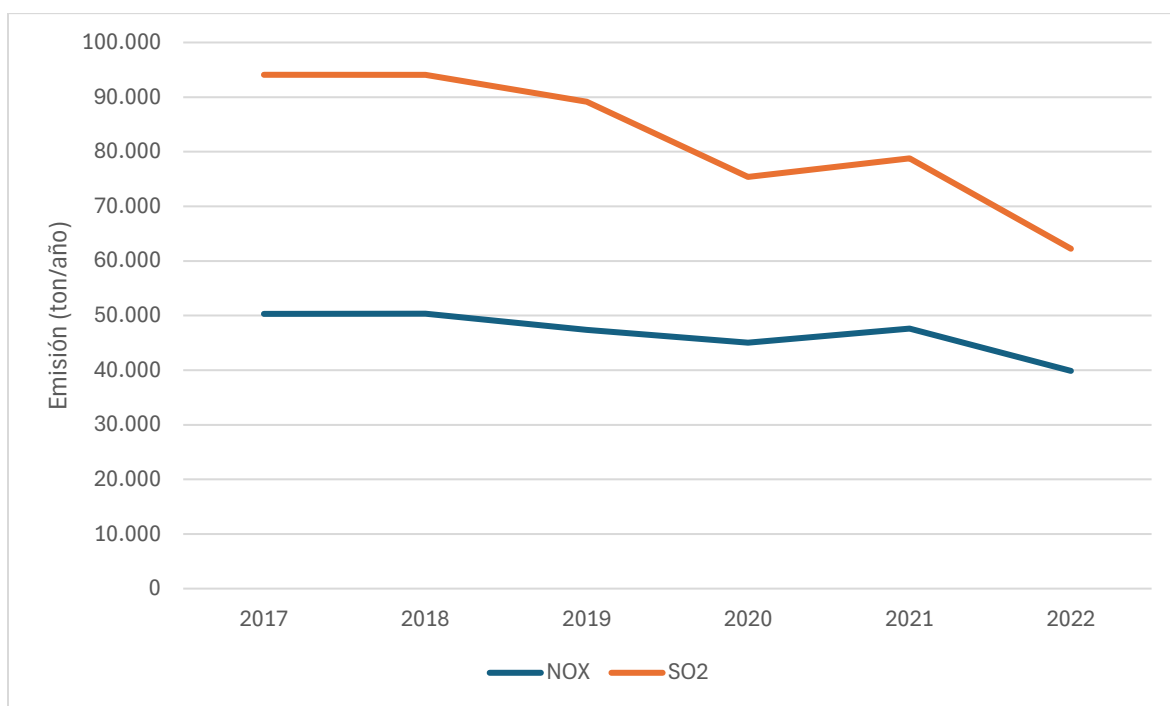


Figura 5-19 Tendencia de emisiones de contaminantes de empresas afectos al Sistema de Impuesto Verde de fuentes puntuales

Fuente: Elaboración propia en base a información enviada por contraparte técnica de Impuesto Verde

El análisis de establecimientos bajo impuesto verde excluye aquellos que reportan mediante F138 (D.S. 138/2005 MINSAL), Sistema de Centrales Termoeléctricas (D.S. 13/2011) y Sistema de Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA). Cabe destacar que las emisiones restantes de NO_x se concentran en establecimientos que reportan mediante sistema F138 y para SO₂ establecimientos que reportan por el D.S 28/2013 (Norma de Fundiciones). Por otro lado, las emisiones de Pb y CO son reportadas principalmente por el sistema F138.

5.4.1.2 Inventario de emisiones fuentes puntuales para establecimientos con Impuesto Verde año 2019

Con los antecedentes recopilados en la Sección 5.4.1.1 y en conjunto con el procesamiento de la base de datos de emisiones de establecimientos sujetos al Sistema de Impuesto Verde brindada por la contraparte técnica, se realiza el inventario de emisiones para los establecimientos con Sistema de Impuesto Verde para el año 2019. Considerando que las concentraciones de CO no se encuentran en incumplimiento, el análisis de contaminantes en este ítem se realizará para SO₂ y NO_x de este grupo.

De las emisiones históricas se puede observar que las emisiones totales para el año 2019 son de 120.380 ton SO₂ y 132.390 ton NO_x de los cuales las emisiones de las empresas bajo el Sistema de Impuesto Verde corresponden a 47.369 ton NO_x y 41.761 ton de SO₂, representando un 35% y 45% del total de emisiones del año 2019 respectivamente.

Análisis de emisiones por fuentes emisoras

Las fuentes emisoras características de fuentes puntuales, según la clasificación en el RETC, son: Caldera de calefacción, Caldera de fluido térmico, Caldera Industrial, Generación eléctrica, Grupo electrógeno, Horno panadería, Proceso con combustión y Proceso sin combustión. En Tabla 5-6 y Figura 5-20 se muestra la emisión por fuente emisora para empresas con Impuesto Verde en el año 2019.

Se puede observar que las fuentes catalogadas como de Generación eléctrica emiten 34.172 ton de NO_x y 27.913 ton SO₂, representando un 72% y 67% de las emisiones totales respectivamente por contaminante. En segundo lugar, las Calderas Industriales contribuyen las emisiones con 12.593 ton de SO₂ (30% de las emisiones de SO₂), mientras que para el NO_x los procesos con combustión aportan 6.755 ton (14% de las emisiones de NO_x).

Tabla 5-6 Emisiones por fuentes emisoras para empresas con Impuesto Verde para fuentes puntuales año 2019 (ton/año)

Fuente emisora general	SO ₂	% Emisiones SO ₂	NO _x	% Emisiones NO _x
Generación eléctrica	27.913	66,9%	34.172	72,1%
Caldera Industrial	12.593	30,2%	5.949	12,4%
Proceso con combustión	1.082	2,6%	6.755	14,4%
#N/A ¹	81	0,1%	427	0,9%
Caldera calefacción	66	0,2%	45	0,1%
Caldera de fluido térmico	25	0,1%	22	0,1%
Total	41.761	100%	47.369	100%

Nota 1: #N/A corresponden a algunas fuentes emisoras que no lograron ser homologadas debido a que no estaban disponibles en la tabla de homologación de fuentes, de todas formas, representan menos del 1% de las emisiones totales para ambos contaminantes

Fuente: Elaboración propia en base a información enviada por contraparte técnica de Impuesto Verde

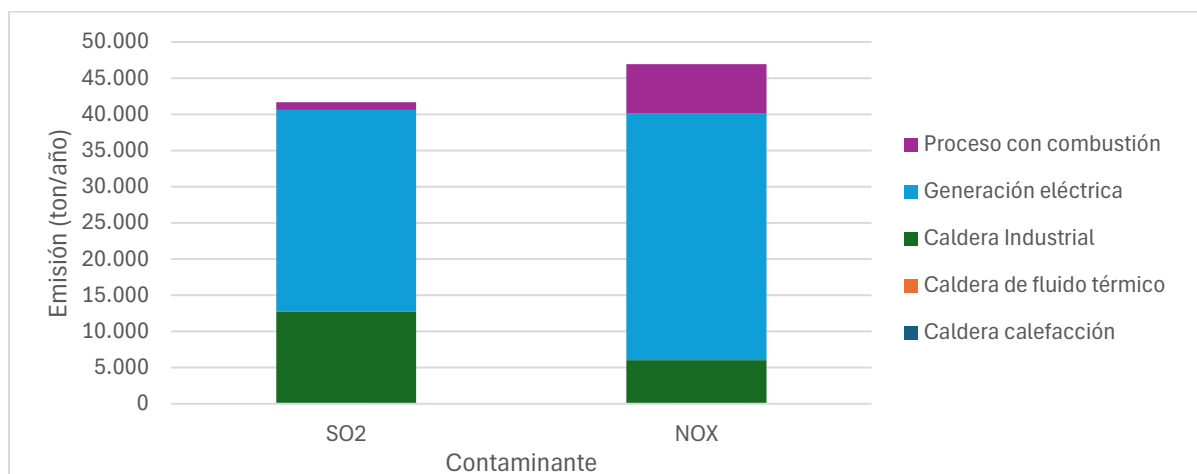


Figura 5-20 Emisiones de fuentes puntuales por fuente emisora para establecimientos afectados al Sistema de Impuesto Verde año 2019 (ton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a información enviada por contraparte técnica de Impuesto Verde

Análisis de emisiones por rubro

En la base de datos procesada se encuentra una clasificación de rubro brindada por la contraparte técnica. Estos rubros clasifican los establecimientos y respectivas fuentes emisoras según sus actividades económicas en las áreas: Agrícola, Celulosa/Papel, Cervecería, Energía Térmica, Generadoras, Maderero, Minería, Pesquera, Petroquímica y Químico. Cabe destacar que para los años 2017 – 2022 las principales fuentes afectas a Impuesto Verde fueron fuentes asociadas a Energía.

En la Figura 5-21 y Figura 5-22 se muestra la evolución de los contaminantes en el tiempo para los establecimientos afectados a Impuesto Verde. Para ambos casos predomina marcadamente el rubro de Generación eléctrica.

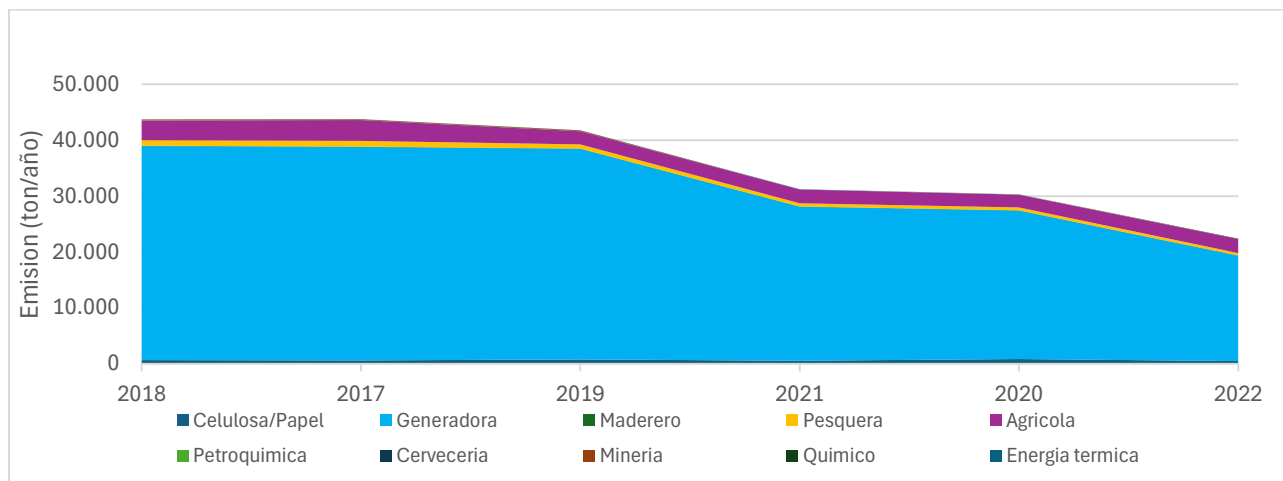


Figura 5-21 Evolución de emisiones SO₂ de fuentes puntuales por rubro para establecimientos afectos al Sistema de Impuesto Verde

Fuente: Elaboración propia en base a información enviada por contraparte técnica de Impuesto Verde

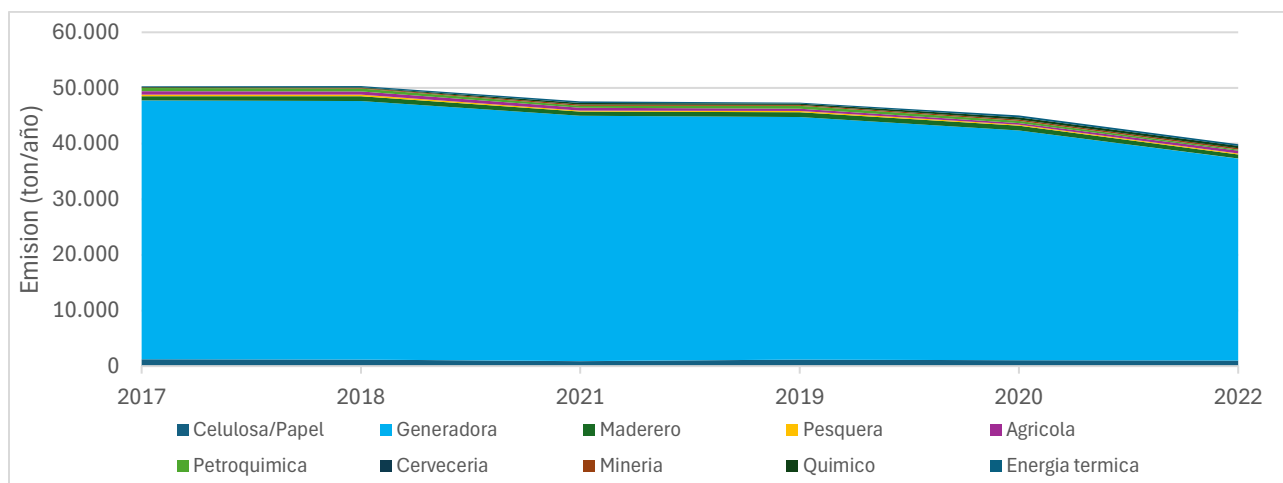


Figura 5-22 Evolución de emisiones NO_x de fuentes puntuales por rubro para establecimientos afectos al Sistema de Impuesto Verde

Fuente: Elaboración propia en base a información enviada por contraparte técnica de Impuesto Verde

Análisis de emisiones a nivel regional por rubro

En la Tabla 5-7 y Tabla 5-8 se muestran las emisiones por región y rubro para SO_2 y NO_x respectivamente. En la Figura 5-23 se muestra la distribución de las emisiones entre las regiones y por sector. Las regiones de Coquimbo, Los Lagos y Aysén no cuentan con establecimientos bajo el Sistema de Impuesto Verde para el año analizado, razón por la que no están en las tablas ni visualizaciones. Se observa que 90% de las emisiones totales de SO_2 (37.647 ton) corresponden a contribuyen establecimientos relacionados con las Generadoras de Energía y al igual que para emisiones NO_x en donde el 92% de las emisiones totales (43.610 ton) son de Generadoras de Energía. En el caso de SO_2 las principales regiones que tienen presente grandes magnitudes de emisiones son en primer lugar Biobío con 15.335 ton de emisiones y luego Antofagasta con 11.695 ton. Para NO_x ocurre de manera similar la proporción de contribución, con emisiones en la región de Antofagasta de 13.119 ton y Biobío 12.193 ton.

Tabla 5-7 Emisiones de SO₂ por región y rubro para establecimientos afectados al Sistema de Impuesto Verde año 2019 (ton/año)

Región/Rubro	Agrícola	Celulosa/Papel	Cervecería	Energía térmica	Generadora	Maderero	Minería	Pesquera	Petroquímica	Químico	Total
Arica y Parinacota	-	-	-	-	-	-	-	126	-	-	126
Tarapacá	-	-	-	-	569	-	-	276	-	-	845
Antofagasta	-	-	-	-	11.450	-	105	134	-	6	11.695
Atacama	-	-	-	-	4.492	-	-	-	-	-	4.492
Valparaíso	-	-	-	-	4.856	-	-	-	28	-	4.885
Metropolitana	0	10	2	-	3	-	-	-	-	-	15
O'Higgins	130	0	-	-	2	-	-	-	-	-	132
Maule	116	726	-	11	183	16	-	-	-	-	1.051
Ñuble	2.058	14	-	-	112	-	-	-	-	-	2.184
Biobío	-	22	-	-	15.008	39	-	254	13	-	15.335
Araucanía	-	-	-	-	142	3	-	-	-	-	144
Los Ríos	-	-	-	-	808	2	-	-	-	-	810
Magallanes	-	-	-	-	22	-	-	-	-	24	47
Total	2.304	772	2	11	37.647	59	105	789	42	30	41.761
% del total	6%	2%	0%	0%	90%	0%	0%	2%	0%	0%	100%

Fuente: Elaboración propia en base a información enviada por contraparte técnica de Impuesto Verde

Tabla 5-8 Emisiones de NO_x por región y rubro para establecimientos afectados al Sistema de Impuesto Verde año 2019 (ton/año)

Región/Rubro	Agrícola	Celulosa/Papel	Cervecería	Energía térmica	Generadora	Maderero	Minería	Pesquera	Petroquímica	Químico	Total
Arica y Parinacota	-	-	-	-	-	-	-	36	-	-	36
Tarapacá	-	-	-	-	872	-	-	79	-	-	951
Antofagasta	-	-	-	-	12.938	-	138	38	-	4	13.119
Atacama	-	-	-	-	4.233	-	-	-	-	-	4.233
Valparaíso	-	-	-	-	7.671	-	-	-	441	-	8.111
Metropolitana	13	356	11	-	378	-	-	-	-	-	758
O'Higgins	82	2	-	-	198	-	-	-	-	-	283
Maule	86	70	-	201	748	394	-	-	-	-	1.500
Ñuble	238	522	-	-	2.030	-	-	-	-	-	2.790
Biobío	-	224	-	-	11.468	344	-	86	70	-	12.193
La Araucanía	-	-	-	-	1.401	52	-	-	-	-	1.453
Los Ríos	-	-	-	-	1.104	40	-	-	-	-	1.144
Magallanes	-	-	-	-	569	-	-	-	-	232	800
Total	418	1.174	11	201	43.610	831	138	240	511	236	47.369
% del total	1%	2%	0%	0%	92%	2%	0%	1%	1%	0%	-

Fuente: Elaboración propia en base a información enviada por contraparte técnica de Impuesto Verde

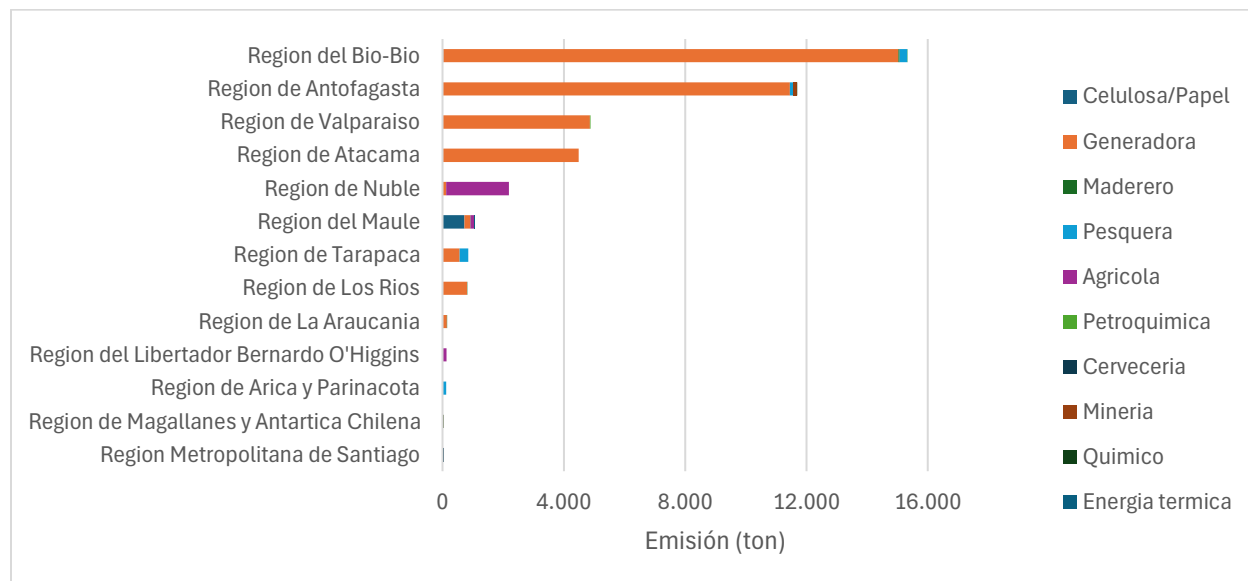


Figura 5-23 Emisiones de SO₂ de fuentes puntuales por región y rubro para establecimientos afectos al Sistema de Impuesto Verde año 2019 (ton)

Fuente: Elaboración propia en base a información enviada por contraparte técnica de Impuesto Verde

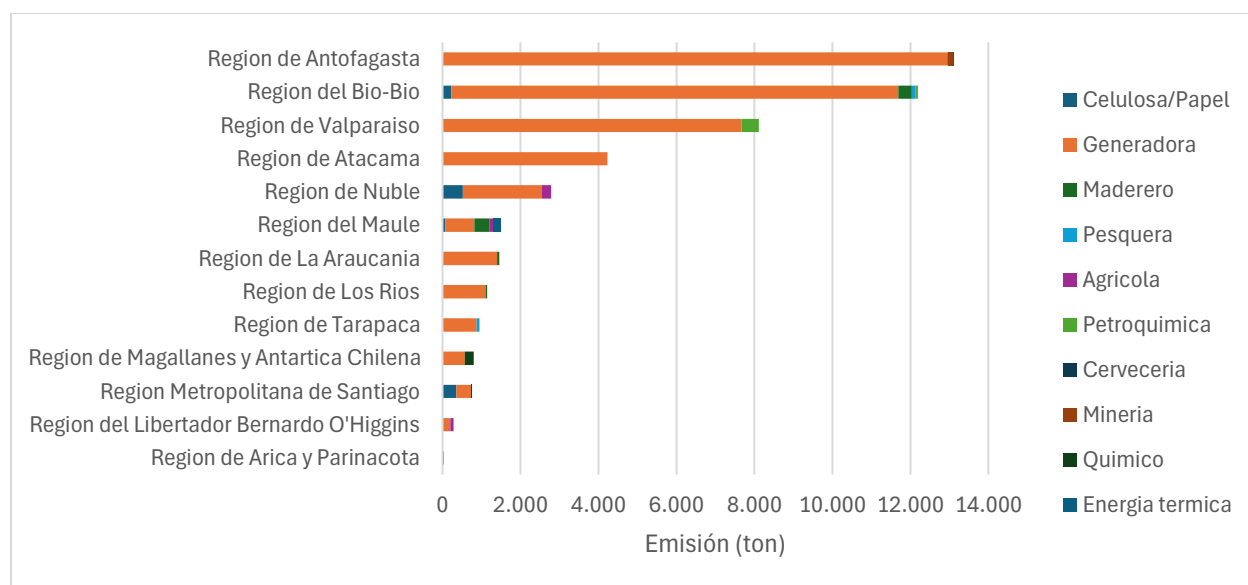


Figura 5-24 Emisiones de NO_x de fuentes puntuales por región y rubro para establecimientos afectos al Sistema de Impuesto Verde año 2019 (ton)

Fuente: Elaboración propia en base a información enviada por contraparte técnica de Impuesto Verde

Análisis de emisiones a nivel comunal

En la Tabla 5-9 y Tabla 5-10 se presentan las comunas con mayor cantidad de emisiones para el año 2019. Se puede observar que el rubro que destaca en las emisiones de ambos contaminantes es el área de generación eléctrica, incluso el acumulado de emisiones de estas comunas representan el 70% de las emisiones totales de SO₂ y un 61% de NO_x. Las regiones que predominan estas emisiones son: Antofagasta, Atacama, Valparaíso y Biobío, zonas en dónde los establecimientos tienen carácter de centrales termoeléctricas.

Tabla 5-9 Comunas con mayor cantidad de emisiones de SO₂ de fuentes puntuales para establecimientos afectados al Sistema de Impuesto Verde año 2019

Comuna	Región	Rubro predominante	Emisión (ton)	% de emisiones totales
Mejillones	Antofagasta	Generadora	9.289	22%
Nacimiento	Biobío	Generadora	6.237	15%
Puchuncaví	Valparaíso	Generadora	4.823	12%
Huasco	Atacama	Generadora	4.492	11%
Coronel	Biobío	Generadora	4.448	11%
Total			29.289	70%

Fuente: Elaboración propia en base a información enviada por contraparte técnica de Impuesto Verde

Tabla 5-10 Comunas con mayor cantidad de emisiones de NO_x de fuentes puntuales para establecimientos afectados al Sistema de Impuesto Verde año 2019

Comuna	Región	Rubro predominante	Emisión (ton)	% de emisiones totales
Mejillones	Antofagasta	Generadora	9.712	20%
Coronel	Biobío	Generadora	5.967	13%
Puchuncaví	Valparaíso	Generadora	5.819	12%
Huasco	Atacama	Generadora	4.223	9%
Tocopilla	Antofagasta	Generadora	3.211	7%
Total			47.565	61%

Fuente: Elaboración propia en base a información enviada por contraparte técnica de Impuesto Verde

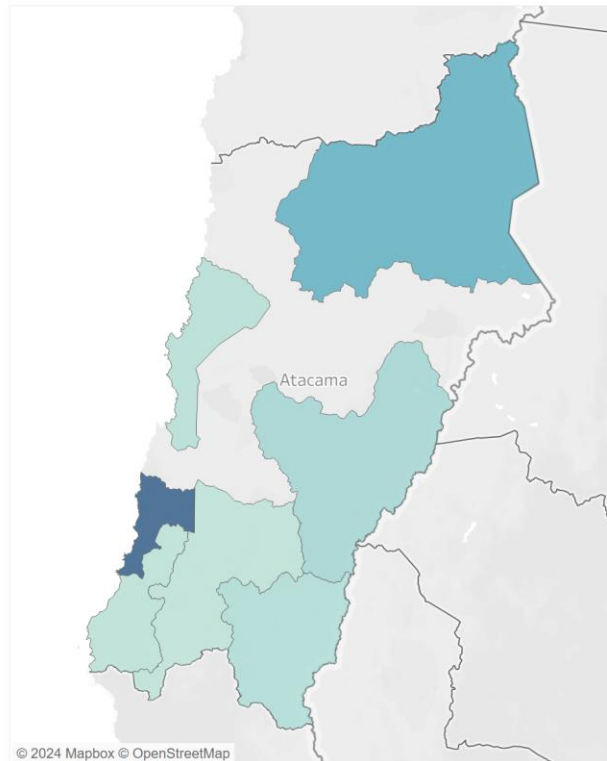
En el Anexo 3 de Anexos Digitales se entrega el inventario de emisiones de fuentes puntuales para el año 2019 para cada región y contaminante. En el anexo presenta una representación gráfica de las emisiones por región para cada contaminante de interés, junto con las comunas con mayores emisiones y sectores que predominan en su emisión. En la Figura 5-25 se muestra un ejemplo para la Región de Atacama. Como complemento se entrega la representación

interactiva en *Tableau Public*¹² para ver las emisiones desde 2010 – 2022 para cada región por contaminante.

Emisiones Fuentes Puntuales

Emisión total anual (ton) 0,0 497,6 Seleccionar Año 2019 Selección Región Región de Atacama Selección Contaminante CO

Región de Atacama



Emisiones totales (ton/año) CO, Año 2019

1.741

Top 5 comunas con mayores emisiones

Comuna	Emisiones (ton/año)
Copiapo	868,2
Huasco	497,6
Diego de Almagro	208,8
Tierra Amarilla	56,1
Chanaral	47,9

Participación por Sector

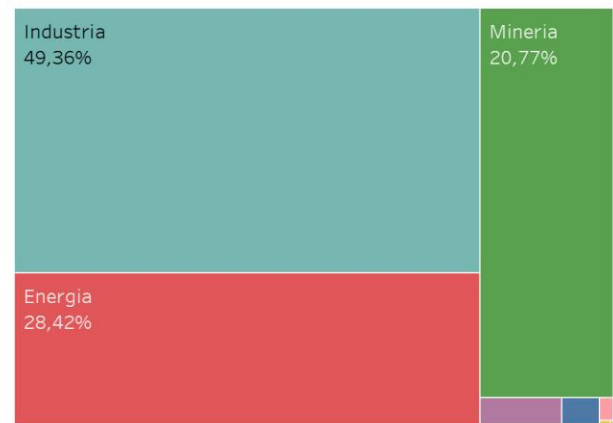


Figura 5-25 Emisiones CO para fuentes puntuales región de Atacama Año 2019 (ton)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de datos de RETC

¹² Disponible en

https://public.tableau.com/app/profile/greenie/viz/FuentesPuntuales_Mapa/EmisionFuentesPuntuales

5.4.2 Fuentes móviles

5.4.2.1 Análisis Emisiones históricas de fuentes móviles

Para realizar el inventario de fuentes móviles se analizó la información desde 2008 a 2021 de los datos públicos del RETC. En la Tabla 5-11 se muestran las emisiones de fuentes móviles por contaminantes cada año y en la Figura 5-27 y Figura 5-26 se muestra la evolución de las emisiones en SO₂, NO_x y CO en el tiempo respectivamente. En Anexos Digitales se entrega el archivo “NCAire-Inventario_FuentesMoviles.xlsx” con la información recopilada y procesada.

Tabla 5-11 Emisiones de fuentes móviles por contaminante (kton/año)

Contaminante	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
SO ₂	0,45	0,48	0,25	0,22	0,17	0,17	0,19	0,21	0,21	0,21	0,14	0,14	0,12	0,15
NO _x	57	61	65	67	76	80	82	61	54	56	45	52	39	55
CO	297	306	469	480	361	285	289	215	197	204	146	137	101	156

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC¹³

¹³ Disponible en <https://datosretc.mma.gob.cl/dataset/emisiones-al-aire>

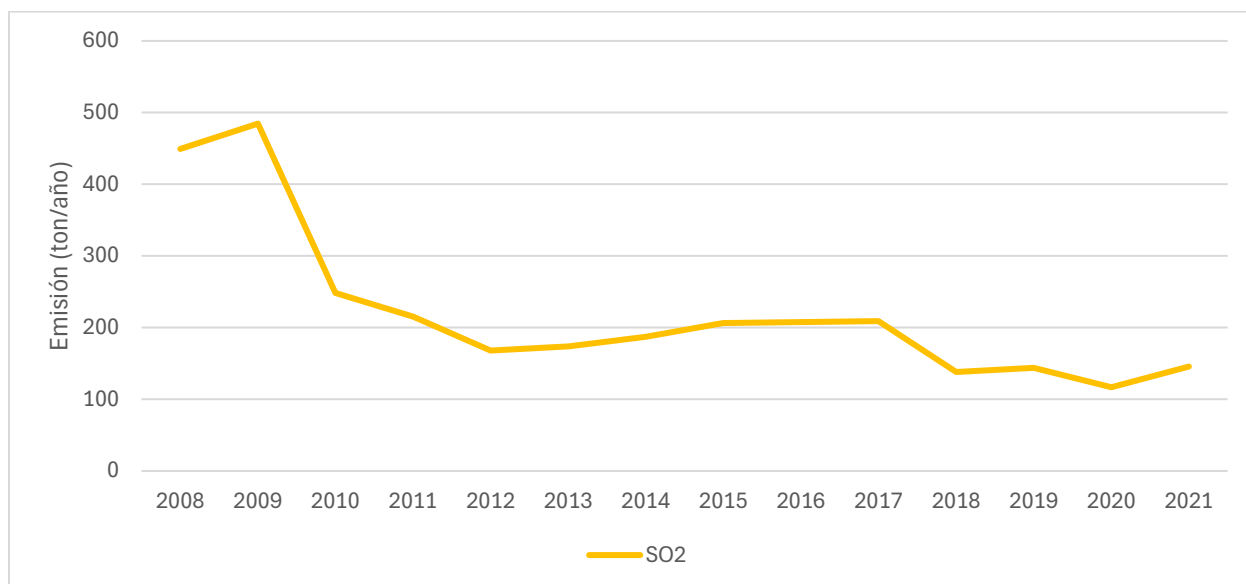


Figura 5-26 Evolución de las emisiones de fuentes móviles para SO₂ (ton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

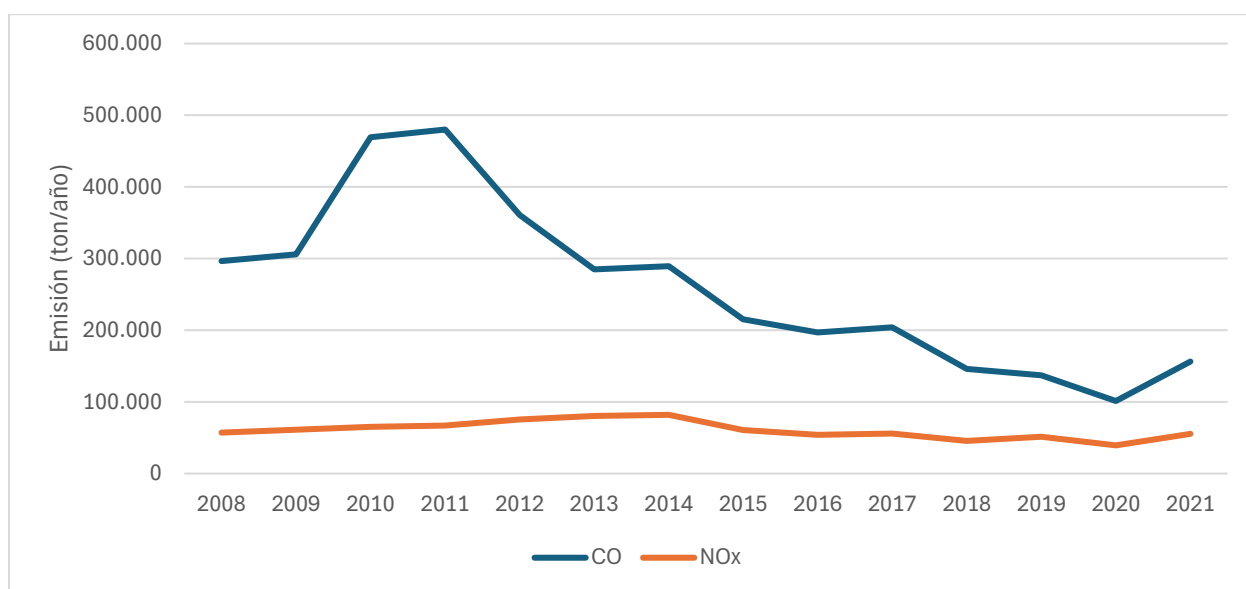


Figura 5-27 Evolución de las emisiones de fuentes móviles para NO_x y CO (ton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

Para comparar las emisiones en el tiempo se realiza una homogenización por tipo de vehículo. En la Tabla 5-12 se muestra la normalización de nombres.

Tabla 5-12 Clasificación de Rubro RETC por sector

Tipo vehículo original	Tipo vehículo normalizado
Alquiler	Taxis Colectivos
Buses	Buses
Buses interurbanos	Buses
Buses rurales	Buses
Buses urbanos	Buses
Camiones	Camiones
Camiones livianos	Camiones
Camiones medianos	Camiones
Camiones pesados	Camiones
Comerciales uso particular	Vehículos Comerciales
Furgón	Vehículos Comerciales
Motocicletas	Motocicletas
Taxis-Colectivos	Taxis Colectivos
Vehículos comerciales	Vehículos Comerciales
Vehículos medianos	Vehículos Medianos
Vehículos particulares	Vehículos Particulares

Fuente: Elaboración propia

Análisis de emisiones por tipo de vehículo

En la Figura 5-28, Figura 5-29 y Figura 5-30 se muestra la evolución de las emisiones por tipo de vehículo para SO_2 , NO_x y CO respectivamente. En el caso de SO_2 se observa que la contribución mayoritaria de emisión en promedio son los vehículos particulares en un 45%, luego los vehículos comerciales en un 23%. Para NO_x contribuyen tanto vehículos particulares, comerciales y buses, en promedio aportan a las emisiones en un 34%, 23% y 23% respectivamente. Por último, para CO nuevamente aportan vehículos particulares como vehículos comerciales en un 60% y 20% respectivamente.

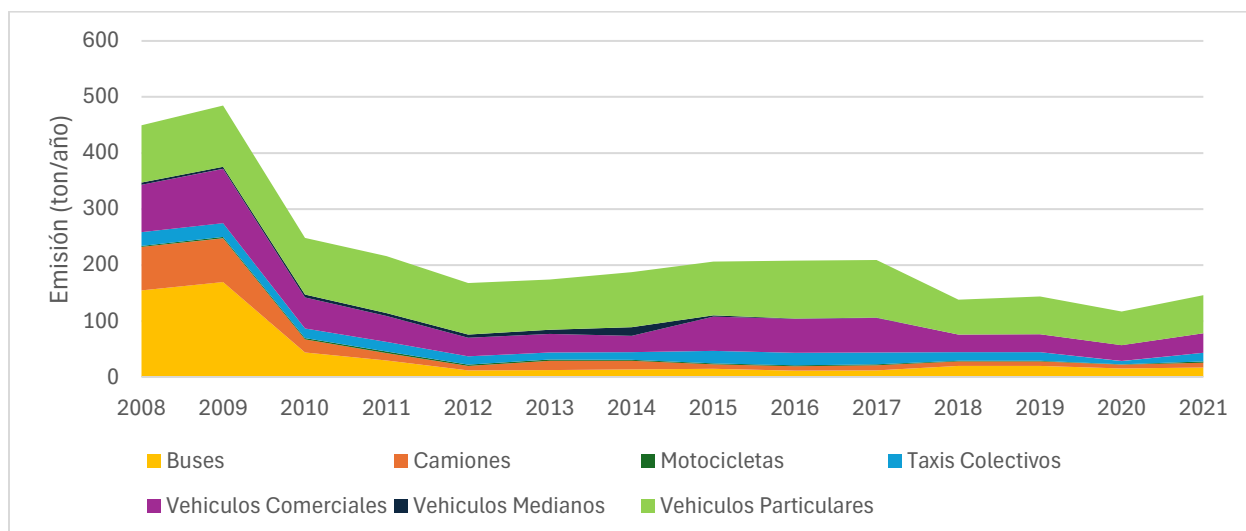


Figura 5-28 Evolución de emisiones de SO₂ de fuentes móviles por tipo de vehículo (ton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

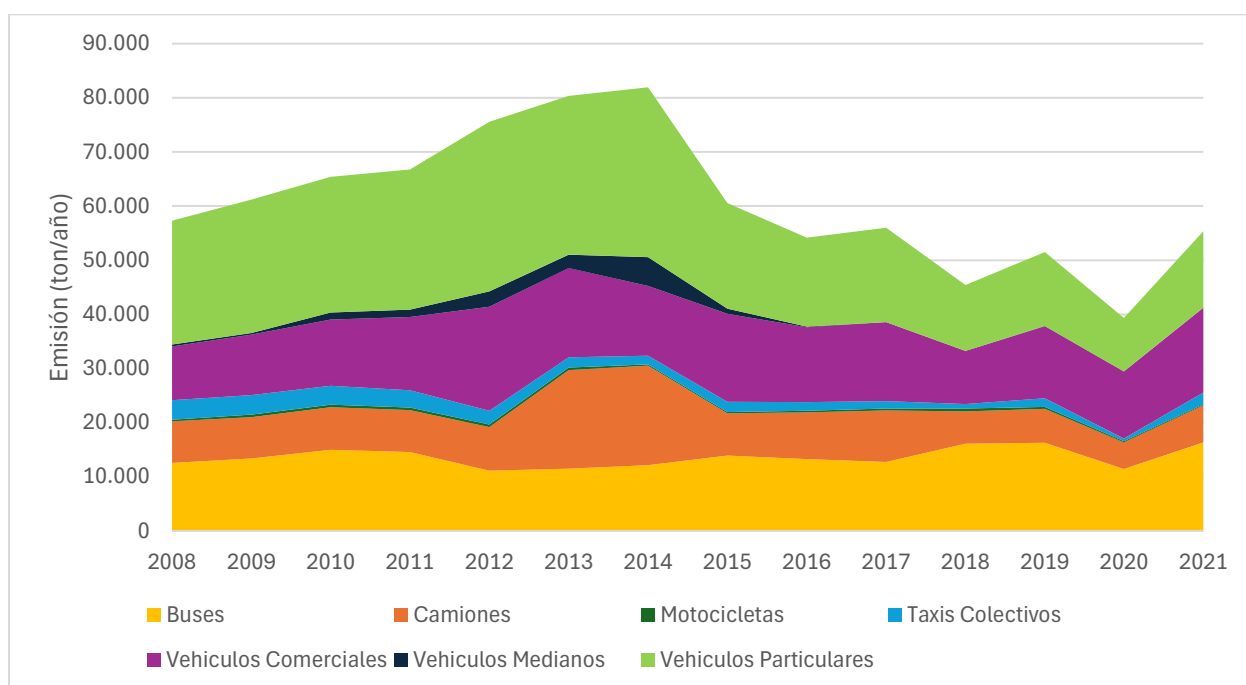


Figura 5-29 Evolución de emisiones de NO_x de fuentes móviles por tipo de vehículo (ton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

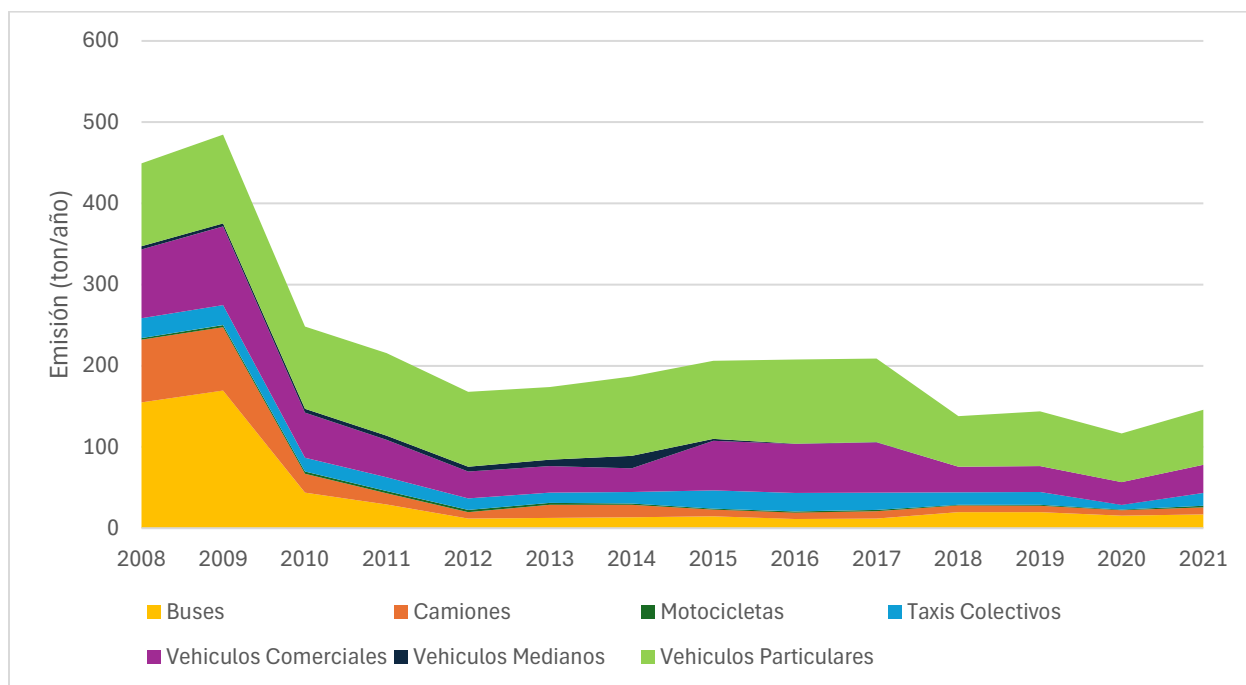


Figura 5-30 Evolución de emisiones de CO de fuentes móviles por tipo de vehículo (ton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

5.4.2.2 Inventario de emisiones fuentes móviles año 2019

De la evolución de emisiones de la Sección 5.4.3.1 se observa que para el año 2019 las emisiones totales de SO₂ corresponden a 144 ton, 51.520 toneladas para NO_x y 137.022 ton de CO.

Análisis de emisiones totales por tipo de vehículo

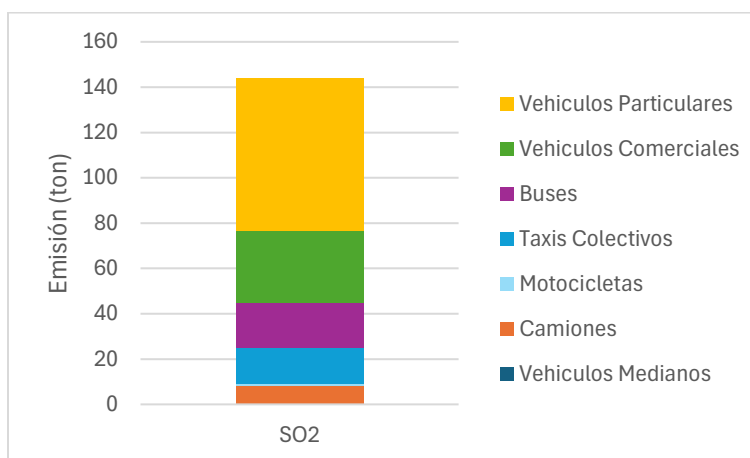
En la Tabla 5-13 se muestran las emisiones totales por tipo de vehículo y contribución respectiva para cada contaminante. En la Figura 5-31 y Figura 5-32 se muestra la representación gráfica por vehículo y contaminantes.

En el caso del SO₂, los vehículos particulares contribuyen con 67 ton de emisiones (47% del total), luego los vehículos comerciales con 32 ton (22%) y los buses con 20 ton (14%). Para NO_x los principales vehículos emisores son: Buses, Vehículos particulares y Vehículos comerciales. Contribuyendo en un 84% de las emisiones totales de NO_x, específicamente con 16.313 ton (32% del total de NO_x), 13.684 ton (27%) y 13.310 ton (26%) respectivamente. Para CO los principales vehículos emisores son vehículos particulares aportando 98.220 ton (72%) y vehículos comerciales con 18.292 ton de las emisiones (13%).

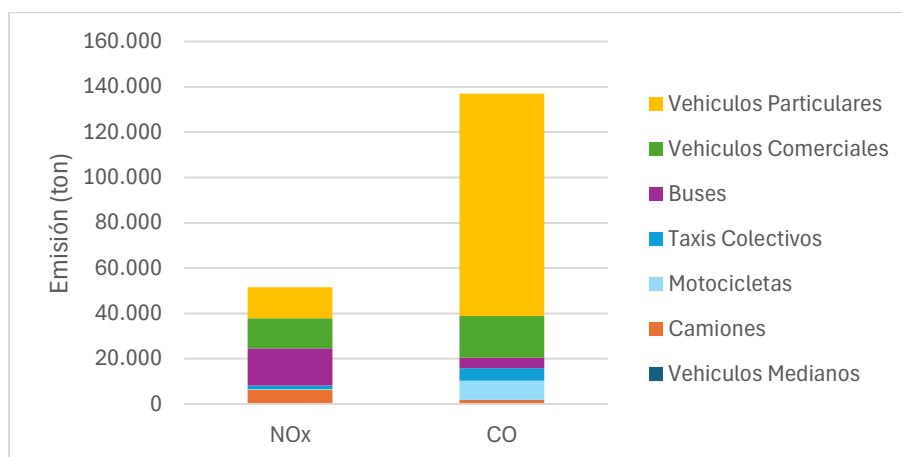
Tabla 5-13 Emisiones por tipo de vehículo por contaminante año 2019 (ton)

Tipo Vehículo	SO ₂	% de emisiones totales de SO ₂	NO _x	% de emisiones totales de NO _x	CO	% de emisiones de CO
Vehículos particulares	67	47%	13.684	27%	98.220	72%
Vehículos comerciales	32	22%	13.310	26%	18.292	13%
Buses	20	14%	16.313	32%	4.626	3%
Taxis-Colectivos	16	11%	1.633	3%	5.548	4%
Camiones	8	6%	6.254	12%	1.887	1%
Motocicletas	1	1%	320	1%	8.447	6%
Vehículos medianos	0	0%	6	0%	2	0%
Total	144	100%	51.520	100%	137.022	100%

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC


Figura 5-31 Emisiones de SO₂ de fuentes móviles por tipo de vehículo año 2019 (ton)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC


Figura 5-32 Emisiones de NO_x y CO de fuentes móviles por tipo de vehículos año 2019 (ton)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

Análisis de emisiones fuentes móviles a nivel regional

Las emisiones móviles se concentran en la región Metropolitana concentrando un 44% de las emisiones de CO (60.714 ton), 47% emisiones de NO_x (24.144 ton), 54% de emisiones de SO₂ (77 ton). Luego le siguen las regiones de Valparaíso (13%, 14% y 12% respectivamente) y Biobío (11%, 13% y 10% respectivamente).

Tabla 5-14 Emisiones de fuentes móviles por región y contaminante año 2019 (ton)

Región	SO ₂	NO _x	CO
Región Metropolitana de Santiago	77	24.144	60.714
Región de Valparaíso	17	7.070	17.684
Región del Biobío	14	6.568	15.629
Región de Coquimbo	6	1.836	8.206
Región del Maule	3	1.281	4.983
Región del Libertador Bernardo O'Higgins	4	1.687	4.410
Región de La Araucanía	4	1.557	4.269
Región de Antofagasta	5	1.758	4.191
Región de Ñuble	2	1.031	3.591
Región de Los Lagos	3	1.077	3.290
Región de Tarapacá	4	1.283	2.887
Región de Arica y Parinacota	2	715	2.228
Región de Atacama	1	439	1.489
Región de Aysén del Gral.Ibañez del Campo	1	431	1.368
Región de Los Ríos	1	392	1.058
Región de Magallanes y Antártica Chilena	1	252	1.025
Total	144	51.520	137.022

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

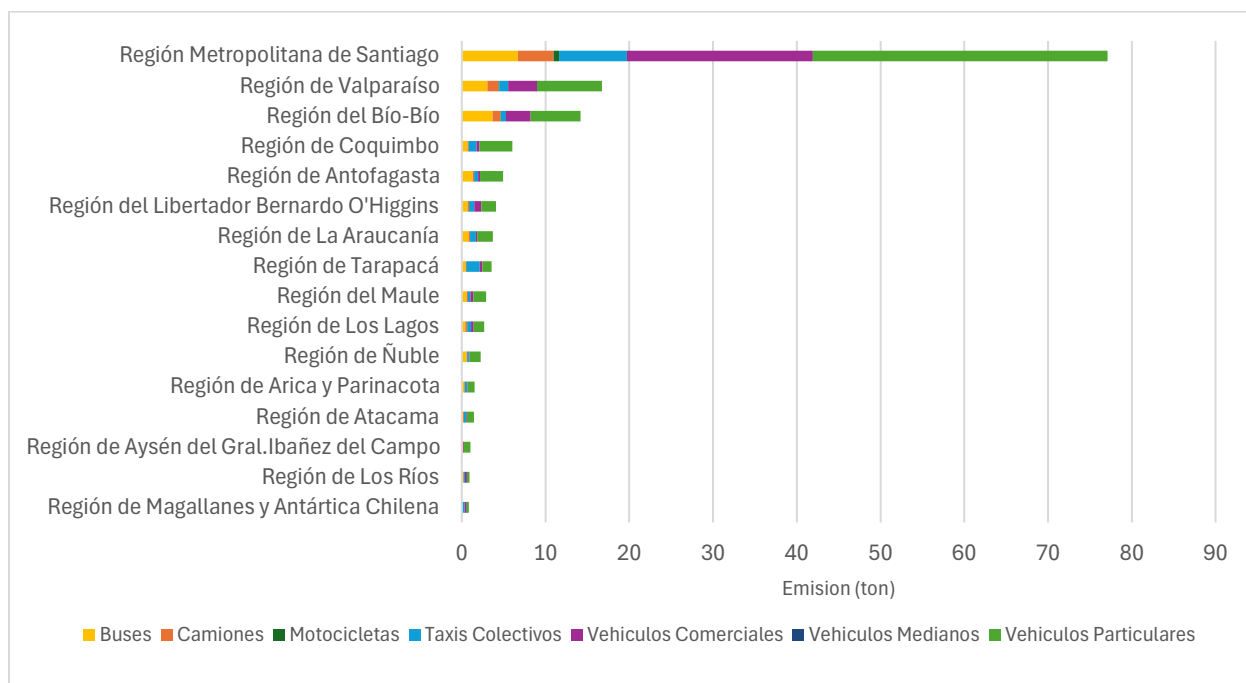


Figura 5-33 Emisiones de SO₂ de fuentes móviles por región y tipo de vehículo año 2019 (ton)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

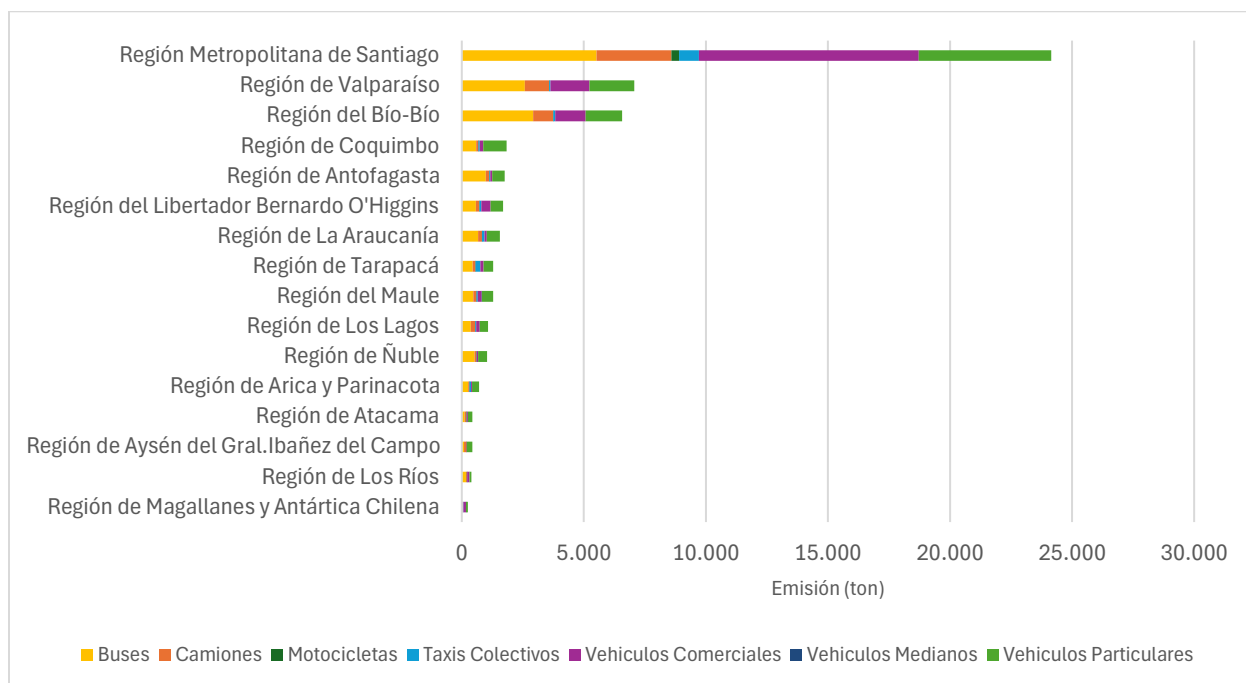


Figura 5-34 Emisiones de NO_x de fuentes móviles por región y tipo de vehículo año 2019 (ton)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

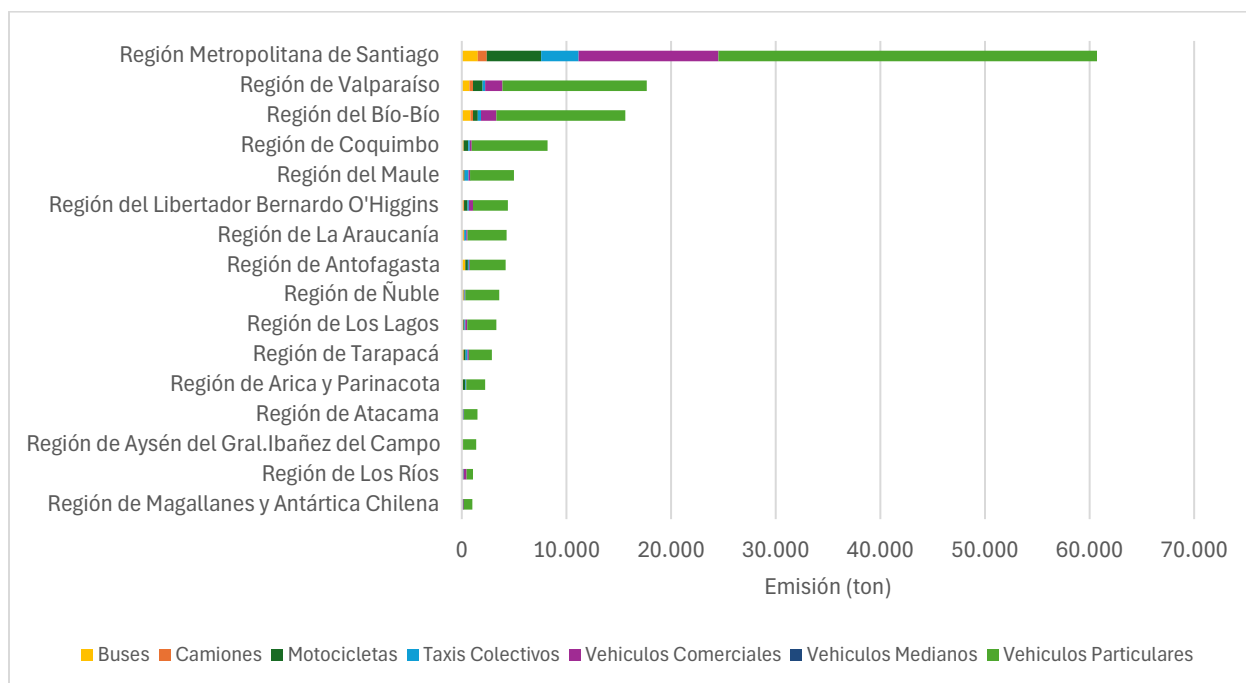


Figura 5-35 Emisiones de CO de fuentes móviles por región y tipo de vehículo, año 2019 (ton)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

En el Anexo 4 de Anexos Digitales se presenta un mapa de emisiones de fuentes móviles para el año 2019 por región y contaminante. En el anexo se presenta una representación gráfica de las emisiones por región y contaminantes de interés, junto con las comunas con mayores emisiones y tipo de vehículo que predomina. En la Figura 5-36 se muestra un ejemplo para la Región Metropolitana. Como complemento se entrega la representación interactiva en *Tableau Public*¹⁴ para ver las emisiones desde 2018– 2021 para cada región por contaminante.

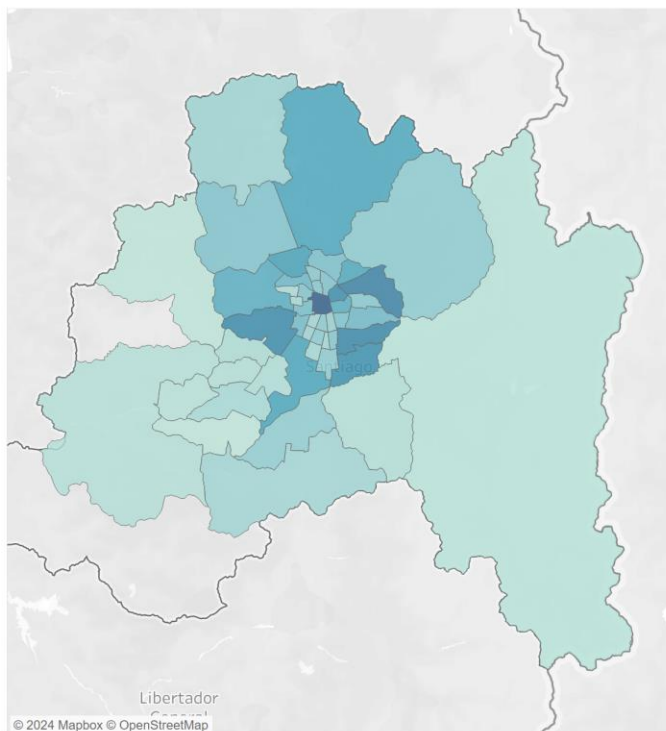
¹⁴ Disponible en

https://public.tableau.com/app/profile/greenie/viz/FuentesMoviles_Mapa/EmisionesFuentesMoviles

Emisiones Fuentes Móviles



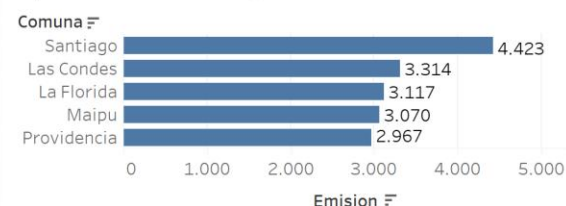
Región Metropolitana de Santiago



Emisiones totales (ton/año) CO, Año 2019

60.714

Top 5 comunas con mayores emisiones



Participación por tipo de vehículo

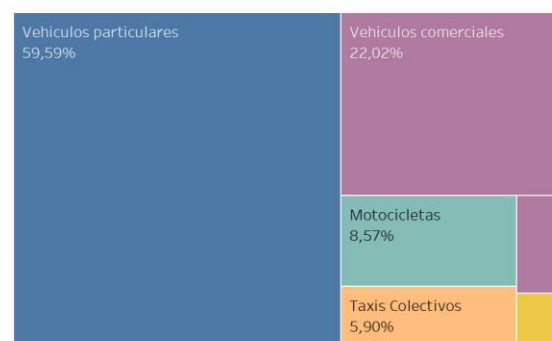


Figura 5-36 Emisiones CO de fuentes móviles para Región Metropolitana de Santiago Año 2019

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

5.4.3 Fuentes difusas

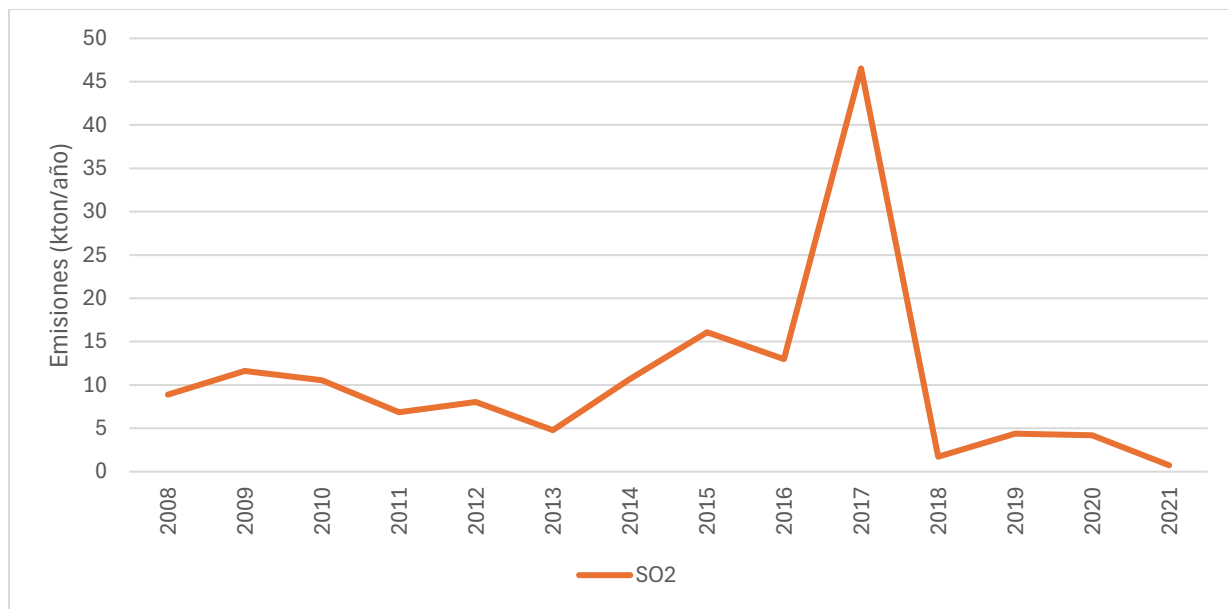
5.4.3.1 Análisis Emisiones históricas de fuentes difusas

Para realizar el inventario de fuentes difusas se analizó la información desde 2008 a 2021 de los datos públicos del RETC. En la Tabla 5-15 se muestran las emisiones de fuentes difusas por contaminantes cada año y en la Figura 5-37, Figura 5-38 y Figura 5-39 se muestra la evolución de las emisiones en SO₂, NO_x y CO respectivamente. En Anexos Digitales se entrega el archivo “NCAire-Inventario_FuentesDifusas.xlsx” con la información recopilada y procesada.

Se puede observar que en el año 2017 hay un *peak* en emisiones para todos los contaminantes, esto ocurre debido a que en ese año hubo una serie de incendios forestales generados en múltiples focos de las zonas centro y sur del país, lo cual alteran las emisiones por fuentes difusas en ese año.

Tabla 5-15 Emisiones de fuentes difusas por contaminante (kton/año)

Contaminante	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
SO ₂	9	12	11	7	8	5	11	16	13	47	2	4	4	1
NO _x	25	32	28	23	29	19	37	59	46	151	19	27	33	25
CO	4.525	4.726	4.646	4.575	4.705	4.557	3.705	2.687	2.520	4.892	1.945	2.197	3.039	2.857

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC¹⁵

Figura 5-37 Evolución de las emisiones SO₂ de fuentes difusas (kton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

¹⁵ <https://datosretc.mma.gob.cl/dataset/emisiones-al-aire-de-fuentes-difusas>

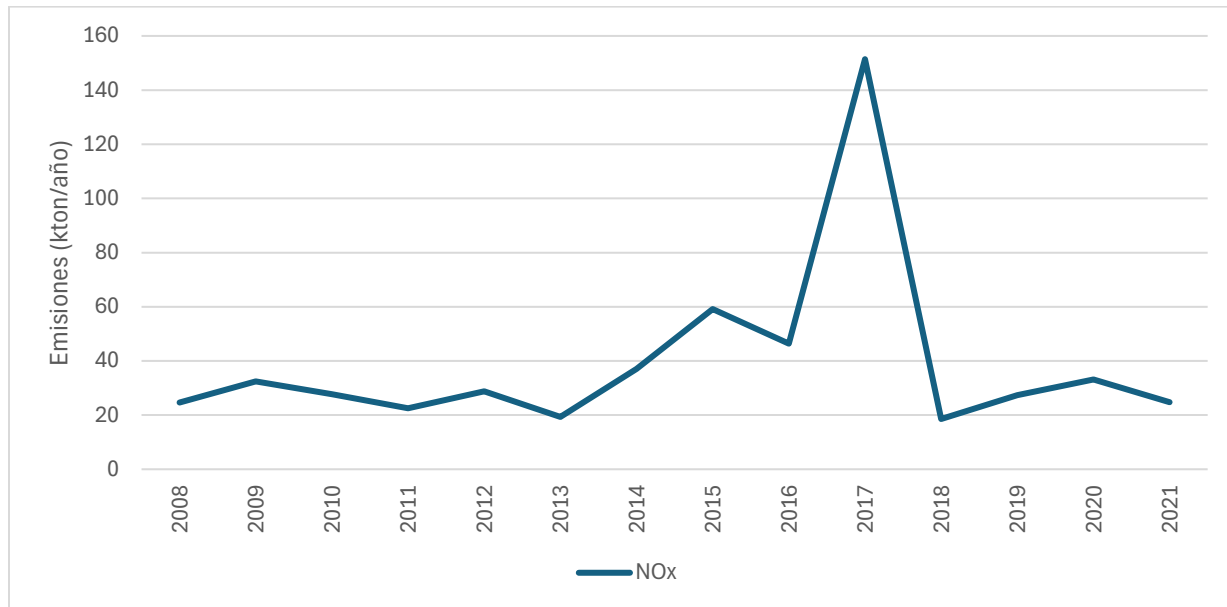


Figura 5-38 Evolución de las emisiones NO_x de fuentes difusas (kton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

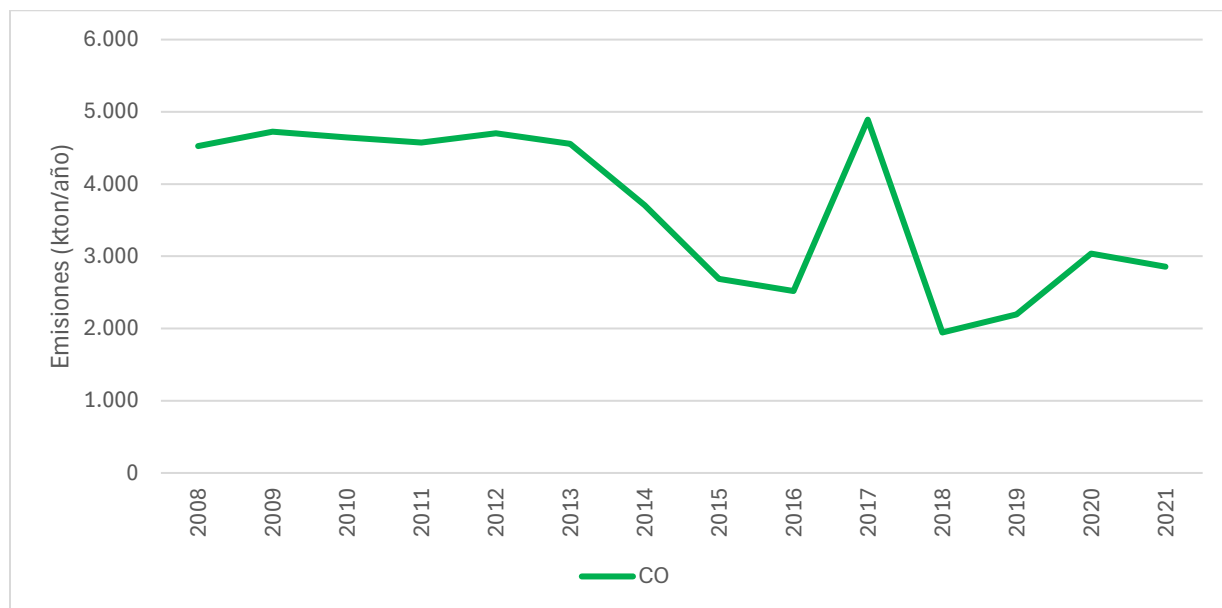


Figura 5-39 Evolución de las emisiones CO de fuentes difusas (kton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

Análisis de emisiones por tipo de fuente

En fuentes difusas el RETC clasifica el tipo de fuente en: Combustión de Leña Residencial Urbana, Combustión de Leña Residencial Rural, Incendios Forestales, Quemas agrícolas e Incendios urbanos. En la Figura 5-40, Figura 5-41 y Figura 5-42 se muestra la evolución de las emisiones por tipo de fuente para SO₂, NO_x y CO respectivamente.

En el caso del SO₂ la emisión que predomina en las emisiones difusas son los incendios forestales y luego las quemas agrícolas. Para NO_x aporta significativamente los incendios forestales, y la combustión de leña residencial. Por último, en CO contribuye en primer lugar la combustión de leña residencial e incendios forestales en segundo lugar.

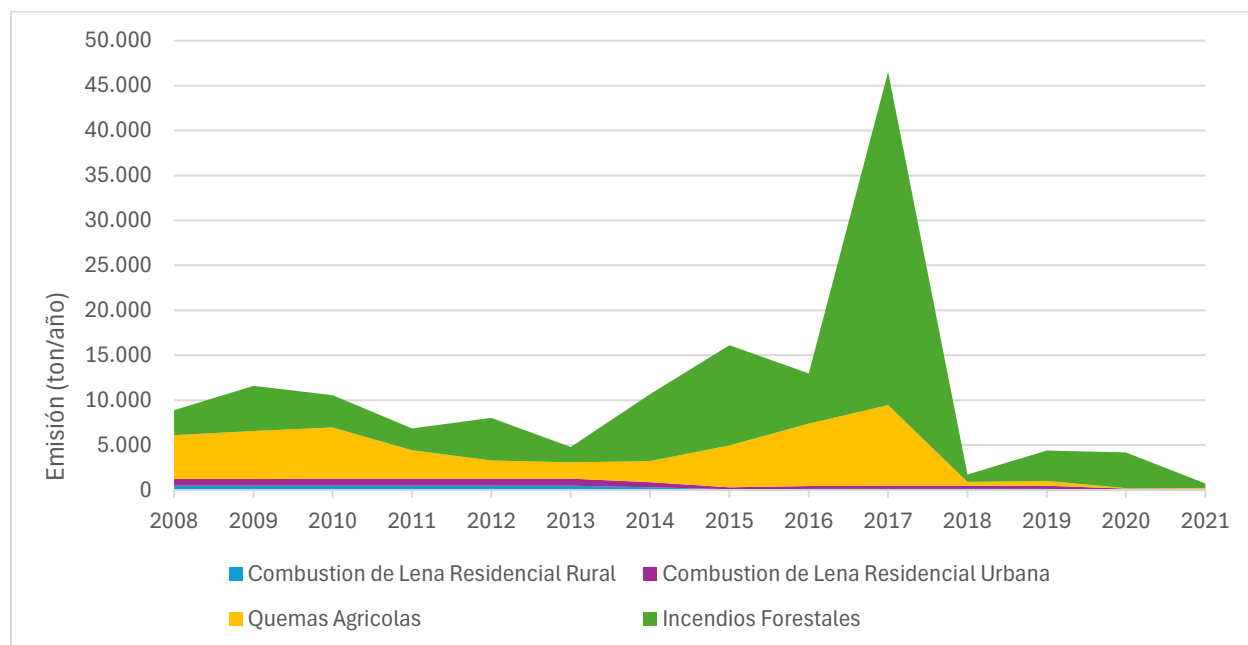


Figura 5-40 Emisiones SO₂ de fuentes difusas por tipo de fuente (ton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

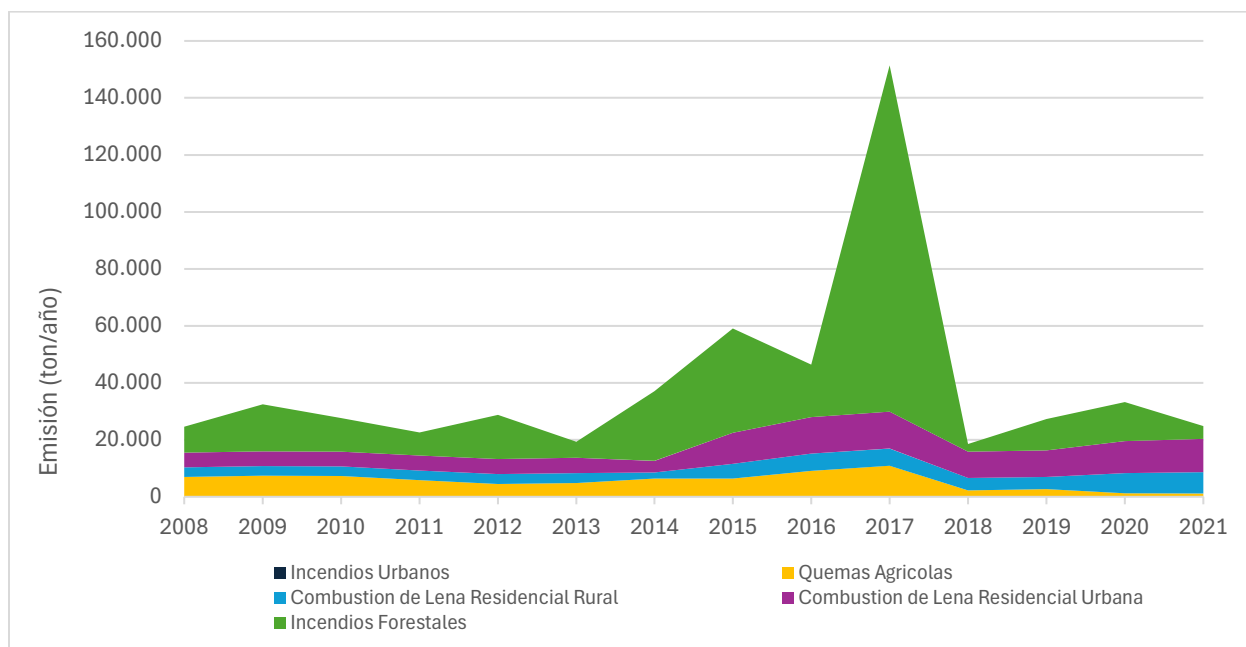


Figura 5-41 Emisiones NO_x de fuentes difusas por tipo de fuente (ton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

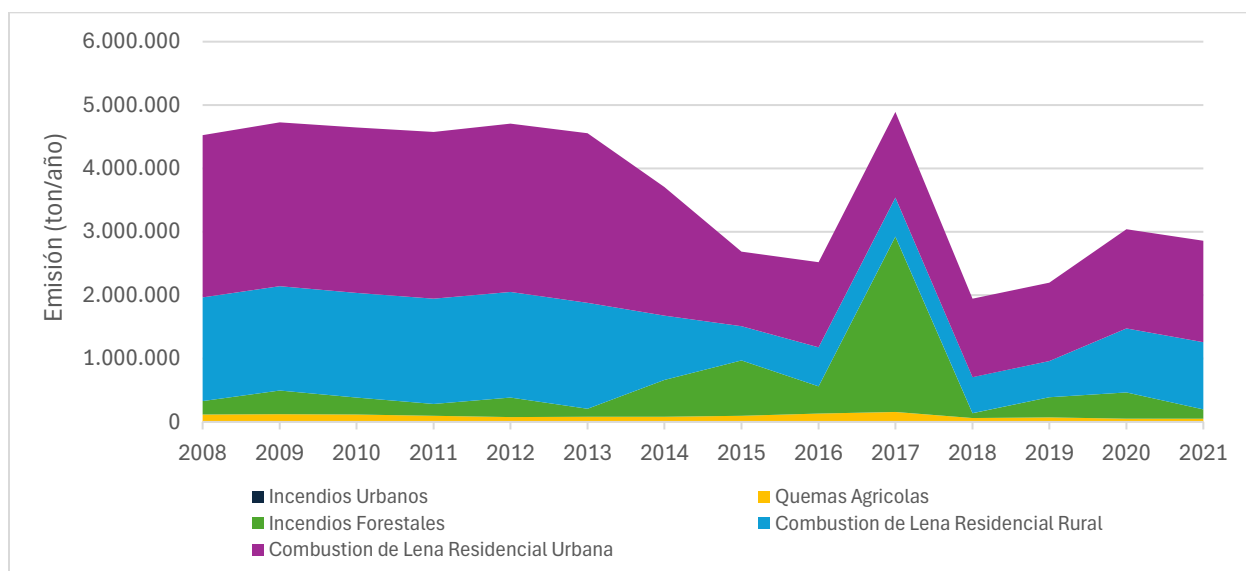


Figura 5-42 Emisiones CO de fuentes difusas por tipo de fuente (ton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

5.4.3.2 Inventario de emisiones de fuentes difusas año 2019

De la evolución de emisiones de Tabla 5-16 se observa que para el año 2019 las emisiones de SO₂ corresponden a 4.386 ton, 27.329 toneladas para NO_x y 2.197.261 ton de CO.

Análisis de emisiones por tipo de fuente

En la Tabla 5-16 Tabla 5-13 se muestran las emisiones por tipo de fuente y contribución respectiva para cada contaminante. En la Figura 5-43, Figura 5-44 y Figura 5-45 se muestra la representación gráfica por tipo de fuente y contaminante para SO₂, NO_x y CO respectivamente.

En el caso del SO₂, principalmente los incendios forestales contribuyen en las emisiones con 3.382 ton de emisiones (77% del total). Para NO_x los principales tipos de fuente son: incendios forestales y combustión de leña residencial urbana. Contribuyendo en un 41% de las emisiones totales de NO_x, específicamente con 11.095 ton y 9.223 ton (27%) respectivamente. Para CO las principales fuentes son la combustión de leña residencial urbana y rural, aportando 1.237.966 ton (56%) y 567.471 ton (26%) respectivamente, entre ambas aportan un 82% de las emisiones de CO.

Tabla 5-16 Emisiones por tipo de fuente por contaminante año 2019 (ton)

Tipo de Fuente	SO ₂	% de emisiones totales de SO ₂	NO _x	% de emisiones totales de NO _x	CO	% de emisiones de CO
Combustión de Leña Residencial Urbana	344	8%	9.223	34%	1.237.966	56%
Combustión de Leña Residencial Rural	149	3%	4.320	16%	567.471	26%
Incendios Forestales	3.382	77%	11.095	41%	318.989	15%
Quemas Agrícolas	511	12%	2.691	10%	72.566	3%
Incendios Urbanos	-	0%	-	0%	269	0%
Total	4.386	100%	27.329	100%	2.197.261	100%

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

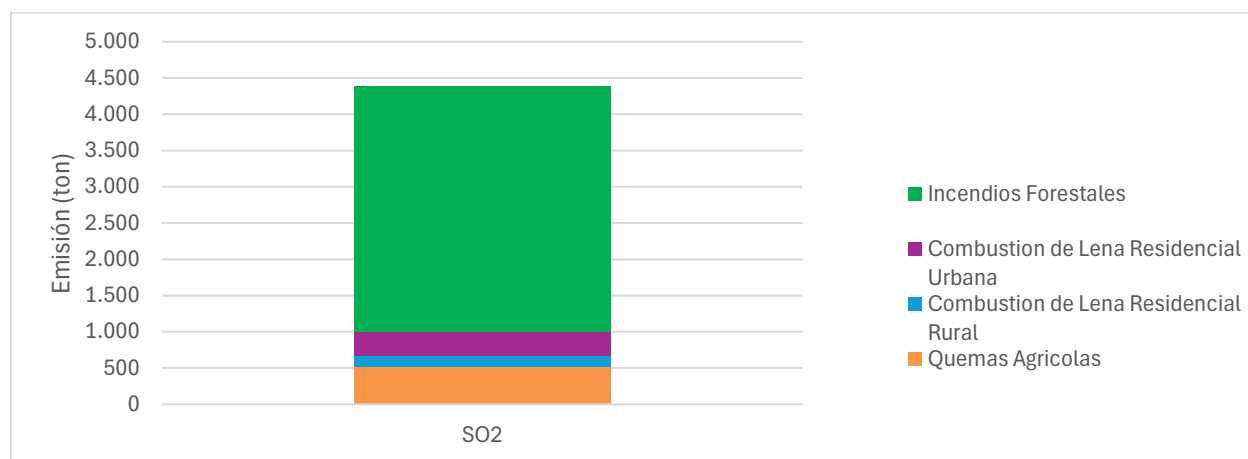


Figura 5-43 Emisiones SO₂ de fuentes difusas por tipo de fuente año 2019 (ton)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

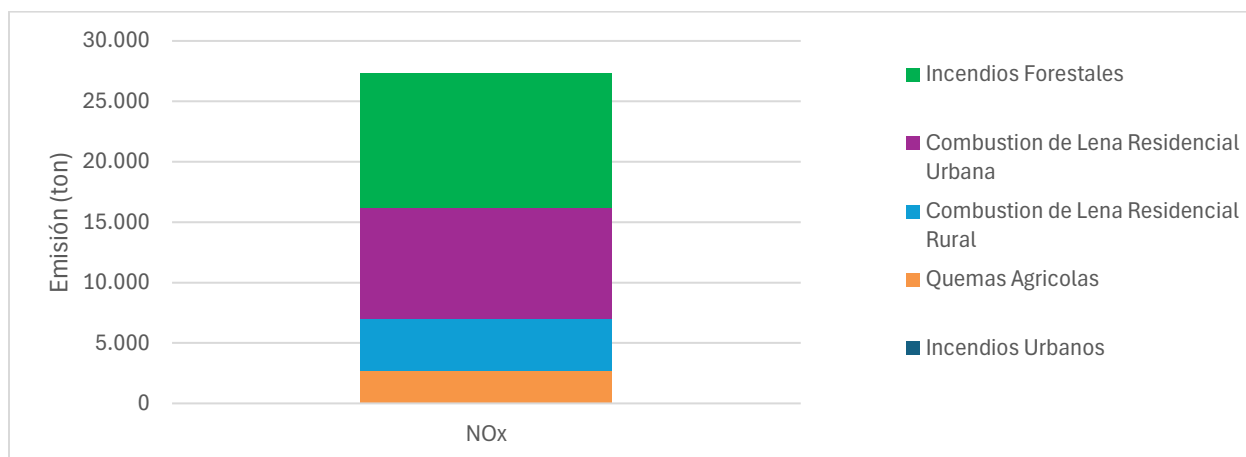


Figura 5-44 Emisiones NO_x de fuentes difusas por tipo de fuente año 2019 (ton)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

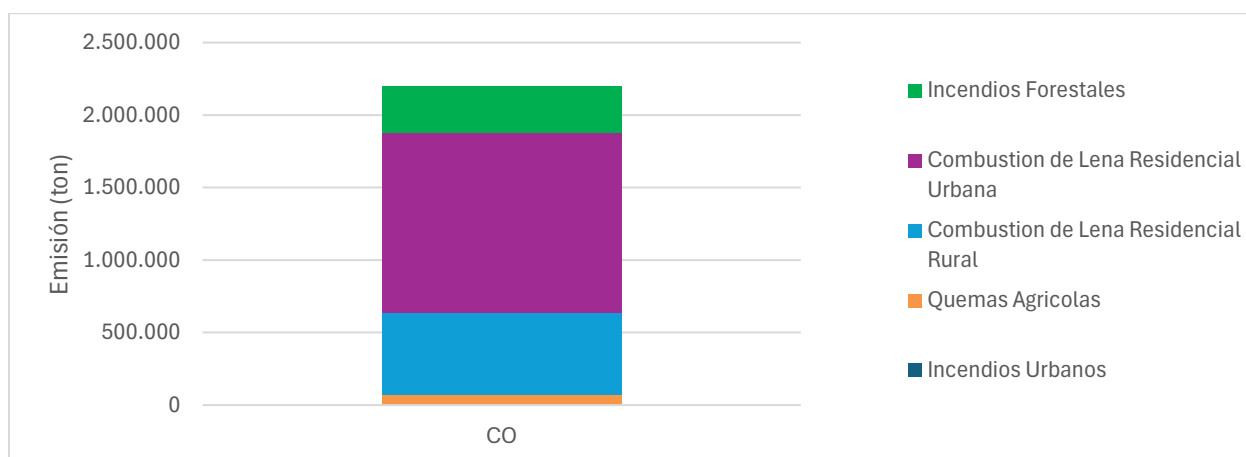


Figura 5-45 Emisiones CO de fuentes difusas por tipo de fuente año 2019 (ton)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

Análisis de emisiones fuentes difusas a nivel regional

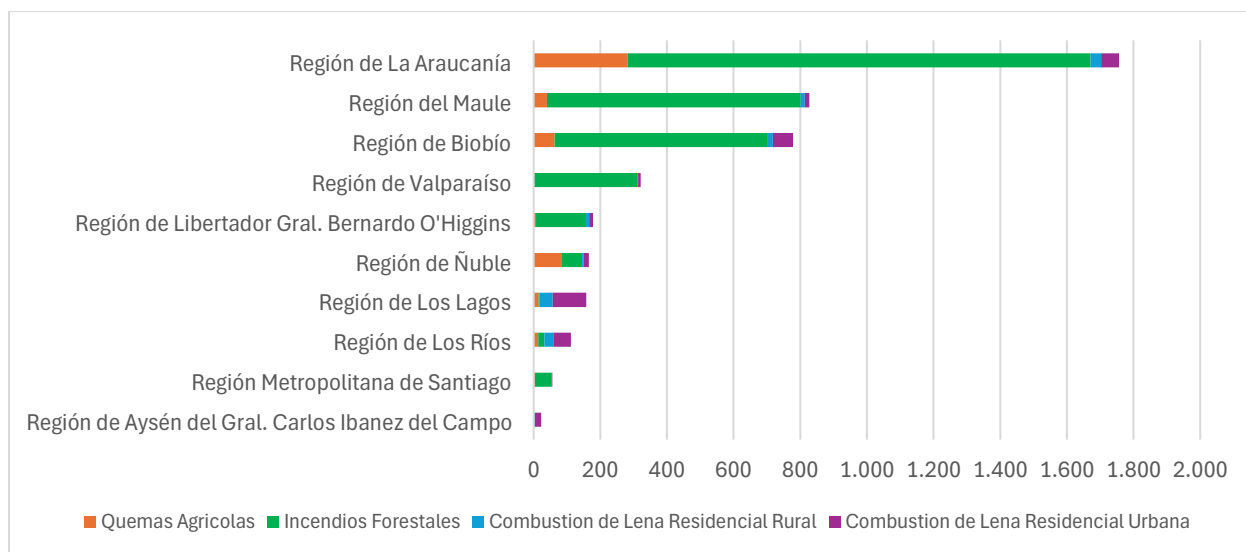
En la Tabla 5-17 se muestran las emisiones de fuentes difusas a nivel regional. Además, en la Figura 5-46, Figura 5-47 y Figura 5-48 se muestran las emisiones por región y tipo de fuente de SO₂, NO_x y CO respectivamente. Para mejorar la visualización se ocultaron las cinco regiones con menores emisiones para cada contaminante.

Se puede observar que las emisiones de SO₂ y NO_x se concentran en la Región de la Araucanía específicamente con un 31% emisiones de NO_x (8.480 ton), 40% de emisiones de SO₂ (1.757 ton). En el caso del CO las emisiones se concentran entre la Región de Biobío y Los Lagos, la región de Los Lagos posee mayores emisiones 24% del total (522.321 ton), luego La Araucanía con 21% de CO (469.779 ton) y Biobío con el 15% de las emisiones (329.123 ton).

Tabla 5-17 Emisiones de fuentes difusas por región y contaminante año 2019 (ton)

Región	SO ₂	NO _x	CO
Región de La Araucanía	1.757	8.480	469.779
Región del Maule	827	3.479	176.597
Región de Biobío	778	4.657	329.123
Región de Valparaíso	321	1.477	71.623
Región de Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	178	1.303	93.950
Región de Ñuble	166	1.335	98.370
Región de Los Lagos	158	3.385	522.321
Región de Los Ríos	112	1.835	274.134
Región Metropolitana de Santiago	56	658	53.746
Región de Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo	23	490	83.204
Región de Magallanes y de la Antártica Chilena	5	163	18.435
Región de Coquimbo	2	31	2.224
Región de Atacama	1	10	844
Región de Arica y Parinacota	1	8	624
Región de Antofagasta	1	13	1.501
Región de Tarapacá	-	5	786
Total	4.386	27.329	2.197.261

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC


Figura 5-46 Emisiones SO₂ de fuentes difusas por región y tipo de fuente año 2019 (ton)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

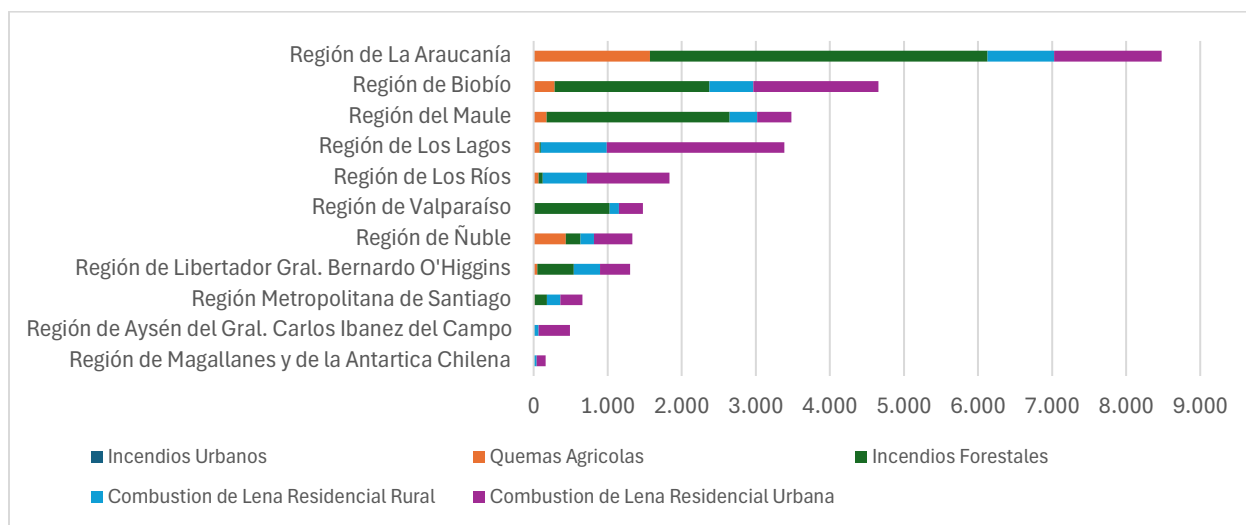


Figura 5-47 Emisiones NO_x de fuentes difusas por región y tipo de fuente año 2019 (ton)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

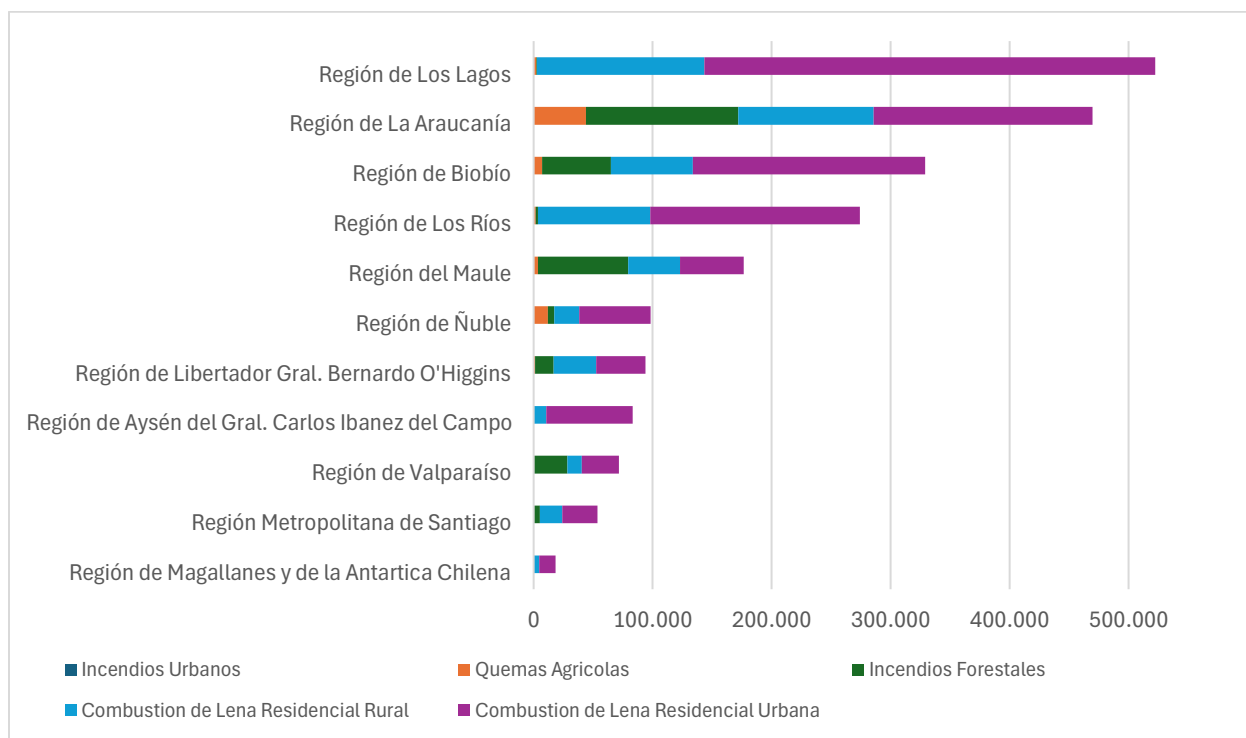


Figura 5-48 Emisiones CO de fuentes difusas por región y tipo de fuente año 2019 (ton)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

5.4.4 Emisiones totales

Las emisiones totales corresponden a la suma de emisiones de fuentes puntuales, móviles y difusas. Para realizar la consolidación de emisiones totales se analizó la información desde 2014 a 2021 de los datos públicos del RETC. Se escoge este periodo debido a que existe caracterización completa de emisiones a nivel regional y comunal para los tres tipos de emisión al aire. En Anexos Digitales se entrega el archivo “NCAire-Inventario_Consolidado.xlsx” con la información recopilada y procesada. A continuación, se realiza un análisis para cada contaminante.

En el caso de SO₂, las emisiones totales por tipo de emisión se muestran en la Tabla 5-18 y en la Figura 5-49 contiene la evolución de emisiones en el periodo 2014 - 2021. Se puede observar en el periodo aproximadamente el 94% de las emisiones de este contaminante provienen de fuentes puntuales.

Tabla 5-18 Evolución de emisiones totales para SO₂ por tipo de emisión al aire (ton/año)

Tipo de emisión al aire	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Fuentes Puntuales	144.362	148.068	338.904	295.931	270.894	119.356	70.983	120.375
Fuentes Móviles	187	206	208	209	138	144	117	146
Fuentes Difusas	10.680	16.105	12.994	46.528	1.730	4.386	4.199	733
Total	155.229	164.380	352.105	342.668	272.762	123.886	75.299	121.254

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC¹⁶

¹⁶ Disponible en <https://datosretc.mma.gob.cl/organization/retc?groups=emisiones-al-aire>

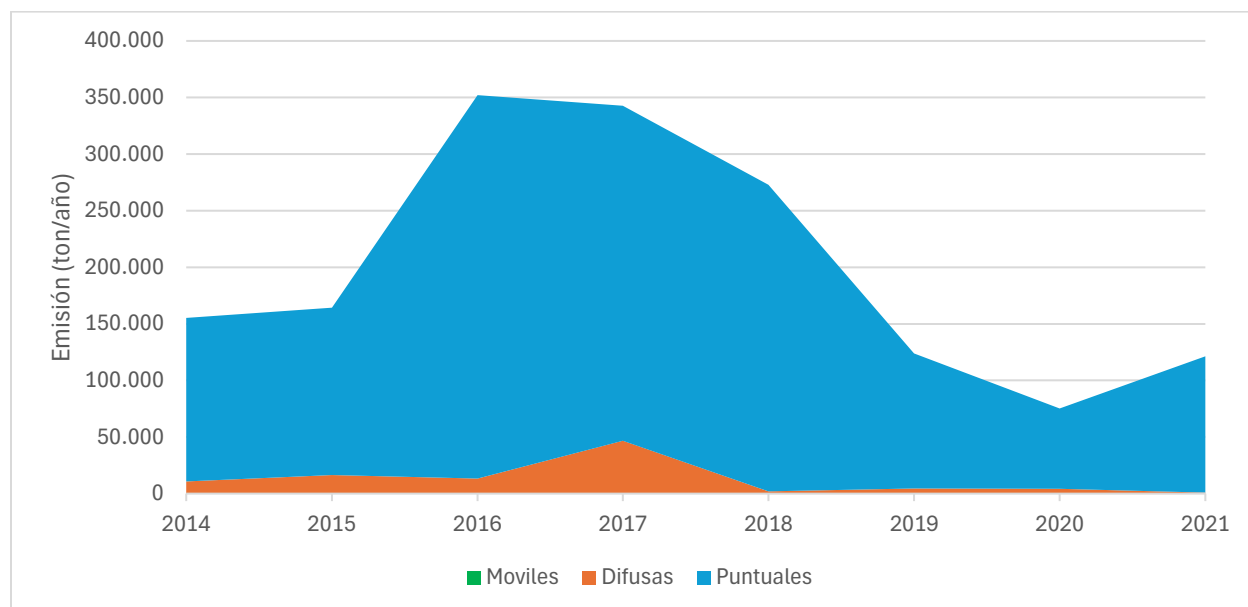


Figura 5-49 Evolución de emisiones totales de SO₂ por tipo de emisión al aire (ton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

En el caso de NO_x, en la Tabla 5-19 se muestran las emisiones por tipo de emisión al aire y año, y en la Figura 5-50 la evolución de emisiones en el tiempo. Destaca la presencia de las tres fuentes como emisoras. En el caso de las fuentes puntuales las emisiones de NO_x se caracterizan por establecimientos del sector industria y energía. En fuentes móviles proviene principalmente de vehículos particulares, comerciales y buses. Por último, en fuentes difusas proviene de combustión de leña residencial tanto urbana como rural.

Tabla 5-19 Evolución de emisiones totales de NO_x por tipo de emisión al aire (ton/año)

Tipo de emisión al aire	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Fuentes Puntuales	138.242	103.570	99.623	94.605	82.777	105.716	183.980	132.393
Fuentes Móviles	81.937	60.575	54.173	56.035	45.413	51.520	39.339	55.328
Fuentes Difusas	37.093	59.100	46.438	151.418	18.563	27.329	33.208	24.795
Total	257.272	223.245	200.235	302.058	146.753	184.565	256.527	212.516

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

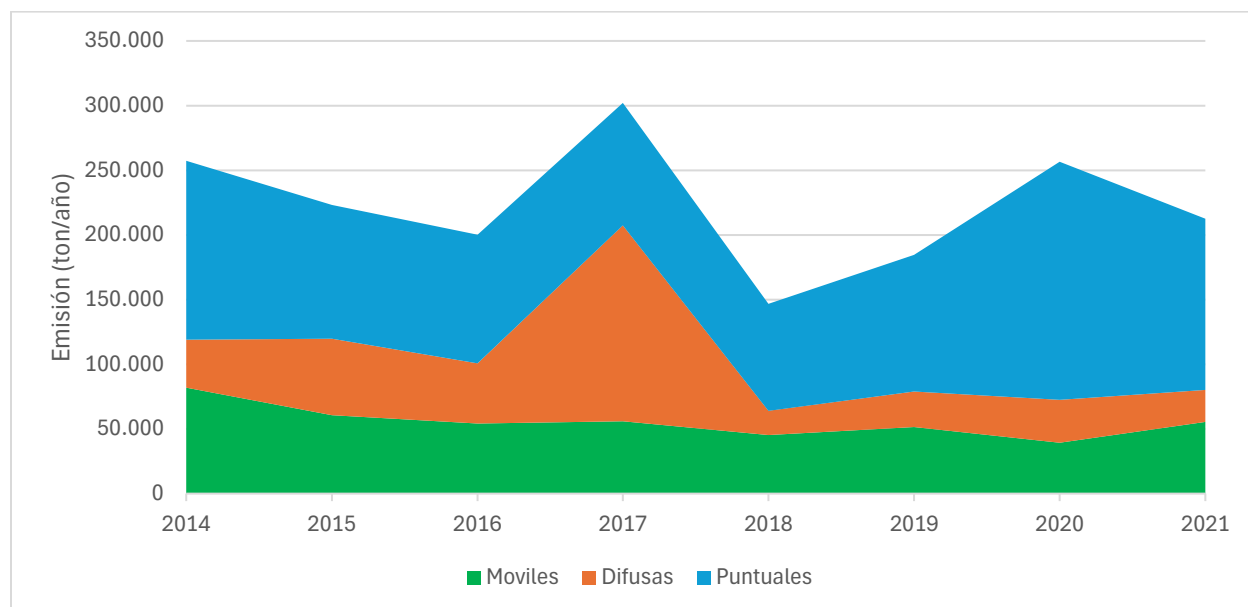


Figura 5-50 Evolución de emisiones totales de NO_x por tipo de emisión al aire (ton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

En el caso de CO, en la Tabla 5-20 se muestran las emisiones por tipo de emisión al aire y año, y en la Figura 5-51 la evolución de emisiones en el tiempo. Destaca la presencia de las emisiones de fuentes difusas, en el que se compone en su mayoría las emisiones por la combustión de leña residencial tanto urbana como rural.

Tabla 5-20 Evolución de emisiones totales de CO por tipo de emisión al aire (ton/año)

Contaminante	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Fuentes Puntuales	122.801	127.941	131.460	132.096	126.165	107.623	119.048	152.576
Fuentes Móviles	289.462	215.395	196.903	204.025	145.935	137.022	101.228	156.071
Fuentes Difusas	3.704.863	2.687.049	2.519.552	4.891.830	1.944.884	2.197.261	3.039.193	2.857.401
Total	4.117.126	3.030.385	2.847.914	5.227.951	2.216.984	2.441.906	3.259.469	3.166.048

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

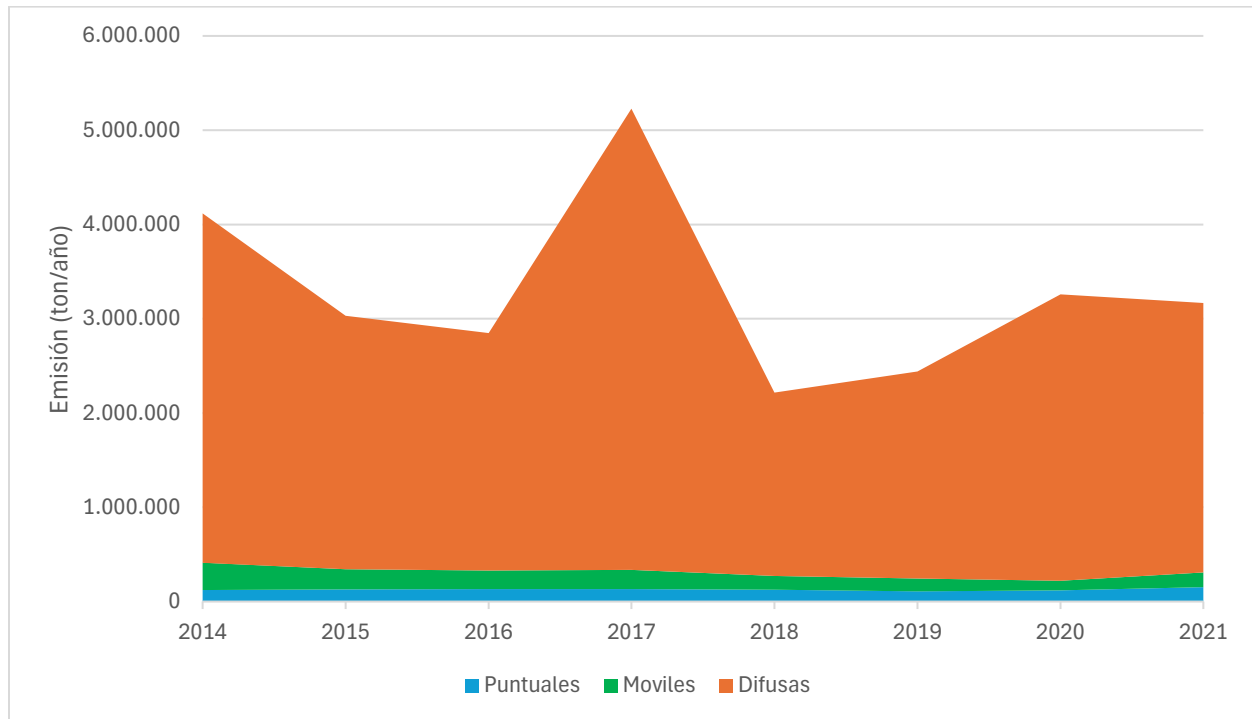


Figura 5-51 Evolución de emisiones totales de CO por tipo de emisión al aire (ton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

Análisis de emisiones totales a nivel regional

En la Figura 5-52, Figura 5-53 y Figura 5-54 se muestran las emisiones totales por región para el SO₂, NO_x y CO respectivamente. Para el SO₂ se observa que en los últimos años las emisiones se concentran en las regiones de Antofagasta, O'Higgins, Valparaíso y Atacama. Para el NO_x se observa que las emisiones de concentran en las regiones de Biobío, Metropolitana de Santiago, Antofagasta y Valparaíso. Por último, para el CO en Araucanía, Biobío y Los Lagos.

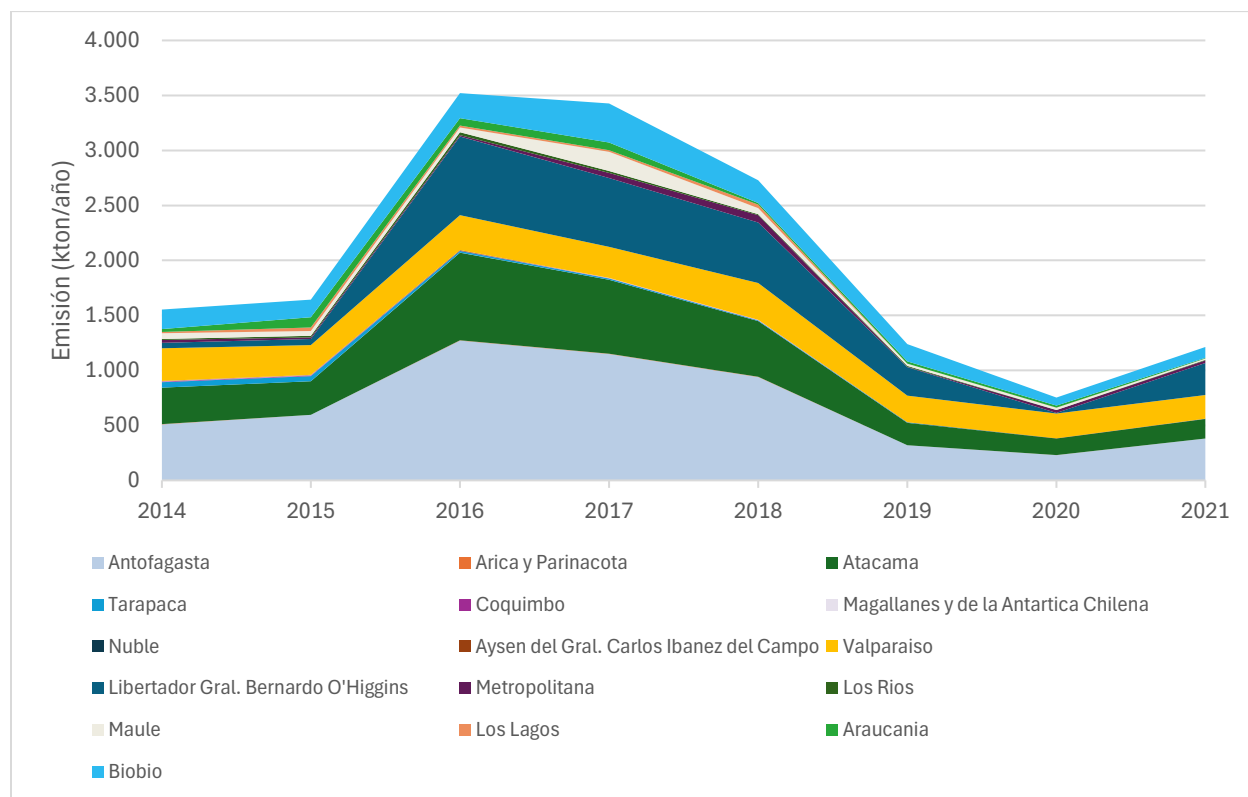


Figura 5-52 Evolución de emisiones totales de SO₂ por región (ton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

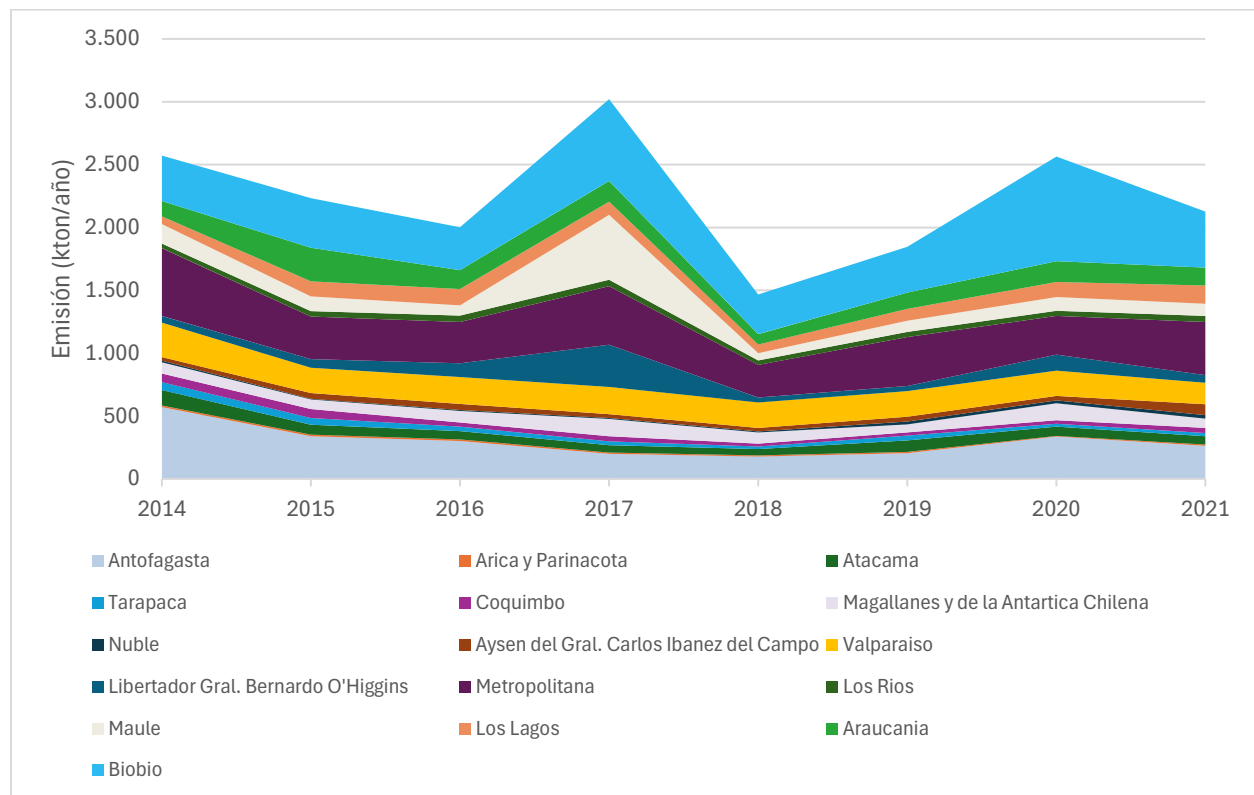


Figura 5-53 Evolución de emisiones totales de NO_x por región (ton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

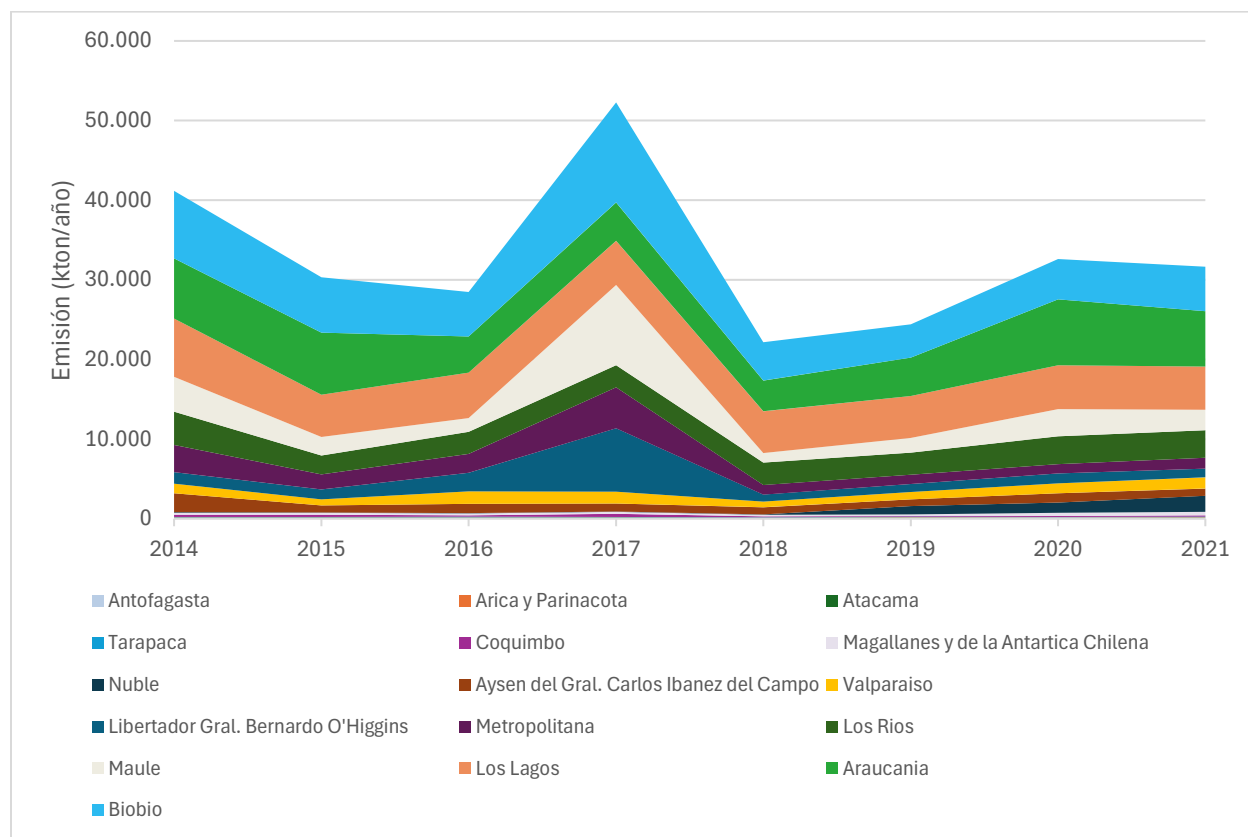


Figura 5-54 Evolución de emisiones totales de CO por región (ton/año)

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de emisiones reportadas al RETC

5.4.5 Relación Factor Emisión Concentración

Análisis por fuente de zona de interés

En la Tabla 5-21 se muestran los valores de emisión y concentración de SO₂ de las zonas de interés abordadas en la Sección 5.3.5. Aquellas filas con valores en blanco en la tabla significan que no hay datos de concentraciones para los respectivos años.

Tabla 5-21 Emisión y concentración de zonas de interés SO₂

Contaminante	Región	Zona de interés	Comuna	Año	Emisión SO ₂ (ton) ¹	Concentración SO ₂ (µg/m ³) ²
SO ₂	II	Tocopilla	Tocopilla	2014	18.897	16
				2015	12.666	10
				2016	7.194	6
				2017	5.287	7
				2018	7.869	6
				2019	2.061	9
				2020	1.929	10
				2021	2.595	12
	III	Copiapó	Copiapó Tierra Amarilla	2014	5.597	
				2015	4.677	
				2016	13.989	
				2017	14.786	
				2018	18.141	
				2019	8.991	4
				2020	8.001	5
				2021	4.978	5
	V	Puchuncaví	Puchuncaví Quintero	2014	19.140	11
				2015	16.168	12
				2016	20.118	12
				2017	15.586	15
				2018	16.251	12
				2019	14.357	9
				2020	14.998	10
				2021	13.570	14
	V	Catemu	Catemu	2014	7.388	36
				2015	8.134	24
				2016	9.875	24
				2017	8.921	26
				2018	10.281	24
				2019	9.552	22
				2020	4.776	22
				2021	7.958	23
	VIII	Coronel	Coronel	2014	9.067	6
				2015	3.672	6
				2016	4.933	7
				2017	4.350	5
				2018	5.062	4
				2019	4.467	4
				2020	3.642	3
				2021	4.213	6

Nota 1: Se considera la suma de las emisiones de las comunas de la zona de interés.

Nota 2: Se considera el promedio de concentraciones de las comunas de la zona de interés.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5-22 se muestran los valores de emisión y concentración de O₃ de las zonas de interés abordadas en la Sección 5.3.5.

Tabla 5-22 Emisión y concentración de zona de interés O₃

Contaminante	Región	Zona de interés	Comuna	Año	Emisión NO _x (ton) ¹	Concentración O ₃ (µg/m ³) ²
O ₃	III	Huasco	Huasco	2014	9.515	
				2015	5.173	
				2016	4.743	
				2017	3.552	26
				2018	3.677	32
				2019	4.622	35
				2020	3.984	36
				2021	4.324	33
	V	Los Andes	Los Andes	2014	1.869	
				2015	77	
				2016	69	
				2017	78	
				2018	441	
				2019	641	52
				2020	809	56
				2021	727	56
	V	Quillota	Quillota	2014	1.869	
				2015	1.349	
				2016	1.683	
				2017	1.884	
				2018	1.616	
				2019	1.723	
				2020	976	24
				2021	635	24
	V	Concón	Concón	2014	1.198	24
				2015	1.141	29
				2016	365	31
				2017	1.305	34
				2018	1.674	27
				2019	1.299	35
				2020	1.276	49
				2021	2.041	42
	M	Santiago	Cerrillos - Cerro Navia El Bosque - Independencia La Florida - Las Condes Pudahuel - Puente Alto Quilicura - Santiago Talagante	2014	1.537	28
				2015	2.059	27
				2016	1.437	26
				2017	1.470	28
				2018	8.098	27
				2019	9.941	30
				2020	10.746	34
				2021	11.486	32
	VI	Rengo	Rengo	2014	527	26
				2015	943	23
				2016	337	26
				2017	663	42
				2018	464	
				2019	235	
				2020	201	30
				2021	549	25
		San Fernando	San Fernando	2014	98	28
				2015	200	28

Contaminante	Región	Zona de interés	Comuna	Año	Emisión NO _x (ton) ¹	Concentración O ₃ (µg/m ³) ²
				2016	151	21
				2017	541	28
				2018	618	29
				2019	628	31
				2020	683	33
				2021	509	28

Nota 1: Se considera la suma de las emisiones de las comunas de la zona de interés.

Nota 2: Se considera el promedio de concentraciones de las comunas de la zona de interés.

Fuente: Elaboración propia

A modo de ejemplo, se muestra la relación emisión concentración de SO₂ para la zona de interés de Coronel en la Figura 5-55 y la relación emisión concentración de NO_x para la zona de interés Concón en la Figura 5-56. De las figuras se puede observar que la correlación entre los puntos muestreados es baja, de manera similar se comporta para las otras zonas de interés. En las figuras la pendiente de la ecuación de la recta representa la relación FEC. En el Anexo 5 se presentan las visualizaciones de cada zona de interés, con las respectivas pendientes y correlaciones de los puntos muestreados.

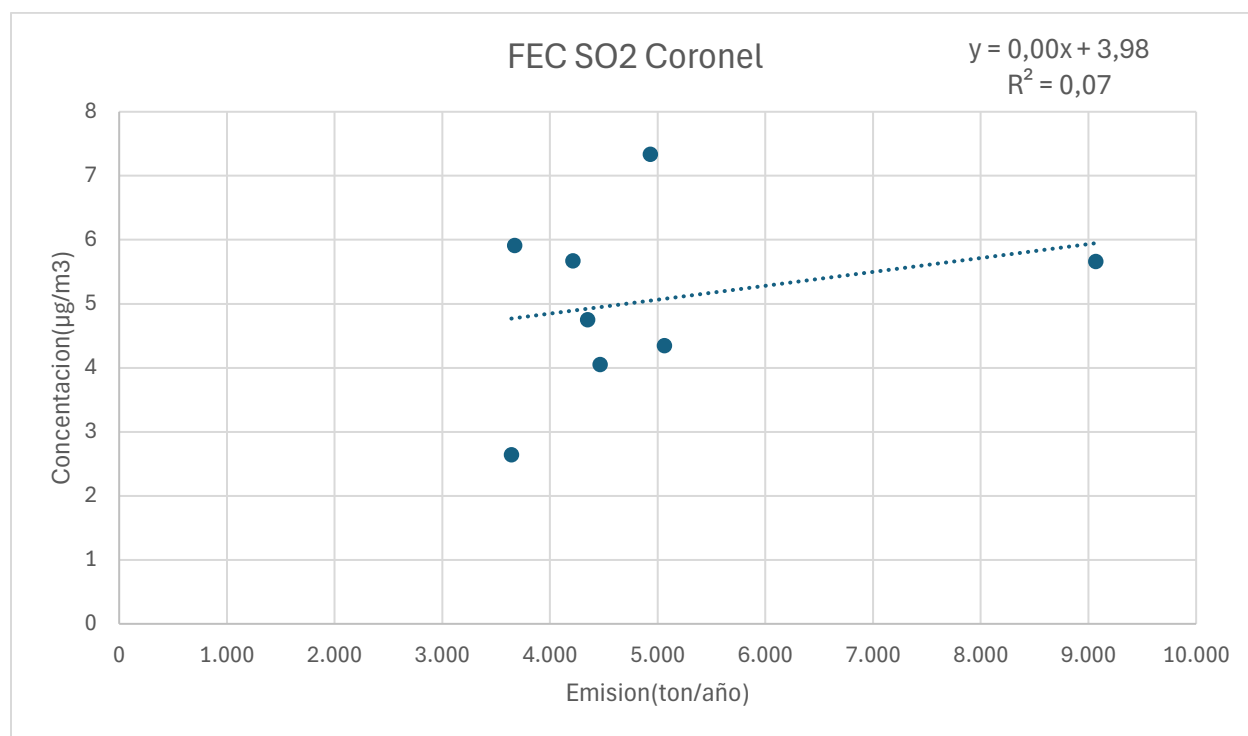


Figura 5-55 Relación Emisión Concentración para SO₂ Coronel

Fuente: Elaboración propia

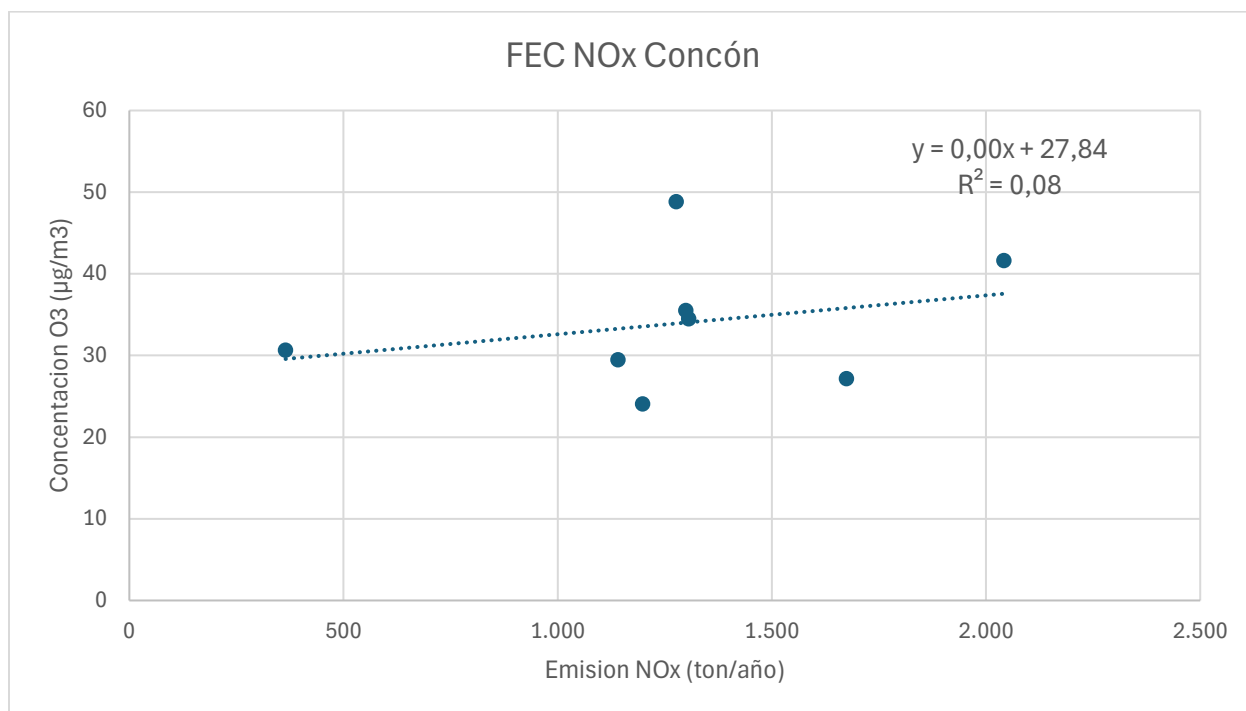


Figura 5-56 Relación Emisión Concentración para NO_x Concón

Fuente: Elaboración propia

5.5 Proyección del inventario de emisiones a 10 años

Se realizó una proyección de emisiones para un periodo de 10 años a partir del año 2022, en un escenario “*business as usual*” (línea base) que no considera la implementación de compensaciones o mejoras adicionales a aquellas que puedan estar ya comprometidas por las empresas (ej. RCAs).

De acuerdo a lo analizado en la Sección 5.3, se realizará la proyección para las comunas de la zona de interés que se encuentran en la Tabla 5-2. Esta sección se divide en la metodología de proyección y los resultados para Fuentes Puntuales y Fuentes Móviles.

5.5.1 Metodología

5.5.1.1 Metodología proyección Fuentes Puntuales

La proyección de línea base se realiza a partir de la tendencia de emisiones de las fuentes puntuales afectos al sistema de impuesto verde, utilizando como fuente de información las emisiones de 2017 – 2022 enviadas por la contraparte. Con las tendencias de emisiones de cada contaminante por comuna, se estima una tasa de crecimiento/decrecimiento para cada contaminante. De esta forma, las emisiones se proyectan de acuerdo a la Ecuación 3.

Ecuación 3 Proyección de emisiones fuentes puntuales

$$E_{n,c}^p = E_{n-1,c}^p * (1 + \beta_c^p)$$

Siendo $E_{n,c}^p$ Emisión del año n de la comuna c del contaminante p y β_c^p la tasa por comuna c del contaminante p . La emisión del año n es el resultado de la emisión del año anterior por la proporción de crecimiento/decrecimiento por contaminante y comuna. Cada comuna de interés tiene una tasa de crecimiento o decrecimiento.

En la Tabla 5-23 se presenta la tasa de crecimiento o decrecimiento anual de las emisiones para las comunas de interés para SO₂ y NO_x respectivamente.

Tabla 5-23 Tasa de crecimiento/decrecimiento por comuna para SO₂ y NO_x

Comuna	Cod Comuna	Tasa (β^{SO_2})	Tasa (β^{NO_x})
Coronel	8102	-8%	-7%
Huasco	3304	1%	1%
Puchuncaví	5105	-18%	-32%
Puente Alto	13201	-17%	-3%
Quilicura	13125	-17%	7%
Quillota	5501	17%	3%
Quintero	5107	13%	19%
Talagante	13601	-24%	-26%
Tocopilla	2301	-34%	-28%

Fuente: Elaboración propia

Para proyectar las emisiones por tipo de fuente se realizan dos supuestos principales:

- 1) Pertenencia de establecimiento en el Plan de retiro de centrales termoeléctricas en base a carbón (Larraín & Melej, 2023): se retiran los establecimientos asociados a termoeléctricas que cerrarán sus unidades a carbón en los años comprometidos por los titulares. Si el establecimiento está en este plan, se considerará cero emisiones desde el año de cierre. En la Tabla 5-24 se muestran los establecimientos que salen por el Plan y su respectivo año de retiro.

Tabla 5-24 Establecimientos que salen por Plan de Retiro de Centrales Termoeléctricas

Id Vu	Establecimiento	Comuna	Combustible	Año retiro
5441787	CENTRAL TERMICA TOCOPILLA	Tocopilla	Carbón	2023
5441787	CENTRAL TERMICA TOCOPILLA	Tocopilla	Carbón	2023
5441923	CENTRAL TERMOELECTRICA BOCAMINA U1	Coronel	Carbón	2023
85823	CENTRAL TERMOELÉCTRICA VENTANAS UNIDADES 1 Y 2	Puchuncaví	Carbón	2023
5441768	CENTRAL TARAPACÁ	Iquique	Carbón	2023
85823	CENTRAL TERMOELÉCTRICA VENTANAS UNIDADES 1 Y 2	Puchuncaví	Carbón	2024
4917485	CENTRAL TERMOELECTRICA CAMPICHE	Puchuncaví	Carbón	2025
309729	CENTRAL TERMOELÉCTRICA NUEVA VENTANAS	Puchuncaví	Carbón	2025
5441785	CENTRAL TÉRMICA MEJILLONES	Mejillones	Carbón	2025
5441785	CENTRAL TÉRMICA MEJILLONES	Mejillones	Carbón	2025
5452292	CENTRAL TERMOELÉCTRICA ANGAMOS	Mejillones	Carbón	2025
5452292	CENTRAL TERMOELÉCTRICA ANGAMOS	Mejillones	Carbón	2025
5441369	CENTRAL TERMOELÉCTRICA NUEVA TOCOPILLA	Tocopilla	Carbón	2026
5441369	CENTRAL TERMOELÉCTRICA NUEVA TOCOPILLA	Tocopilla	Carbón	2026

Fuente: Elaboración propia en base a Larraín & Melej (2023)

- 2) Si la emisión del año anterior es cero, entonces las emisiones de años posteriores seguirán siendo cero. En la Tabla 5-25 se entrega una lista con los establecimientos afectos al Sistema de Impuesto Verde que no cuentan con emisiones para los años 2019 – 2022.

Tabla 5-25 Establecimientos que no cuentan con emisiones periodo 2019 – 2022

Id Vu	Establecimiento	Comuna	Id Vu	Establecimiento	Comuna
322	CPP - MOSTAZAL	Mostazal	322488	CMPC PULP SA PLANTA PACIFICO	Collipulli
742	EAGON LAUTARO S.A.	Lautaro	323615	CENTRAL CORONEL SA	Coronel
2396	PLANTA CONSTITUCION	Constitución	323747	PLANTA SUGAL CHILE - TALCA	Talca
2397	PLANTA ARAUCO	Arauco	348951	ENERGIA PACIFICO S.A.	Mostazal
2549	ASERRADERO MULCHEN	Mulchén	386135	CENTRAL ESPERANZA - REQUINOA	Requinoa
3006	PLANTA AGROZZI TENO	Teno	386458	CENTRAL TERMOELECTRICA LAJA	Cabrero
3216	CMPC CELULOSA PLANTA LAJA	Laja	1625860	CORPESCA ARICA	Arica
3224	COMPLEJO PESQUERO INDUSTRIAL CORONEL	Coronel	2342251	COMASA LAUTARO	Lautaro
3478	CORPESCA IQUIQUE	Iquique	4585604	CENTRAL TERMOELECTRICA SAN LORENZO DE ENLASA CHILE	Diego de Almagro
3522	CMPC CELULOSA PLANTA SANTA FE	Nacimiento	4585623	ELECTRICA NUEVA ENERGIA S.A. CENTRAL ESCUADRON	Coronel
4468	ASERRADEROS VALDIVIA	Mariquina	4585770	FAENA COYA SUR	María Elena
4473	PLANTA VINALES	Constitución	4586033	CENTRAL TERMOELECTRICA DIEGO DE ALMAGRO DE ENEL CHILE	Diego de Almagro
6638	GUACOLDA	Huasco	4586106	CENTRAL TERMOELECTRICA ANTILHUE	Valdivia
6940	ENERGIAS INDUSTRIALES SA	Yerbas Buenas	4586116	PLANTA TRUPAN/CHOLGUAN	Yungay
7047	PLANTA INDUSTRIAS ISLA QUIHUA-LOTA	Lota	4803700	DIVISION CHUQUICAMATA	Calama
9778	RENCA NUEVA RENCA	Renca	5440464	TRES PUENTES	Punta Arenas
9898	PLANTA TISSUE TALAGANTE	Talagante	5441703	SUGAL CHILE PLANTA TILCOCO	Quinta de Tilcoco
11626	CCU - QUILICURA	Quilicura	5441768	CENTRAL TERMOELECTRICA TARAPACA	Iquique
64566	MINERA ESCONDIDA	Antofagasta	5441785	CENTRAL TERMICA MEJILLONES	Mejillones
78632	REFINERIA BIO BIO	Hualpén	5441787	CENTRAL TERMICA TOCOPILLA	Tocopilla
85016	PLANTA LICANCEL	Licantén	5441788	ENAEX MEJILLONES	Mejillones
85017	NUEVA ALDEA	Ranquil	5441884	METHANEX CHILE S.A.	Punta Arenas
85018	PLANTA VALDIVIA	Mariquina	5441910	PLANTA CHAMANCHACA CORONEL	Coronel
85823	CENTRAL TERMOELECTRICA VENTANAS UNIDADES 1 Y 2	Puchuncaví	5441923	CENTRAL TERMOELECTRICA BOCAMINA U1	Coronel
85824	CENTRAL TERMOELECTRICA LAGUNA VERDE	Valparaíso	5443291	CORPESCA IQUIQUE	Iquique
88406	COMPLEJO CELCO PLANTA ARAUCO CENTRAL HORCONES	Arauco	5452233	CENTRAL TERMOELECTRICA COCHRANE	Mejillones
95554	PLANTA NUBLE - IANSAGRO	San Carlos	5452292	CENTRAL TERMOELECTRICA ANGAMOS	Mejillones
96760	MASISA - CABRERO	Cabrero	5452311	SOPROLE	San Bernardo
99599	CORPESCA MEJILLONES	Mejillones	5453674	PLANTA ORIZON - TALCAHUANO	Talcahuano
100618	PLANTA ORIZON - CORONEL	Coronel	5453818	CENTRAL ATACAMA	Mejillones
245367	ORAFIT CHILE S.A.	Pemuco	5466834	CENTRAL TERMOELECTRICA SW CONSULTING SA	Diego de Almagro
245656	CENTRAL CARDONES	Copiapó	5467880	CT LOS GUINDOS	Cabrero
245714	UNIPAPEL	San Pedro de la Paz	5473202	PLANTA CO GENERADORA	Concón
245724	CENTRAL TERMOELECTRICA YUNGAY	Cabrero			

Fuente: Construido en base a datos enviados por MMA mayo 2024

5.5.1.2 Metodología proyección Fuentes Móviles

La proyección se realiza a partir de la tendencia de emisiones de las fuentes móviles por tipo de vehículo. Se utilizan las emisiones de 2008 – 2021 de la base de datos original del RETC. Con las tendencias de emisiones por tipo de vehículo se estima una tasa de crecimiento/decrecimiento para cada contaminante. Luego, las emisiones se proyectan de acuerdo a la Ecuación 4.

Ecuación 4 Proyección de emisiones fuentes móviles

$$E_{n,v}^p = E_{n-1,v}^p * (1 + \beta_v^p)$$

Siendo $E_{n,v}^p$ emisiones del año n por tipo de vehículo v del contaminante p y β_v^p la tasa de crecimiento o decrecimiento por tipo de vehículo v para cada contaminante p .

Las emisiones por tipo de vehículo v del año n del contaminante p es el resultado de la multiplicación de emisiones del año anterior y la proporción que aumenta o decrece por contaminante p . En la Tabla 5-26 se muestran las tasas de crecimiento y decrecimiento por tipo de vehículo y contaminante. Se puede observar de la tendencia de emisiones que estas tienden a la baja en el tiempo.

Tabla 5-26 Tasa de crecimiento por tipo de vehículo

Tipo de vehículo	Tasa (β^{SO_2})	Tasa (β^{NO_x})	Tasa (β^{CO})
Buses	-49%	1%	0%
Camiones	-49%	-3%	-1%
Motocicletas	-6%	-8%	-11%
Taxis-Colectivos	-4%	-9%	-13%
Vehículos comerciales	-9%	1%	-32%
Vehículos medianos*	-	-	-
Vehículos particulares	-5%	-9%	-11%

Nota*: No se realiza la proyección de vehículos medianos por la discontinuidad de emisiones para los últimos años de emisiones (2018-2021).

Fuente: Elaboración propia

5.5.2 Resultados

En Anexos Digitales se presentan dos archivos con los resultados de cada proyección. Para fuentes puntuales se encuentra el archivo “NCAire-Proyeccion_FuentesPuntualesImpuestoVerde” y para fuentes móviles en “NCAire-Proyeccion_FuentesMoviles”. A continuación, se analizan los resultados por separado.

5.5.2.1 Fuentes Puntuales

Emisiones totales de fuentes puntuales

En la Tabla 5-27 se muestra la proyección de emisiones de fuentes puntuales por contaminante y en la Figura 5-57 se muestra la tendencia en gráfico. Se puede observar que hay una tendencia global a la baja para ambos contaminantes hasta el año 2027, luego incrementa levemente las emisiones.

Tabla 5-27 Proyección de emisiones (ton) de fuentes puntuales por contaminante

Año	NO _x	SO ₂
2017	24.684	17.063
2018	25.277	18.471
2019	21.360	16.107
2020	19.492	13.760
2021	20.634	15.313
2022	15.485	10.337
2023	11.353	7.449
2024	10.470	6.703
2025	9.178	4.890
2026	8.558	4.374
2027	8.529	4.419
2028	8.618	4.344
2029	8.711	4.330
2030	8.840	4.332
2031	9.008	4.350
2032	9.221	4.386

Fuente: Elaboración propia

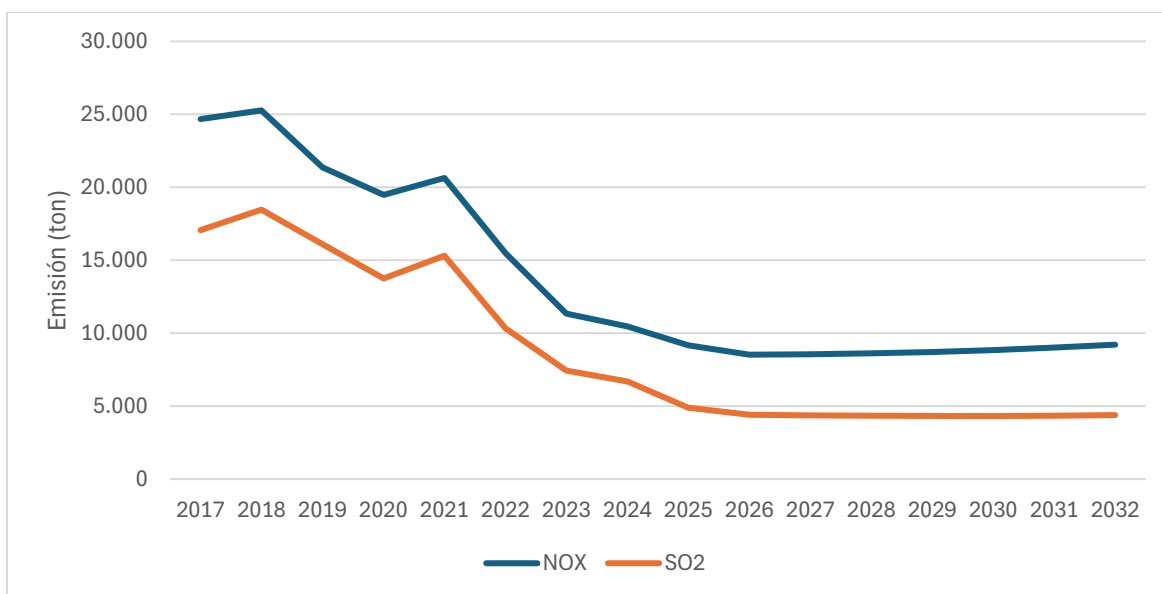


Figura 5-57 Trayectoria de emisiones línea base por contaminante

Fuente: Elaboración propia

Análisis de proyección de emisiones de fuentes puntuales por rubro

En la Figura 5-58 y Figura 5-59 se muestra la proyección de emisiones de fuentes puntuales para SO_2 y NO_x respectivamente. Se puede observar que tiende a disminuir las emisiones de los rubros de estas empresas.

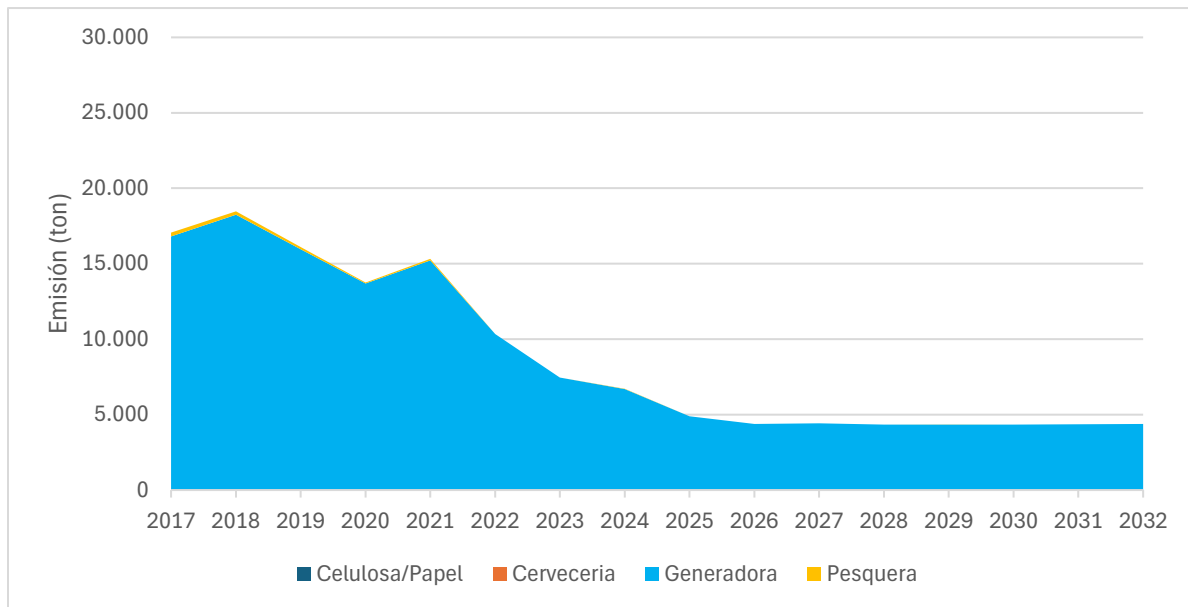


Figura 5-58 Proyección de emisiones SO_2 de fuentes puntuales por rubro

Fuente: Elaboración propia

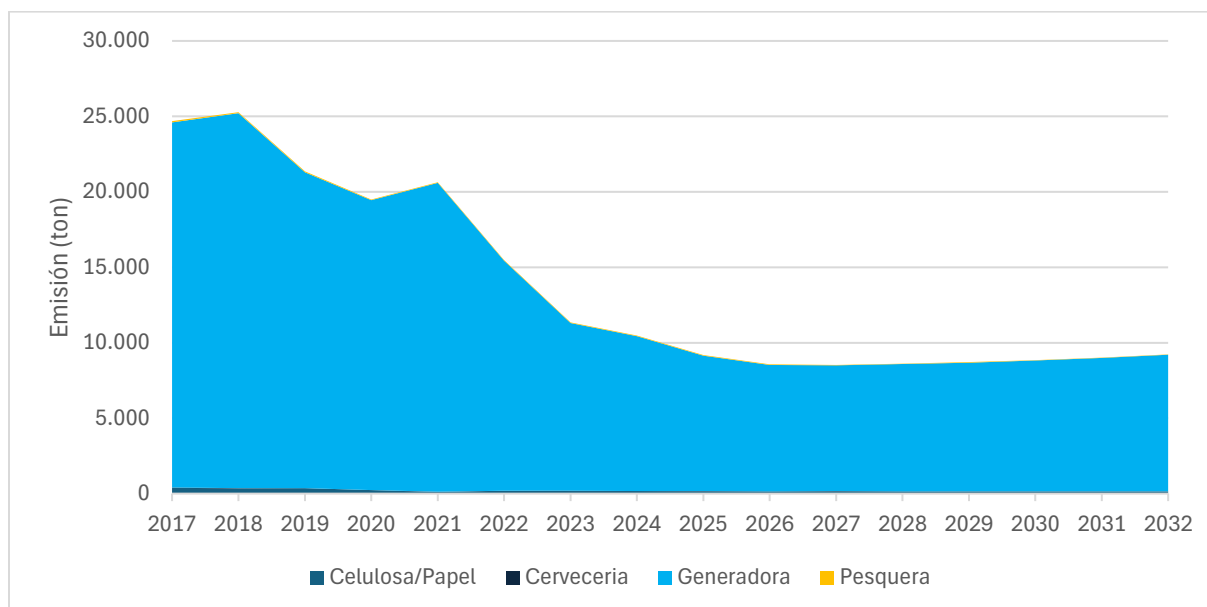


Figura 5-59 Proyección de emisiones NO_x de fuentes puntuales por rubro

Fuente: Elaboración propia

Análisis de proyección de emisiones de fuentes puntuales a nivel regional

En la Figura 5-60 y Figura 5-61 se muestra la proyección de emisiones por región. Cabe destacar que las regiones que se presentan son de los establecimientos afectos a Sistema de Impuesto Verde. Se observa que las emisiones predominan en la Región de Atacama para el SO₂ y en el caso de NO_x para las regiones de Valparaíso y Antofagasta.

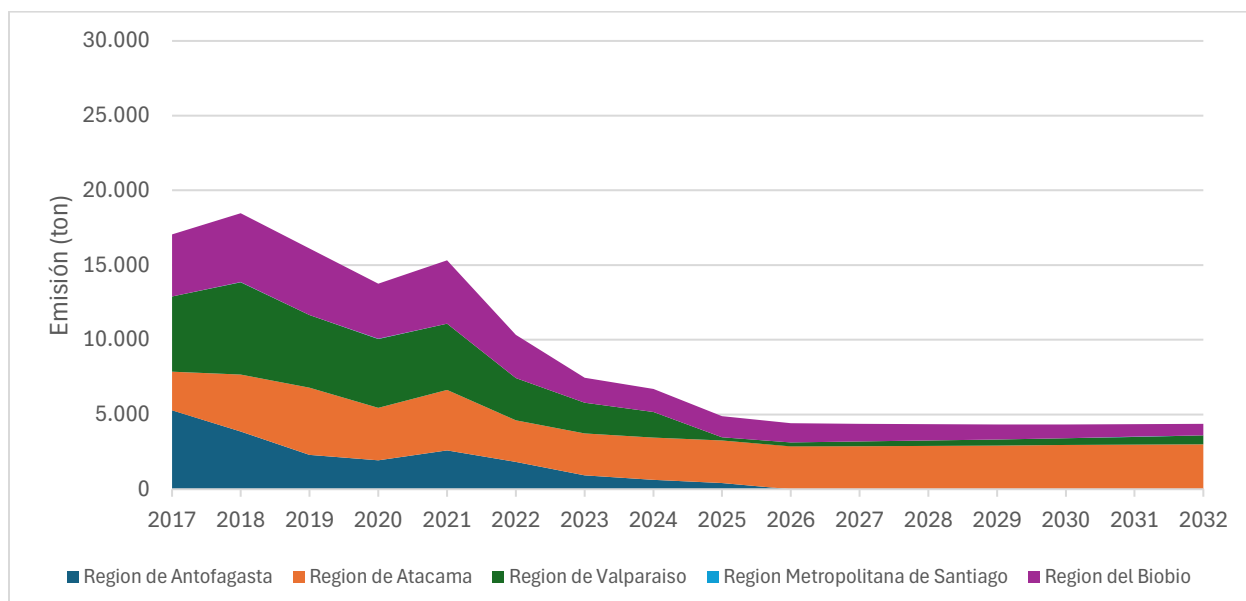


Figura 5-60 Proyección de emisiones SO₂ de fuentes puntuales por región

Fuente: Elaboración propia

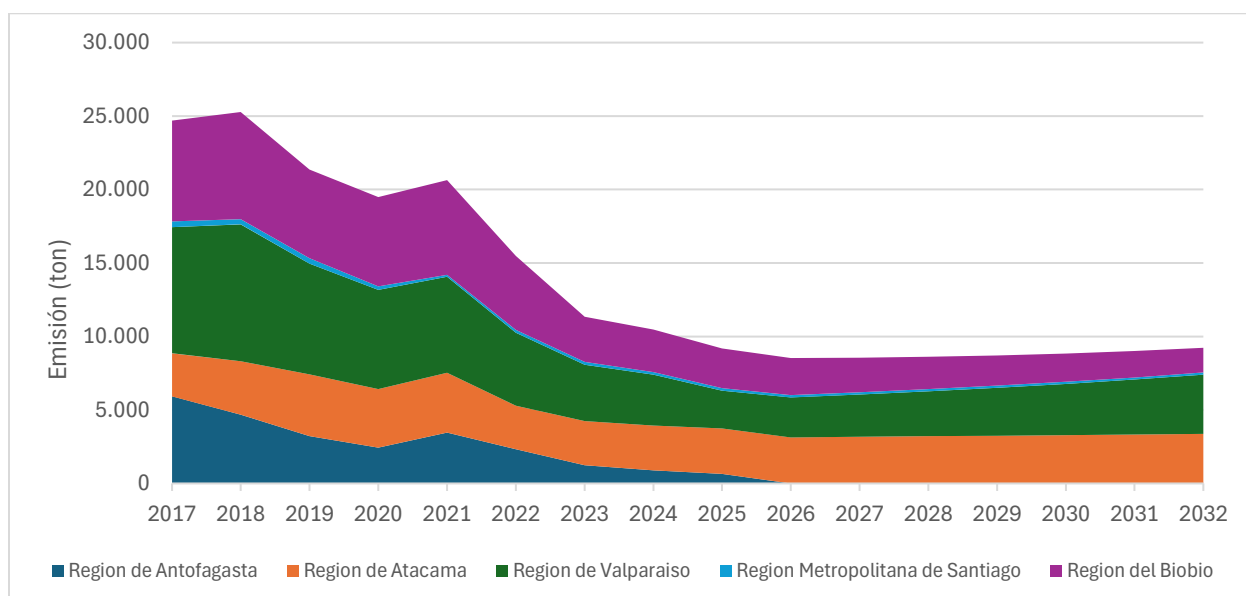


Figura 5-61 Proyección de emisiones NO_x de fuentes puntuales por región

Fuente: Elaboración propia

5.5.2.2 Fuentes Móviles

En la Tabla 5-28 se muestra la proyección de emisiones de fuentes móviles por contaminante y en la Figura 5-62, Figura 5-63 y Figura 5-64 se muestra la tendencia de SO₂, NO_x y CO respectivamente. Se puede observar que hay una tendencia global a la baja para los tres

contaminantes. Lo anterior ocurre debido que las tasas obtenidas de las emisiones históricas tienden a ser negativas, y por ende, bajan las emisiones en la proyección.

Tabla 5-28 Proyección de emisiones (ton) de fuentes móviles por contaminante

Año	SO ₂	NO _x	CO
2017	209	56.035	204.025
2018	138	45.413	145.935
2019	144	51.520	137.022
2020	117	39.339	101.228
2021	146	55.328	156.071
2022	126	53.824	133.795
2023	113	52.470	115.853
2024	104	51.252	101.159
2025	96	50.158	88.945
2026	90	49.179	78.657
2027	84	48.302	69.895
2028	79	47.521	62.362
2029	75	46.826	55.835
2030	71	46.210	50.145
2031	67	45.666	45.160
2032	63	45.188	40.775

Fuente: Elaboración propia

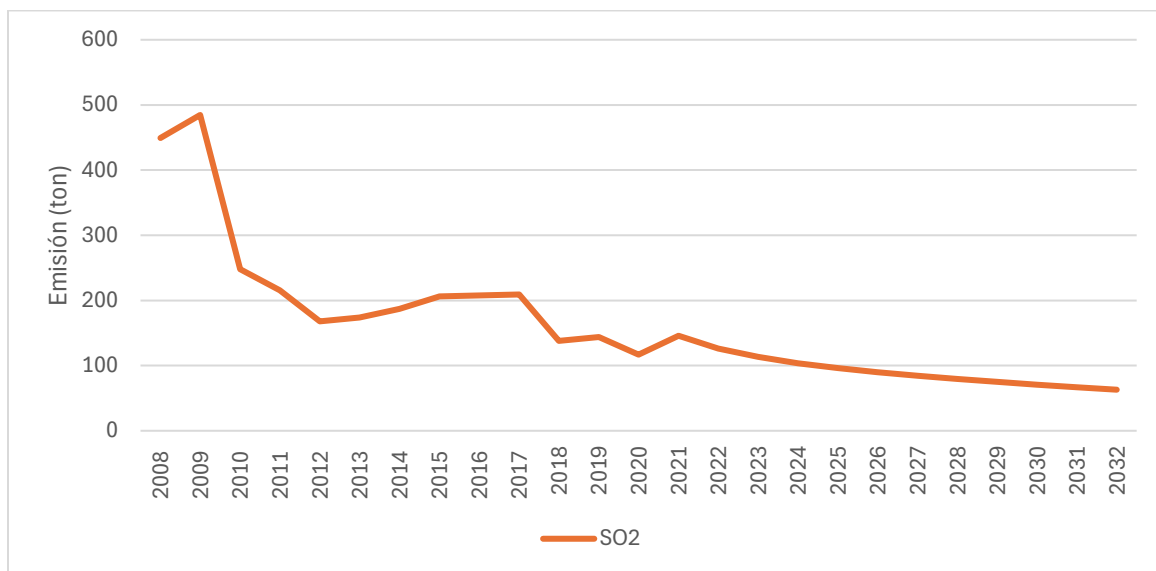


Figura 5-62 Proyección de emisiones (ton) SO₂ de fuentes móviles

Fuente: Elaboración propia

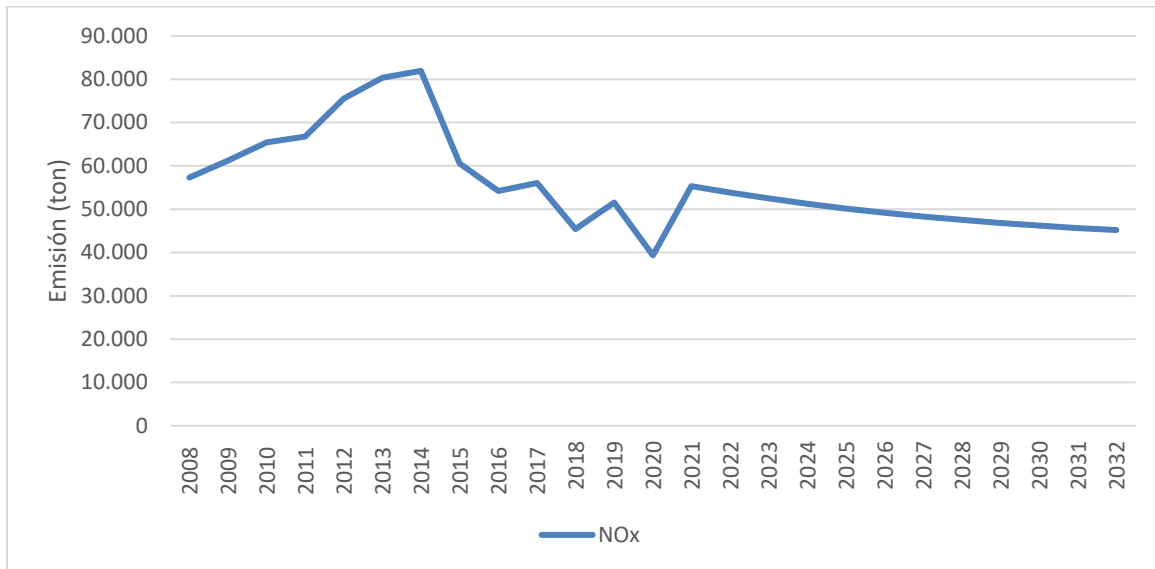


Figura 5-63 Proyección de emisiones (ton) NO_x de fuentes móviles

Fuente: Elaboración propia

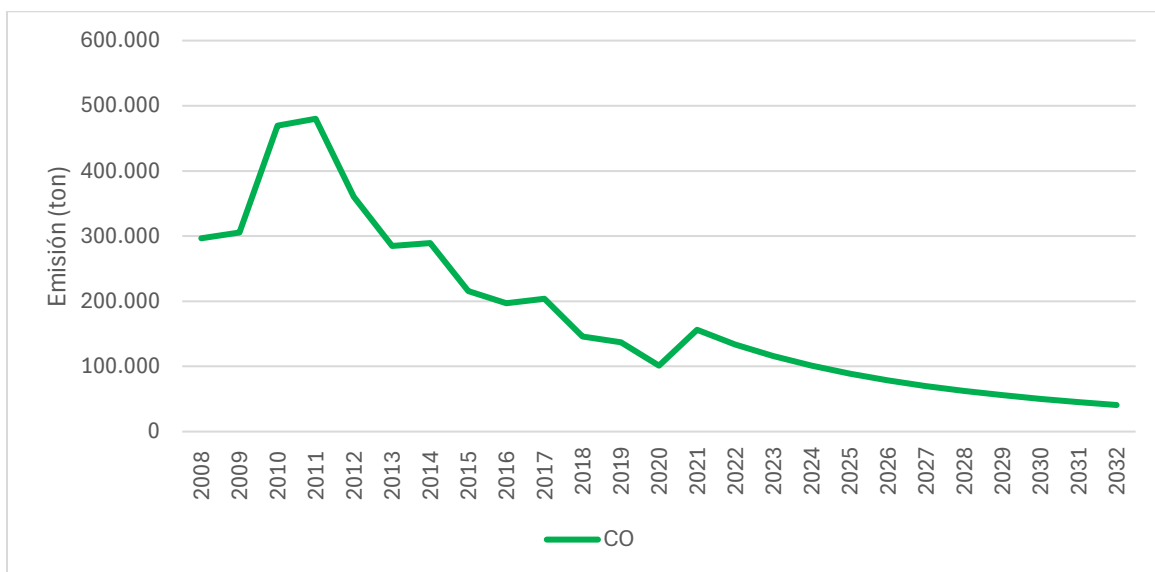


Figura 5-64 Proyección de emisiones (ton) CO de fuentes móviles

Fuente: Elaboración propia

Proyección de emisiones de fuentes móviles por tipo de vehículo

En la Figura 5-65, Figura 5-66 y Figura 5-67 se muestra la proyección por tipo de vehículo para SO_2 , NO_x y CO respectivamente. Se observa que se mantienen las proporciones de contribución por tipo de vehículo en las proyecciones. En el caso de SO_2 los vehículos particulares proporcionan la mayor cantidad de emisiones. Para NO_x aportan de manera proporcional buses, vehículos particulares y vehículos comerciales, mientras que CO aporta en sus emisiones los vehículos particulares y comerciales.

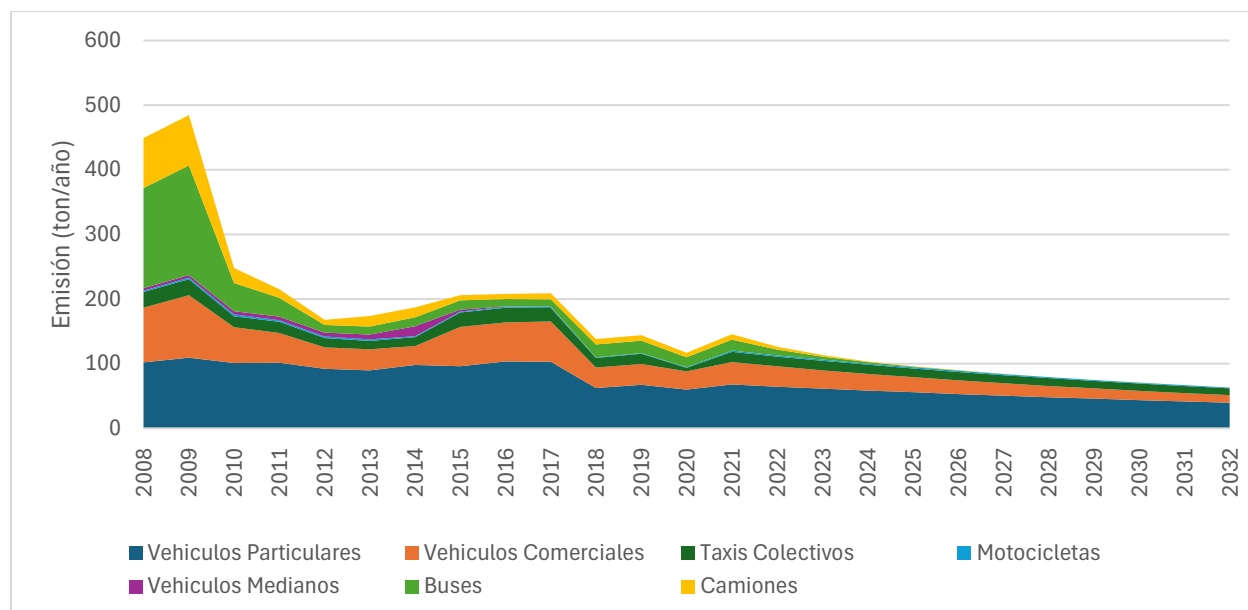


Figura 5-65 Proyección de emisiones (ton/año) de fuentes móviles de SO_2 por tipo de vehículo

Fuente: Elaboración propia

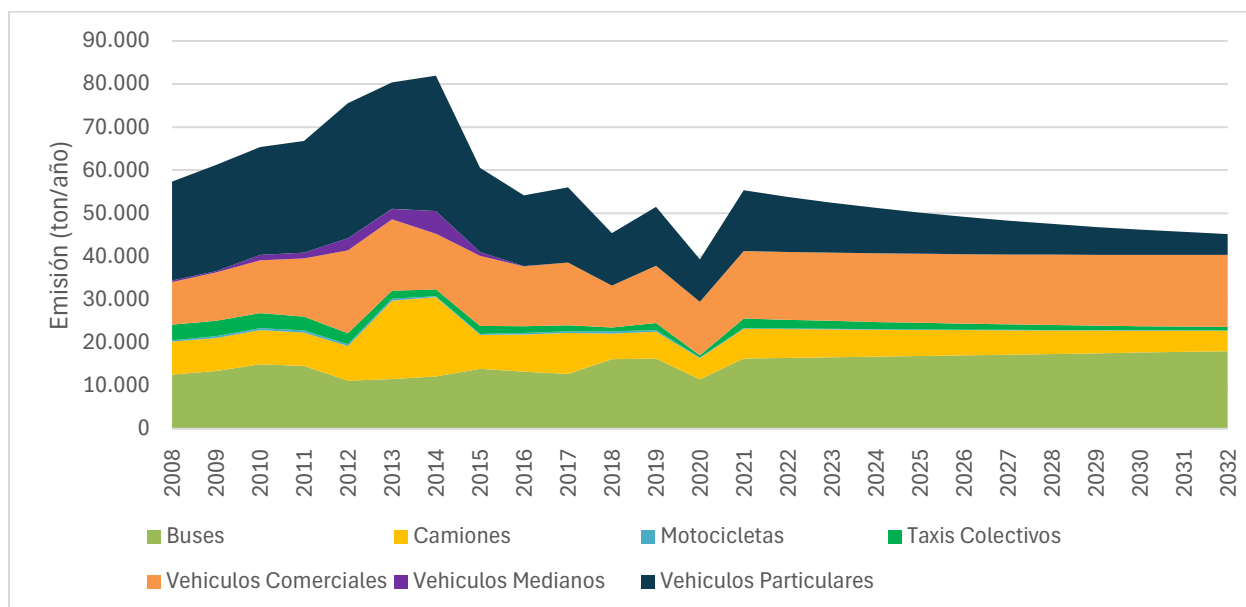


Figura 5-66 Proyección de emisiones (ton/año) de fuentes móviles para NO_x por tipo de vehículo

Fuente: Elaboración propia

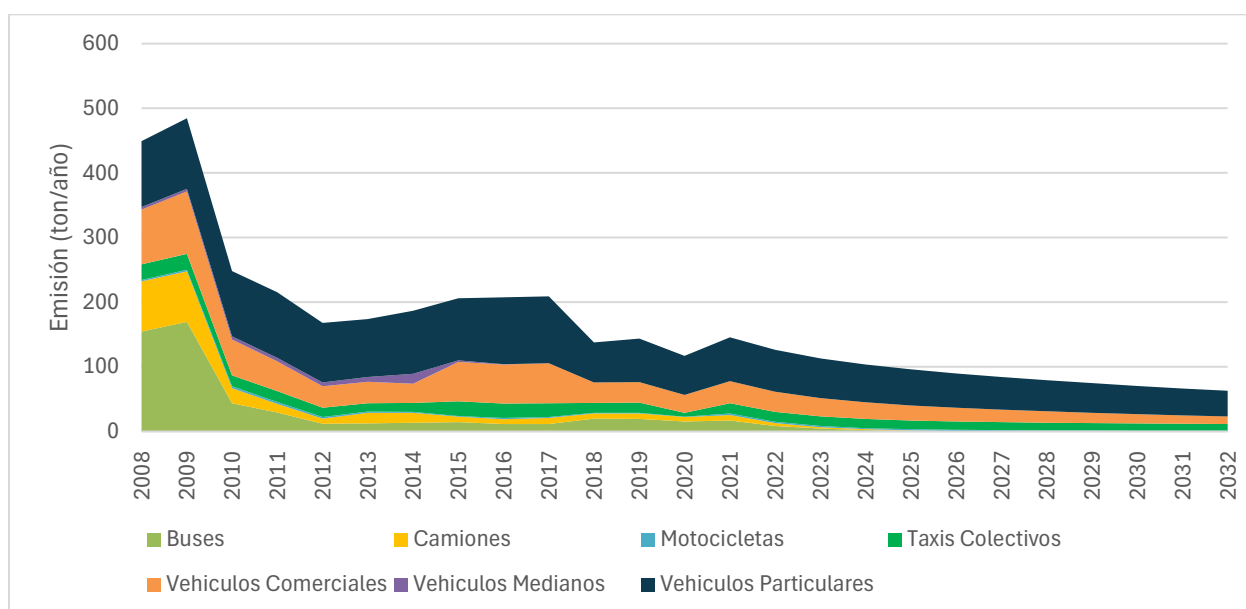


Figura 5-67 Proyección de emisiones (ton/año) de fuentes móviles para CO por tipo de vehículo

Fuente: Elaboración propia

Proyección de emisiones de fuentes móviles por región

En la Figura 5-68, Figura 5-69 y Figura 5-70 se muestra la proyección por región para SO_2 , NO_x y CO respectivamente. Se observa que se mantienen las proporciones de contribución en las regiones. Para los tres contaminantes las regiones con más emisiones serían la Metropolitana, Biobío y Valparaíso.

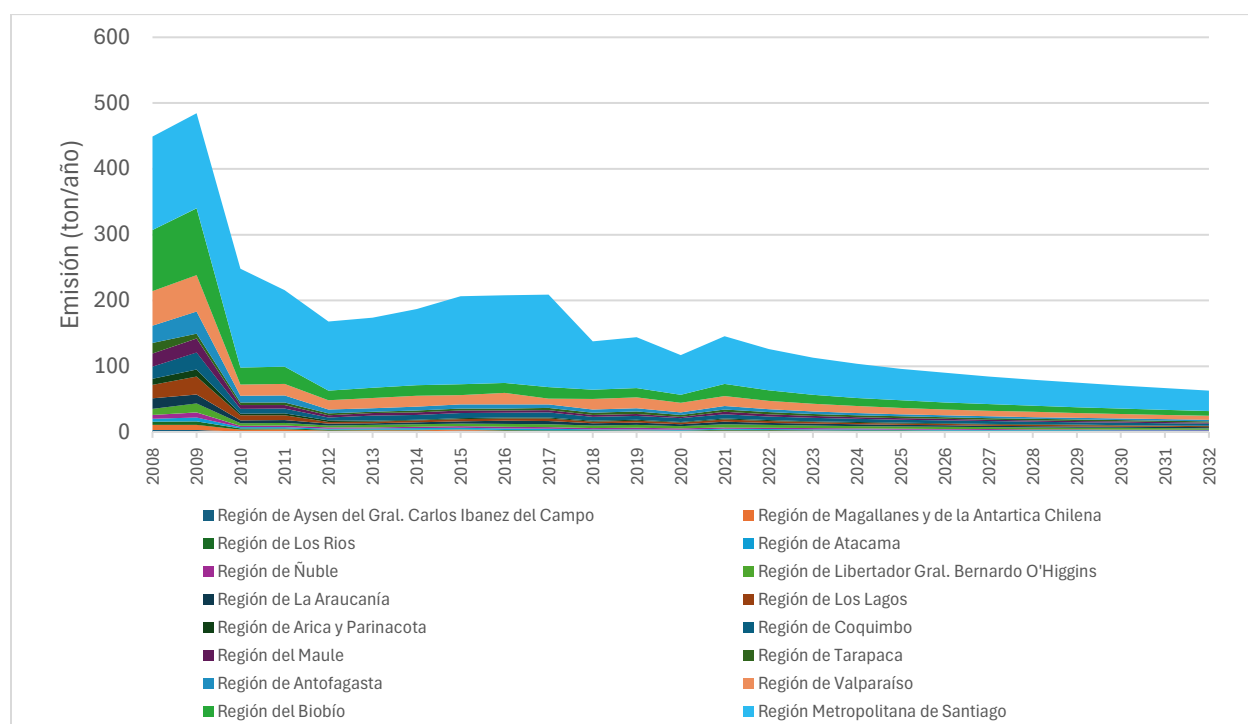


Figura 5-68 Proyección de emisiones (ton/año) SO_2 de fuentes móviles por región

Fuente: Elaboración propia

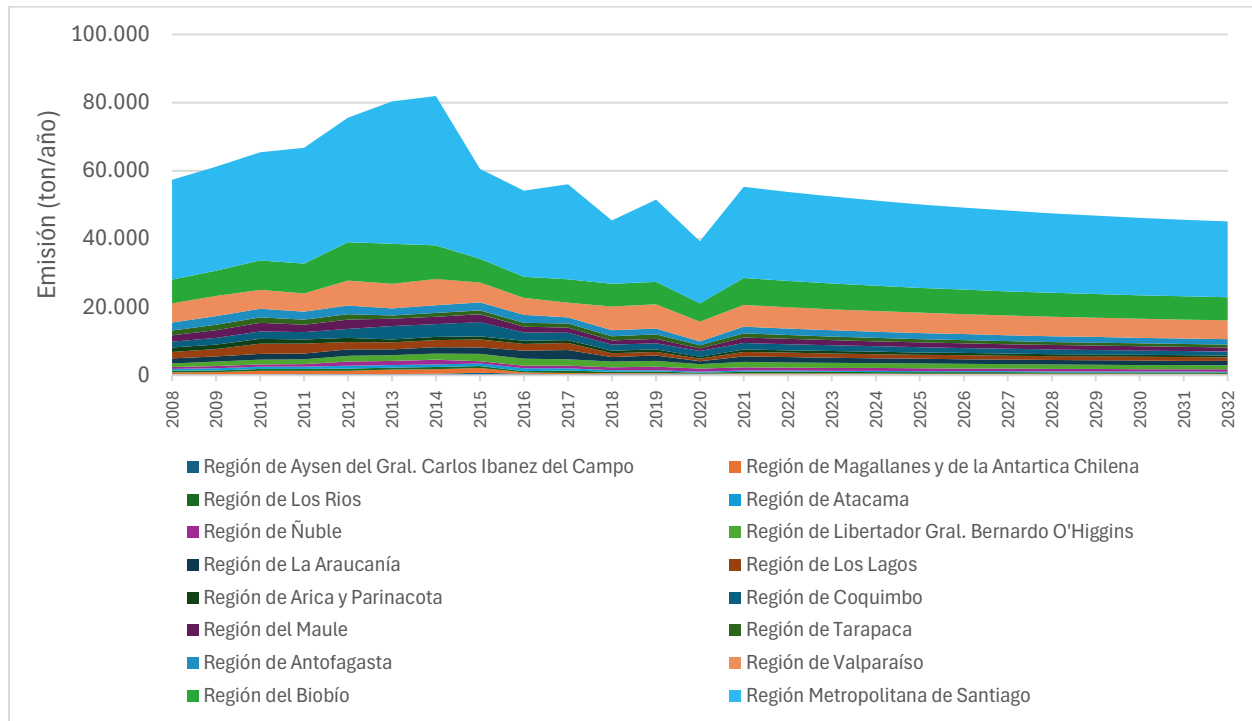


Figura 5-69 Proyección de emisiones (ton/año) NO_x de fuentes móviles por región

Fuente: Elaboración propia

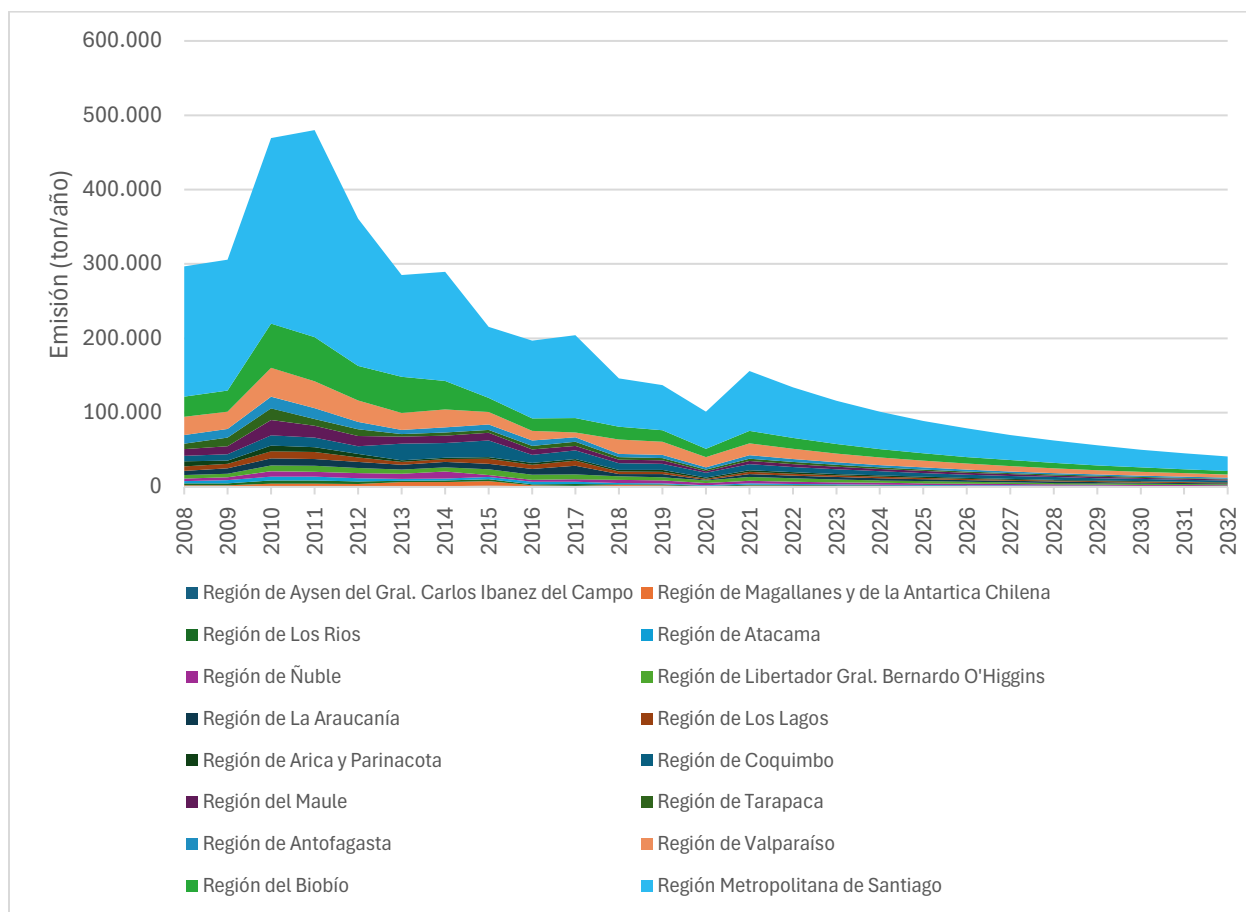


Figura 5-70 Proyección de emisiones (ton/año) CO de fuentes móviles por región

Fuente: Elaboración propia

5.6 Proyección de concentraciones de SO₂, O₃, Pb y CO

Esta sección presenta la proyección de las concentraciones de cada contaminante, para cada una de las métricas y estaciones de monitoreo. A continuación, se detalla la metodología y los resultados.

5.6.1 Metodología proyección de concentraciones de SO₂, O₃, Pb y CO

De acuerdo con lo descrito en las bases técnicas del presente estudio y la propuesta metodológica, la proyección de concentraciones resulta de la combinación de la proyección de inventarios y la relación de Emisiones-Concentraciones (FEC).

En el caso de los inventarios, su proyección se presenta en la sección previa. Dado los inconvenientes encontrados con los registros del RETC y el consecuente uso de la información de emisiones reportadas a través del sistema de Impuesto Verde, se tiene que las emisiones de

fuentes fijas son parciales respecto al total a nivel nacional. Esto genera un problema a la hora de poder usarlas en la proyección de concentraciones, ya que estarían subestimados los niveles de cada contaminante.

Junto con lo anterior, se tiene que la relación emisión-contaminante (FEC) tiene baja significancia estadística, de acuerdo a lo visto en la Sección 5.4.5. Utilizar estos estimadores en una proyección incluye una fuente de incertidumbre relevante en los resultados finales de concentraciones.

Dicho lo anterior, el método descrito originalmente no resulta conveniente en este caso que existe información parcial y fuentes de incertidumbre.

La proyección realizada consideró solo la información contenida en las mismas concentraciones. Dado que esta proyección busca evaluar cumplimientos normativos de la actual y futuras normas, las concentraciones proyectadas corresponden a los estadígrafos verificadores de las normas. Estos corresponden a los mostrados en la sección de análisis normativo (Sección 5.3). Es así como se tienen las siguientes series:

- SO₂: máximos de 1 hora, promedios diarios y promedios anuales.
- CO: máximos 1 hora.
- O₃: máximos 8 horas.
- Pb: promedios anuales.

Se tomaron datos desde el 2013 en adelante para proyectar hasta el año 2032 para cada estación de monitoreo. Se filtraron aquellas que contaran con al menos 8 datos en ese período de forma de poder obtener una tendencia razonable.

La proyección para cada estación siguió un modelo lineal dado por la ecuación:

Ecuación 5 Proyección de concentraciones:

$$Conc_{EM}^C = \alpha_{EM}^C + \beta_{EM}^C * Año + \gamma_{EM}^C * D_{2020-2021} + \varepsilon_{EM}^C$$

Donde:

- $Conc_{EM}^C$: Concentración proyectada para el contaminante C en la estación de monitoreo EM.
- $Año$: Año para el cual se estima la proyección, se hizo la regresión para los años 2024 al 2032.
- $D_{2020-2021}$: Variable dicotómica que captura las anomalías que pudieran existir el año 2020 y 2021 por el COVID.
- α_{EM}^C : Parámetro del intercepto de la regresión lineal, específico para el contaminante C en la estación de monitoreo EM.
- β_{EM}^C : Parámetro de la pendiente de la regresión lineal, específico para el contaminante C en la estación de monitoreo EM. Este valor representa la tendencia anual.

- γ_{EM}^C : Parámetro de que relaciona la variable dicotómica con la proyección de concentraciones, específico para el contaminante C en la estación de monitoreo EM. Este valor representa si es que existieron diferencias o no en los años 2020 y 2021 respecto al resto del período analizado.
- ε_{EM}^C : Residuos de la regresión, específico para el contaminante C en la estación de monitoreo EM. Este valor representa todos los otros efectos sobre el contaminante que no están capturados en la relación anual.

El modelo lineal detallado previamente se ajustó para cada contaminante, para cada estadígrafo mencionado, en todas las estaciones de monitoreo que tuvieran al menos 8 años de información.

5.6.2 Resultados proyección de concentraciones de SO₂, O₃, Pb y CO

Se presentan algunos resultados para cada contaminante como ejemplo. El resto de las figuras se encuentran en los anexos.

Las siguientes figuras muestra el percentil 99 de la media diaria de SO₂ en las estaciones Super Site y Escuela E-10, ambas localizadas en Tocopilla, II Región. Los puntos en verde se refieren a los valores históricos. La línea en negro es la línea de tendencia encontrada. El área achurada en azul es el intervalo de confianza al 95% de los valores proyectados. Se incluye los niveles de la norma actual chilena y las recomendaciones de la OMS (Objetivos intermedios OI y estándar final VG).

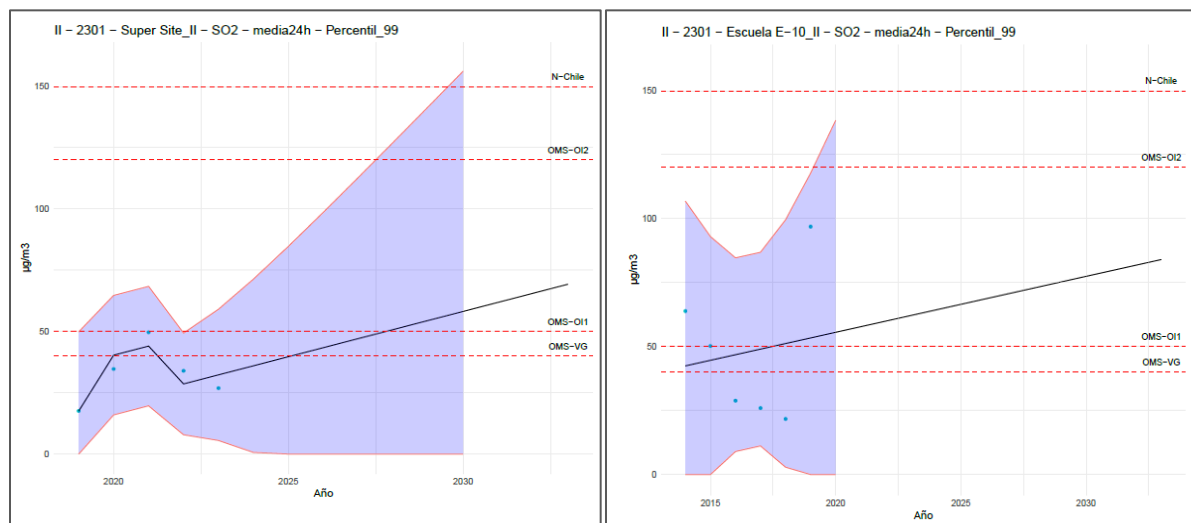


Figura 5-71 Proyección del percentil 99 de la media de 24 hrs de las concentraciones de SO₂ en dos estaciones en Tocopilla, II Región.

Fuente: Elaboración propia

En el caso del O₃ se muestra el comportamiento de la estación de Pudahuel en la Región Metropolitana. El estándar analizado es sobre el máximo de las concentraciones de 8 horas. En este caso, la normativa chilena coincide con el OI1 de la OMS. Los resultados están en línea con las conclusiones del análisis normativo, donde se ven claramente los niveles altos respecto a la

norma. La tendencia es creciente, por tanto, los niveles se encuentran fuera de norma muy tempranamente dentro del período.

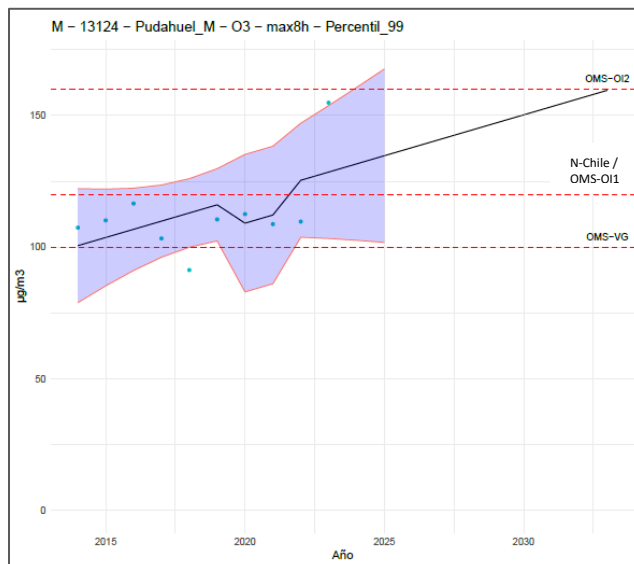


Figura 5-72 Proyección del percentil 99 del máximo de 8 horas de las concentraciones de O_3 en la estación Pudahuel, Región Metropolitana.

Fuente: Elaboración propia

El CO no presenta problemas en ninguna estación, como se pudo observar en la sección de análisis normativo. El estándar analizado es sobre el máximo de las concentraciones de 8 horas y sólo contrastando los valores con la normativa chilena ya que no existen recomendaciones OMS para este verificador. La Figura 5-73 muestra los resultados de proyección para las concentraciones en la estación de Padre de las Casas, IX Región. Como se preveía, los niveles son bajos respecto a la norma, aun cuando exista una tendencia creciente. En este caso se observa también un intervalo de confianza más acotado que en las figuras anteriores, lo cual está dado por la dispersión de los datos originales. En este caso los niveles están en rangos muy cercanos.

Finalmente, en el caso del plomo, se analiza el promedio anual. Si bien la norma es por el promedio bi-anual, es fácil la comparación. En la Figura 5-74 se puede apreciar cómo los niveles anuales siguen una tendencia decreciente, muy lejos de estándar actual. Esto se ve en los niveles históricos y también en las proyecciones, incluyendo el intervalo de confianza que se ubica completamente bajo la línea del estándar.

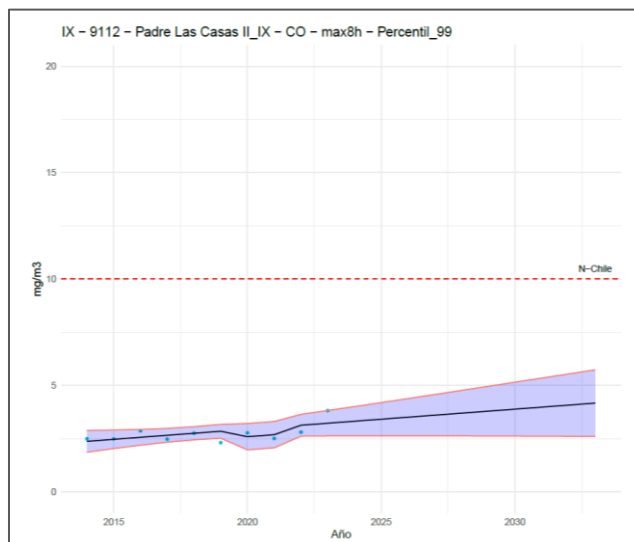


Figura 5-73 Proyección del percentil 99 del máximo de 8 horas de las concentraciones de CO en la estación Padre de las Casas, IX Región.

Fuente: Elaboración propia

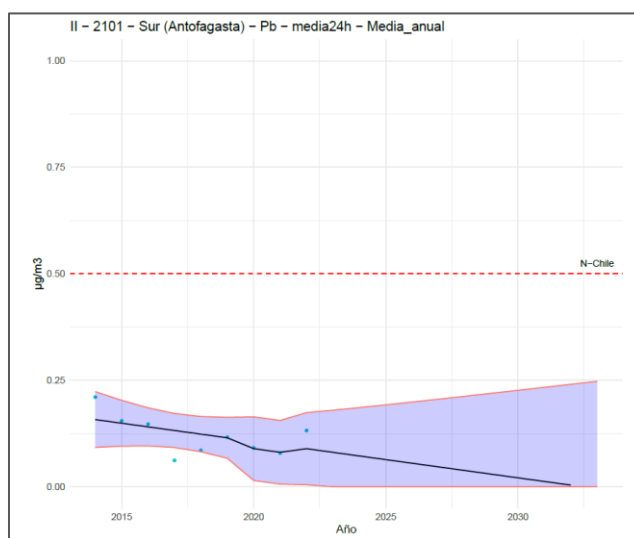


Figura 5-74 Proyección de la media anual de las concentraciones diarias de Pb en la estación Sur, II Región.

Fuente: Elaboración propia

6. Revisión de programas de medidas para la gestión de episodios de emergencia ambiental a nivel internacional y comparación con lo vigente en Chile para SO₂, O₃, Pb y CO

6.1 Identificación de programas de medidas de gestión implementados en seis países

Como parte del estudio, se revisaron protocolos y programas de gestión de episodios críticos en ciudades de seis países alrededor del mundo: Estados Unidos, España, Colombia, México, Brasil y China. A continuación, en la Tabla 6-1 se resume la información más importante por ciudades revisadas. Es relevante mencionar que de las ciudades revisadas se encontraron planes de episodios críticos para O₃, SO₂ y CO, entre otros contaminantes no abordados en el estudio, pero ninguno para Pb.

Tabla 6-1 Resumen de gestión de episodios críticos en los países revisados.

País	Ciudad/Estado	Contaminantes	Niveles de alerta	Instituciones involucradas
Estados Unidos	Nueva York	MP _{2.5} , MP ₁₀ , O ₃ , NO ₂ , SO ₂ y CO	Advertencia, Alerta I, Alerta II, Emergencia	Departamento de Conservación Medioambiental, División de Recursos Atmosféricos
	California	O ₃	Aviso de salud, Alerta, Advertencia, Emergencia	Distrito de Gestión de la Calidad del Aire de la Sierra Norte
España	Madrid	O ₃ y SO ₂	Umbral de activación, de información y de alerta	Consejería de Sanidad de la Comunidad de Madrid
Colombia	Bogotá	MP _{2.5} , MP ₁₀ , O ₃ , NO ₂ , SO ₂ y CO	Prevención, Alerta Fase 1, Alerta Fase 2 y Emergencia	Secretaría Distrital de Ambiente
México	Monterrey	MP _{2.5} , MP ₁₀ , O ₃ , NO ₂ , SO ₂ y CO	Etapa preventiva, Alerta, Contingencia Fase 1, Contingencia Fase 2	Varios organismos
Brasil	Sao Paulo	MP _{2.5} , MP ₁₀ , O ₃ , NO ₂ , SO ₂ y CO	Atención, Alerta y Emergencia	Compañía Ambiental del Estado de Sao Paulo
China	Beijing	MP _{2.5} , MP ₁₀ , O ₃ , NO ₂ , SO ₂ y CO	Alerta amarilla, naranja y roja	Municipalidad de Beijing

Fuente: Elaboración propia

En las secciones a continuación, se abordan en mayor profundidad las características de los protocolos y programas de gestión de episodios críticos por ciudad.

6.1.1 Estados Unidos

En Estados Unidos se utiliza el Índice de Calidad del Aire (AQI) para informar a las personas sobre la calidad del aire y de esta manera puedan realizar acciones para proteger su salud. El índice tiene una escala uniforme entre 0-500 y se calcula para los contaminantes de PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, CO, SO₂ y NO₂. El AQI corresponde al valor más alto calculado entre cada uno de los contaminantes, y se obtiene de la siguiente manera:

1. Se identifica la concentración más alta entre todas las estaciones de monitoreo dentro de cada área de notificación, y se trunca el valor:
 - O_3 (ppm) – truncar a 3 decimales
 - $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) – truncar a 1 decimal
 - PM_{10} ($\mu g/m^3$) – truncar a un número entero
 - CO (ppm) – truncar a 1 decimal
 - SO_2 (ppb) – truncar a un número entero
 - NO_2 (ppb) – truncar a un número entero
2. Se busca el rango de referencia que contiene a la concentración truncada en 1, dentro de la Tabla 6-2. Teniendo el rango de referencia, ya se puede conocer la categoría AQI.
3. Para obtener el valor AQI, se calcula el índice con la Ecuación 6, redondeando el resultado al entero más próximo.
4. Entre todos los valores AQI calculados para los seis contaminantes, se escoge el valor más alto para ser notificado.

Ecuación 6 Cálculo del Índice de Calidad del Aire para EE.UU.

$$I(p) = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} \times (C_p - BP_{Lo}) + I_{Lo}$$

Fuente: U.S. EPA (2018)

Donde:

I_p = Índice del contaminante p.

C_p = Concentración truncada del contaminante p.

BP_{Hi} = Límite superior del rango de referencia donde corresponde C_p

BP_{Lo} = Límite inferior del rango de referencia donde corresponde C_p

I_{Hi} = Límite superior del rango de categoría AQI (correspondiente a BP_{Hi})

I_{Lo} = Límite inferior del rango de categoría AQI (correspondiente a BP_{Lo})

Tabla 6-2 Rangos de referencia y categorías de AQI para cada contaminante.

AQI	Categoría	Rangos de referencia			
		O ₃ [ppm]		CO [ppm]	SO ₂ [ppb]
		8 horas	1 hora ⁽¹⁾	8 horas	1 hora
0-50	Buena	0 – 0,054	-	0 - 4,4	0 – 35
51-100	Moderada	0,055 - 0,070	-	4,5 - 9,4	36 – 75
101-150	Insalubre para grupos sensibles	0,071 – 0,085	0,125- 0,164	9,5 - 12,4	76 – 185
151-200	Insalubre	0,086 - 0,105	0,165- 0,204	12,5 - 15,4	186 – 304
201-300	Muy insalubre	0,106 - 0,200	0,205 - 0,404	15,5 - 30,4	305 – 604 (24 h) ⁽³⁾
301-400	Peligrosa	⁽²⁾	0,405 - 0,504	30,5 - 40,4	605 – 804 (24 h) ⁽³⁾
401-500	Peligrosa	⁽²⁾	0,505 - 0,604	40,5 – 50,4	805 -1004 (24 h) ⁽³⁾

(1): Por lo general, se notifica el AQI basado en los valores de ozono octohorarios. Sin embargo, para algunas zonas el AQI basado en valores de 1 hora es más preventivo. En esos casos, se calculan ambos AQI y se notifica el máximo de los dos valores.

(2): Los valores octohorarios no definen AQI superiores (≥ 301), solo se calculan con concentraciones de 1 hora.

(3): Los valores de 1 hora no definen valores AQI superiores (≥ 200), solo se calculan con concentraciones de 24 horas.

Fuente: U.S. EPA (2018)

El AQI se notifica diariamente en áreas con población superior a 350.000 habitantes, a través de la página web u otros medios de acceso público (televisión, periódicos, radio y el teléfono, hasta formas más digitales como widgets, aplicaciones y redes sociales). Se tarda 24 horas en obtener un valor AQI, por lo que técnicamente se reporta el del día anterior, incluyendo:

- El área de notificación.
- El período de notificación (el día para el cual el AQI es reportado).
- El contaminante crítico (el contaminante con el valor AQI más alto).
- El valor AQI.
- El descriptor de la categoría AQI y el color.
- Los grupos sensibles por contaminante cuando exista AQI > 100 (ver Tabla 6-3).

Tabla 6-3 Grupos sensibles a contaminantes específicos.

Cuando este contaminante tiene un AQI superior a 100	Se informa sobre estos grupos sensibles
O ₃	Las personas con enfermedades pulmonares (como el asma), los niños, los adultos mayores, las personas activas al aire libre (incluidos los trabajadores de exteriores), las personas con determinadas variantes genéticas y las personas con dietas pobres en ciertos nutrientes son los grupos de mayor riesgo.
CO	Las personas con enfermedades cardiacas (como la angina de pecho) son el grupo de mayor riesgo.
SO ₂	Las personas con asma u otras enfermedades pulmonares, los niños y los ancianos son los grupos de mayor riesgo.

Fuente: U.S. EPA (2018)

A continuación, en la Tabla 6-4 se muestran las advertencias a la población para cada categoría AQI dependiendo del contaminante criterio.

Tabla 6-4 Advertencias a la población por cada contaminante según categoría AQI.

Categoría AQI	O ₃	CO	SO ₂
Moderada (51-100)	Personas inusualmente sensibles deben considerar la posibilidad de reducir las actividades que requieran esfuerzo prolongado o intenso al aire libre. Prestar atención a la aparición de síntomas como tos o dificultad para respirar.		
Insalubre para grupos sensibles (101-150)	Grupos sensibles: reducir los esfuerzos prolongados o intensos al aire libre. Personas asmáticas: deben seguir sus planes de acción ¹⁷ y tener a mano medicamentos de acción rápida. Programar actividades por la mañana cuando el nivel de ozono es más bajo.	Grupos sensibles deben limitar los grandes esfuerzos y evitar las fuentes de CO como el tráfico intenso.	Las personas con asma deben considerar la posibilidad de limitar los esfuerzos al aire libre.
Insalubre (151-200)	Grupos sensibles: evitar los esfuerzos prolongados o intensos al aire libre, preferir actividades en interiores. Personas asmáticas: tener a mano medicamentos de acción rápida. Todos los demás deben reducir los esfuerzos prolongados o intensos al aire libre. Programar actividades al aire libre por la mañana, tomar más descansos y hacer actividades menos intensas.	Grupos sensibles deben limitar esfuerzos moderados y evitar las fuentes de CO como el tráfico intenso.	Grupos sensibles deben limitar los esfuerzos al aire libre.
Muy insalubre (201-300)	Grupos sensibles: evitar todas las actividades físicas al aire libre. Trasladar actividades al interior o reprogramar cuando la calidad del aire sea mejor. Personas asmáticas: tener a mano medicamentos de acción rápida. Todos los demás deben evitar los esfuerzos prolongados o intensos al aire libre. Preferir actividades por la mañana o en interiores.	Grupos sensibles deben evitar el esfuerzo y las fuentes de CO, como el tráfico.	Grupos sensibles deben evitar esfuerzos al aire libre; todos los demás deben reducir el esfuerzo al aire libre.

¹⁷ El Plan de Acción para el asma fomenta el autocontrol e incluye una lista de factores desencadenantes de la persona y cómo evitarlos, instrucciones para tomar medicamentos para el asma, información sobre qué hacer durante un episodio de asma, instrucciones sobre cómo llamar a un médico y teléfonos de emergencia (U.S. EPA, 2024d).

Categoría AQI	O ₃	CO	SO ₂
Peligrosa (301-500)	Todos deben evitar las actividades físicas al aire libre.	Grupos sensibles deben evitar los esfuerzos y las fuentes de CO, como el tráfico intenso; todos los demás deben limitar los esfuerzos intensos.	Grupos sensibles deben permanecer en el interior; todos los demás deben evitar el esfuerzo al aire libre.

Nota: Los valores superiores a 500 se consideran "Más allá del AQI". Se siguen las recomendaciones para la categoría Peligrosa.

Fuente: U.S. EPA (2018)& U.S. EPA (2016a)

6.1.1.1 Estado de Nueva York

El Departamento de Conservación Medioambiental del Estado de Nueva York (NYS DEC) utiliza el AQI y los Niveles de Daño Significativo (*Significant Harm Levels*), definidos por la EPA, para establecer los criterios de alerta para episodios de contaminación atmosférica. Cuando las condiciones meteorológicas y/o las concentraciones de un contaminante sean tales que resulte necesaria una actuación inmediata para evitar un aumento en la contaminación atmosférica, el Comisionado de la DEC designará la existencia de una fase de "Previsión", "Alerta I", "Alerta II" o "Emergencia", la cual permanecerá vigente hasta que el Comisionado lo dé por terminado.

Tabla 6-5 Criterios de alerta para episodios de contaminación atmosférica en Nueva York.

Contaminante	Métrica	Advertencia (AQI ≥101)	Alerta I (AQI 201-300)	Alerta II (AQI 301-400)	Emergencia (AQI 401-500)
PM _{2.5}	24 hr [µg/m ³]	≥35.5	150.5-250.4	250.5-350.4	>350.4
PM ₁₀	24 hr [µg/m ³]	≥155	355-424	425-504	>504
Ozono	1 hr [ppm]	≥0.125	0.205-0.404	0.405-0.504	>0.504
Ozono	8 hr [ppm]	≥0.071	0.106-0.200	---	---
CO	1 hr [ppm]	≥35.5	15.5-30.4	30.5-40.4	>40.4
SO ₂	1 hr [ppb]	≥76	305-604	605-804	>804
NO ₂	1 hr [ppb]	≥101	650-1249	1250-1649	>1649

Fuente: (NYS DEC, n.d.)

La División de Recursos Atmosféricos (DAR) del DEC puede proporcionar información esencial y servicios de recolección de datos durante un episodio de contaminación atmosférica. La DAR proporcionará un medio ordenado de coordinación y comunicación de las medidas para controlar la contaminación atmosférica e instrucciones durante los episodios de emergencia. Para obtener ayuda en caso de un episodio de contaminación del aire, el Estado de Nueva York dispone de teléfonos de contacto con la DAR para nueve regiones dentro del estado, compuesta cada región por diferentes condados.

Según lo establecido en la reglamentación de Nueva York (6 CRR-NY III A 207), durante un episodio de contaminación atmosférica, los propietarios de fuentes significativas de contaminación atmosférica deben adoptar las medidas prescritas en su Plan de Acción para Episodios. Este Plan contiene las medidas y acciones que adoptará el propietario/operador para reducir las emisiones en cada fuente de emisión durante cada etapa de un episodio de

contaminación. Es solicitado y posteriormente aprobado por la DEC, que también facilita junto a la solicitud, directrices para la preparación de planes de acción.

Se define una fuente significativa a cualquier fuente cuyas emisiones, por sí solas o en combinación con otras, puedan tener un efecto adverso en la calidad del aire ambiente durante un episodio de contaminación atmosférica. Esta categoría incluye, pero no se limita, a:

1. Equipos de combustión con un aporte térmico operativo máximo superior a 200 millones de Btu por hora.
2. Procesos y sistemas de escape o ventilación con emisiones de partículas superiores a 100 lb/h.
3. Incineradoras con una capacidad de carga de residuos igual o superior a 2.000 lb/h.

Dentro de la revisión no se encontraron acciones específicas actuales para los distintos criterios de alerta en el Estado de Nueva York, ni las directrices para preparar los planes de acción de las fuentes significativas. En la normativa federal de Estados Unidos (40 CFR 51 Appendix L) se incluyen ejemplos de reglamentaciones para evitar que la contaminación atmosférica alcance niveles que puedan causar un peligro a la salud de las personas (ver Tabla 6-6 hasta Tabla 6-8). Estos ejemplos no son obligatorios de cumplir en los Estados, pero muchos de ellos lo ocupan como base de sus planes para episodios de emergencia, los cuales si son obligatorios.

Tabla 6-6 Reducción de emisiones para el nivel de alerta (equivalente a Alerta I).

Fuente emisora	Acción de control
Centrales eléctricas a carbón o petróleo	a) Reducción sustancial mediante la utilización de combustibles con bajo contenido de cenizas y azufre. b) Utilización máxima de la turbulencia atmosférica del mediodía (12 del mediodía a 4 p.m.) para el lanceado de calderas y soplado de hollín. c) Reducción sustancial desviando la generación de energía eléctrica a instalaciones fuera del área de emergencia.
Instalaciones con procesos que generan vapor (en base a carbón y petróleo).	Acciones a) y b). d) Reducción sustancial de las demandas de carga de vapor consistentes con las operaciones continuas de la planta.
Industrias manufactureras de metales primarios, refinación de petróleo, industrias químicas, procesamiento de minerales, productos de papel y derivados, industria de cereales.	Acción b). e) Reducción sustancial de los contaminantes atmosféricos de las operaciones manufactureras mediante la reducción, postergación o aplazamiento de la producción y todas las operaciones. f) Reducción máxima postergando las operaciones de eliminación de desechos comerciales que emiten partículas sólidas, vapores de gas o sustancias malolientes. g) Reducción máxima de las demandas de carga de calor para el procesamiento.

Fuente: Elaboración propia en base a la norma federal 40 CFR 51 (Appendix L).

Tabla 6-7 Reducción de emisiones para el nivel de advertencia (equivalente a Alerta II).

Fuente emisora	Acción de control
Instalaciones con procesos que generan vapor (en base a carbón o petróleo).	a) Reducción máxima mediante la utilización de combustibles con el contenido más bajo de cenizas y azufre. b) Utilización máxima de la turbulencia atmosférica del mediodía (12 del mediodía a 4 p.m.) el lanceado de calderas y soplado de hollín. c) Reducción máxima desviando la generación de energía eléctrica a instalaciones fuera del Área de Advertencia.
Instalaciones con procesos que generan vapor (en base a petróleo).	Acciones a) y b). d) Preparación para utilizar un plan de acción en caso de que se desarrolle una emergencia.
Industrias manufactureras que requieren un tiempo considerable de anticipación para el cierre (metales primarios, refinación de petróleo, industrias químicas, productos de papel y derivados, productos de vidrio).	Acción b). e) Reducción máxima de los contaminantes atmosféricos procedentes de las operaciones de fabricación mediante, si es necesario, asumiendo dificultades económicas razonables como aplazar la producción y las operaciones relacionadas. f) Reducción máxima aplazando las operaciones de eliminación de residuos comerciales que emitan partículas sólidas, gases, vapores o sustancias malolientes. g) Reducción máxima de las demandas de carga térmica para la transformación.
Industrias manufactureras que requieren tiempos de anticipación relativamente cortos para el cierre (metales primarios, industrias químicas, procesamiento de minerales, industria de cereales.).	Acciones b) y g). h) Eliminación de los contaminantes atmosféricos procedentes de las operaciones de fabricación mediante el cese, la reducción, el aplazamiento o la postergación de la producción y las operaciones relacionadas en la medida de lo posible sin causar lesiones a las personas ni daños a los equipos. i) Eliminación de los contaminantes atmosféricos procedentes de los procesos de eliminación de residuos comerciales que emitan partículas sólidas, gases, vapores o sustancias malolientes.

Fuente: Elaboración propia en base a la norma federal 40 CFR 51 (Appendix L).

Tabla 6-8 Reducción de emisiones para el nivel de emergencia.

Fuente emisora	Acción de control
Centrales eléctricas a carbón o petróleo	a) Reducción máxima mediante la utilización de combustibles con el contenido más bajo de cenizas y azufre. b) Utilización máxima de la turbulencia atmosférica del mediodía (12 del mediodía a 4 p.m.) el lanceado de calderas y soplado de hollín. c) Reducción máxima desviando la generación de energía eléctrica a instalaciones fuera del Área de Emergencia.
Instalaciones con procesos que generan vapor (en base a carbón y petróleo).	Acción b). d) Máxima reducción de la demanda de calor y vapor a lo estrictamente necesario para evitar daños en los equipos. e) Adopción de las medidas previstas en el plan de emergencia.

Fuente emisora	Acción de control
Industrias manufactureras de metales primarios, refinación de petróleo, industrias químicas, procesamiento de minerales, industria de cereales, industrias de papel y productos afines.	Acción b). f) Eliminación de los contaminantes atmosféricos procedentes de las operaciones de fabricación mediante el cese, la reducción, el aplazamiento o la postergación de la producción y las operaciones relacionadas en la medida de lo posible sin causar lesiones a las personas ni daños a los equipos. g) Eliminación de los contaminantes atmosféricos procedentes de los procesos de eliminación de residuos comerciales que emitan partículas sólidas, gases, vapores o sustancias malolientes. h) Reducción máxima de las demandas de carga térmica para el procesamiento.

Fuente: Elaboración propia en base a la norma federal 40 CFR 51 (Appendix L).

6.1.1.2 Estado de California

De acuerdo con el Código de Reglamentos Federales (CFR), las regiones con concentraciones horarias de ozono superiores a 0,10 ppm se clasifican como Regiones Prioritarias I y deben elaborar un "Plan de Contingencia", que tiene por objetivo evitar que la concentración de ozono ambiente (promedio de 2 horas) alcance el nivel de Daño Significativo (0,60 ppm). El Distrito de Gestión de la Calidad del Aire de la Sierra Norte (NSAQMD) es un distrito atmosférico montañoso de California que abarca los condados de Nevada, Sierra y Plumas. Este distrito posee clasificación de Prioridad I para el ozono, por lo que a continuación se revisará su Plan de Episodios de Emergencia de Ozono.

La NSAQMD declara la existencia de un episodio de emergencia a partir de las concentraciones mostradas en la Tabla 6-9. Se notifica a una lista de contactos que incluye representantes escolares, entrenadores deportivos, profesionales de la salud pública y privada, emisoras de radio, periódicos y cualquier persona interesada en mantenerse informada, pudiendo inscribirse a través de su página web (www.myairdistrict.com). Además, se notifica a la Junta de Recursos del Aire de California, los funcionarios ejecutivos de los condados y municipios, jefes de policía, jefes de bomberos, Oficiales de Salud del Condado, Oficinas de Servicios de Emergencia, Superintendencia de Educación, entre otras, además de los principales periódicos y emisoras de radio y televisión, para que emitan dentro de la zona afectada los avisos, notificaciones y advertencias pertinentes.

Tabla 6-9 Niveles de emergencia por ozono en el oeste del condado de Nevada.

	Aviso de salud	Alerta 1	Alerta 2	Emergencia
Ozono (1 hora)	0.15 ppm	0.20 ppm	0.40 ppm	0.50 ppm

Fuente: NORTHERN SIERRA AIR QUALITY MANAGEMENT DISTRICT (2020)

Cuando se declara un episodio de emergencia, el Distrito aplica las medidas de control en la Tabla 6-10. Cada etapa progresiva del episodio incluirá las acciones prescritas en el nivel de Aviso de salud y en la etapa anterior (a menos que entren en conflicto).

Tabla 6-10 Acciones para cada nivel de emergencia de ozono.

Aviso de salud	Alerta (Etapa 1)	Advertencia (Etapa 2)	Emergencia (Etapa 3)
Prohibido todas las quemas al aire libre, incluidas quemas agrícolas y de gestión forestal y la incineración en toda la zona afectada, excepto en una situación de emergencia según lo dispuestos en la regulación de California.	A través de las Oficinas de Servicios de Emergencia, notificar a los medios de comunicación para que emitan la advertencia adecuada al público, que incluirá una solicitud para reducir cualquier operación innecesaria de vehículos y equipos motorizados.	Cerrar todas las instalaciones no esenciales de las agencias públicas, excepto las instalaciones de emergencia y aquellas instalaciones necesarias en emergencias para proteger la seguridad o la defensa nacionales.	Cerrar todas las instalaciones gubernamentales que no sean necesarias para la salud y la seguridad públicas, seguridad o defensa nacional.
Avisar a la Superintendencia de Educación que se deben suspender las actividades extenuantes sostenidas de los estudiantes que duren más de 1 hora.	Avisar a la Superintendencia de Educación para que suspendan las actividades extenuantes de los estudiantes y consideren la posibilidad de mantenerse en el interior.	Solicitar a las instalaciones que emitan más de 50 ton/año de cualquier precursor del ozono que inicien acciones de control de las emisiones para reducirlas al máximo	Cerrar todas las instalaciones recreativas, incluidas, las que dan servicio a embarcaciones y vehículos todoterreno.
A través de las Oficinas de Servicios de Emergencia, notificar a los medios de comunicación para que emitan la advertencia adecuada al público, que incluirá una recomendación para reducir la circulación innecesaria de vehículos a motor.	Solicitar a las instalaciones que emitan más de 50 ton/año de cualquier precursor del ozono que pongan en marcha las medidas de control de emisiones especificadas para reducir sus emisiones (disminución de la producción, la posibilidad de que los trabajadores trabajen a distancia y se abstengan de utilizar sus vehículos hasta que finalice el episodio).	Solicitar el cierre de todas las instalaciones educativas; suspensión de todos los eventos al aire libre (inclusive eventos deportivos programados)	Solicitar la implementación de viajes compartidos de emergencia, o el uso de transporte masivo.
Identificar instalaciones objetivo para acciones de reducción de emisiones	Se inspeccionará el cumplimiento de las instalaciones.	Solicitar a las instalaciones de producción de asfalto que reduzcan la producción.	Cerrar todas las instalaciones comerciales e industriales que no sean de emergencia.

Fuente: NORTHERN SIERRA AIR QUALITY MANAGEMENT DISTRICT (2020)

6.1.2 Madrid, España

El Real Decreto 102/2011 relativo a la mejora de la calidad del aire con relación a ciertos contaminantes, ha fijado para algunos de ellos umbrales de información y/o alerta que requieren protocolos de información específicos o planes de acción a corto plazo, para reducir el riesgo de superación de dichos umbrales, y para el cumplimiento de valores límite establecidos.

Se establecen niveles de actuación en función de las concentraciones registradas por las estaciones de la red de vigilancia de la calidad del aire, presentados en la Tabla 6-11 para el SO₂ y en la Tabla 6-12 para el O₃.

El umbral de activación del plan es el nivel de concentración de un contaminante que, una vez rebasado, exige garantizar que los medios necesarios estarán disponibles para la adopción de medidas en caso de superación de los umbrales de información o alerta. El valor promedio habrá de medirse o determinarse predictivamente para la activación del plan, durante un número determinado de horas a definir justificadamente por la administración competente, garantizando la protección de la salud de la población y que los medios necesarios estarán disponibles para la adopción de medidas en caso de superación de los umbrales de información o alerta.

El umbral de información corresponde al nivel de un contaminante a partir del cual una exposición de breve duración supone un riesgo para la salud humana de los grupos de población especialmente vulnerables, y sobre el que las administraciones competentes deben, en caso de que haya superación o previsión de que sea superado, suministrar una información o aviso inmediato y apropiado y adoptar las medidas pertinentes.

Por otro lado, el umbral de alerta es el nivel a partir del cual una exposición de breve duración supone un riesgo para la salud humana que afecta al conjunto de la población y, que, en caso de que haya superación o previsión de que sea superado, requiere la adopción de medidas inmediatas.

Tabla 6-11 Umbrales de activación, de información y de alerta para el SO₂ (Madrid)

Nivel	Parámetro	Umbral
Umbral de activación del Plan	Promedio horario	200 µg/m ³
Umbral de información	Promedio horario	350 µg/m ³
Umbral de alerta	Promedio horario	500 µg/m ³ ⁽¹⁾

(1): Se considerará superado cuando durante tres horas consecutivas se exceda dicho valor cada hora, en lugares representativos de la calidad del aire en un área de, como mínimo, 100 km² o en una zona o aglomeración entera, tomando la superficie que sea menor.

Fuente: Real Decreto 102/2011

Tabla 6-12 Umbrales de activación, de información y de alerta para el O₃ (Madrid)

Nivel	Parámetro	Umbral
Umbral de activación del Plan	Promedio móvil 8 horas	120 µg/m ³
Preaviso (de carácter interno)	Promedio horario	160 µg/m ³
Umbral de información	Promedio horario	180 µg/m ³
Umbral de alerta	Promedio horario	240 µg/m ³ ⁽¹⁾

(1): La superación del umbral se debe medir o prever durante tres horas consecutivas.

Fuente: Real Decreto 102/2011

Cuando se excede el nivel de preaviso en alguna de las estaciones del Sistema de Vigilancia, se realiza un análisis de los datos, comprobando si estos son válidos y estudiando su tendencia en las estaciones que estén alcanzando los valores más altos. Asimismo, se verifica que los mecanismos previstos en caso de llegar al nivel de “Umbral de información” o al “Umbral de alerta”, están disponibles y funcionan correctamente.

En el municipio de Madrid existen dos contaminantes para los que se han elaborado protocolos específicos de acciones encaminadas a proteger a la población más vulnerable, entre las cuales se incluyen medidas informativas y recomendaciones sanitarias. Estos contaminantes son el NO₂ y O₃.

Los principales medios de información disponibles para la ciudadanía son:

- Sitio WEB del Ayuntamiento de Madrid.
- Paneles informativos municipales.
- Servicios de avisos SMS a móviles.
- Aplicación móvil “Aire de Madrid”.
- Cuenta en la red social X (antiguo Twitter) @airedemadrid.
- Medios de comunicación (radio, TV, otras redes sociales).

Las autoridades competentes (autonómicas o municipales) para garantizar el acceso del ciudadano a la información, han desarrollado sistemas de aviso donde se advierte a la población de dichos niveles, se dan las recomendaciones oportunas y se informa en su caso de las medidas adoptadas. En la Tabla 6-13 a continuación, se resumen las acciones que se toman a nivel institucional cuando se detectan concentraciones altas de ozono. Cabe notar que basta con que alguna de las estaciones de la red de monitoreo evidencie estos niveles de concentración para que se active el protocolo.

Tabla 6-13 Acciones a tomar según nivel de actuación para alertas por ozono, Madrid

Niveles de actuación	Concentración O ₃ (µg/m ³)	Acciones a tomar
Preaviso (de carácter interno)	>160	Si se excede la concentración en alguna de las estaciones de monitoreo, se realiza un análisis de datos para validar. Además, en caso de validarse, se deberá asegurar que los mecanismos para los siguientes niveles de actuación estén disponibles y funcionen correctamente en caso de ser necesario.
Umbral de información	>180	Si se excede la concentración en alguna de las estaciones de monitoreo, se comunica a las personas y organismos correspondientes a través de la página web del ayuntamiento, SMS, aplicación para celulares y Twitter. Solo se convoca a la Comisión de calidad del aire de la ciudad de Madrid si, evaluada la situación por la Dirección General, fuera previsible la superación del umbral de alerta.
Umbral de alerta	>240	Si se excede la concentración en alguna de las estaciones de monitoreo, se comunica a las personas y organismos a través de los canales antes mencionados y se convoca a la Comisión de Calidad del aire de la ciudad de Madrid.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6-14 a continuación, se muestran las recomendaciones entregadas a la población para reducir su exposición al ozono.

Tabla 6-14 Recomendaciones para reducir la exposición para distintos niveles de calidad asociados a ozono, Madrid

Concentración de ozono (µg/m ³)	Calidad del aire	Recomendaciones población vulnerable	Recomendaciones población general
0-60	Muy bueno	Puede realizar sus actividades al aire libre con normalidad, incluido el ejercicio físico o práctica deportiva habitual	Puede realizar sus actividades al aire libre con normalidad, incluido el ejercicio físico o práctica deportiva habitual.
61-120	Bueno		
21-180	Regular	Reduzca el ejercicio físico intenso al aire libre	Reduzca el ejercicio físico intenso al aire libre
181-240	Malo	Reduzca el ejercicio físico intenso y la exposición prolongada al aire libre	Reduzca el ejercicio físico intenso al aire libre
>240	Muy malo	Evite el ejercicio físico y la exposición al aire libre	Reduzca el ejercicio físico al aire libre

Fuente: Elaboración propia

6.1.3 Bogotá, Colombia

En el caso de Bogotá la gestión de episodios críticos se basa en el cálculo de un índice de calidad ambiental denominado IBOCA, índice bogotano de calidad del aire y riesgo en salud, que se define como un instrumento de comunicación del riesgo en salud ambiental, que orienta la toma de decisiones individuales o poblacionales para disminuir la exposición a la contaminación atmosférica y así prevenir impactos en la salud de las personas y el medio ambiente. Es un índice de carácter adimensional y puede tomar valores entre 0 a 500, en donde un mayor valor indica

mayor exposición y riesgo para la población. A continuación, en la Tabla 6-15 se indican los criterios que deben cumplirse por contaminante para cada intervalo de IBOCA. Además, se indican los verificadores que permiten activar determinados niveles de respuesta.

Tabla 6-15 Criterios por contaminante para gestión de episodios críticos en Bogotá, Colombia

Intervalo valores IBOCA	Nivel de respuesta	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)						Verificadores	
		PM _{2.5}	PM ₁₀	NO ₂	SO ₂	CO	O ₃		
		Media móvil ponderada 12h		Media móvil 1h		Media móvil 8h		Nivel zonal*	Nivel ciudad
0-50	Prevención	0 - 12,0	0 - 27,2	0 - 28,5	0 - 9,6	0-2.549	0 - 72	N.A.	N.A.
51-100	Prevención	12,1-35,4	27,3-63,8	28,6-84,1	9,7-38,5	2.550-5.022	73-107	N.A.	N.A.
101-150	Alerta Fase 1	35,5-55,4	63,9-95,5	84,2-132,2	38,6-63,5	5.023-7.165	108-137	≥50 % de las estaciones de la zona en un nivel de alerta o emergencia, o al menos 27 de 36 horas (75 %) consecutivas en un nivel de alerta o emergencia	≥50 % de las estaciones de la ciudad en un nivel de alerta o emergencia, o al menos 27 de 36 horas (75 %) consecutivas en un nivel de alerta o emergencia
151-200	Alerta Fase 2	55,5-151,2	95,6-246,7	132,3-361,9	63,6-182,7	7166-17.384	138-281		
201-300	Emergencia	151,3-250,4	246,8-405,2	362,0-602,6	182,8-307,7	17.385-28.099	282-432		
301-500	Emergencia	250,5-500,4	405,3-800,4	602,7-1.202,6	307,8-619,2	28.100-54.802	433-809		

*Zonas definidas por la Secretaría Distrital de Ambiente

Fuente: Elaboración propia en base a Resolución Conjunta 2840 de 2023 Secretaría Distrital de Ambiente - Secretaría Distrital de Salud.

Este índice se calcula de forma individual para cada contaminante, para cada hora y en todas las estaciones pertenecientes a la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá. El índice por contaminante que resulta superior a los demás se denomina IBOCA condicionante y se considera que es indicativo global de la calidad del aire, aunque se deberá indicar el contaminante específico al que corresponda este IBOCA de mayor valor. El IBOCA condicionante se escogerá y comunicará para efectos de gestión del riesgo en salud.

En la Tabla 6-15 se observa que existen cuatro niveles de respuesta: prevención, alerta fase 1, alerta fase 2 y emergencia. Sin embargo, los posibles valores del IBOCA se dividen en seis y, por ende, dos intervalos pueden estar asociados a un mismo nivel de respuesta. El motivo de esto es que los intervalos se asocian a distintos colores, que son utilizados para comunicar el riesgo a la población. En el caso de los últimos dos intervalos, que coinciden tanto en nivel de respuesta como en color, estos se dividen solo con el fin de indicar el límite de los intervalos para el cálculo del IBOCA. Así, en cuanto a los colores, se establece que el verde indica un nivel bajo de riesgo; el amarillo moderado; el naranja regular; el rojo alto; y por último el morado un nivel peligroso.

Una vez calculado el IBOCA y comprobado el cumplimiento de las condiciones de verificación, corresponderá a la Secretaría Distrital de Ambiente realizar las declaratorias y finalización de las

alertas correspondientes. Esta institución, junto a la Secretaría Distrital de Salud, serán las responsables de comunicar y fomentar las medidas y recomendaciones ciudadanas, sectoriales o poblacionales que se hayan establecido por cada nivel de riesgo.

Tabla 6-16 Recomendaciones en salud para la ciudadanía según el valor IBOCA

Nivel de riesgo	Bajo	Moderado	Regular	Alto	Peligroso
Recomendaciones permanentes	Disminuya la exposición: - Reconozca los lugares de mayor contaminación del aire exterior: vías sin pavimentar y de alto flujo vehicular, construcciones y áreas industriales o de acumulación de escombros o canteras, entre otros. - Para el desarrollo de sus actividades identifique las horas con mayor contaminación del aire: entre las 6:00 y 10:00 a.m., y entre las 5:00 y 8:00 p.m. - El usar bicicleta en vías de alto tráfico implica mayores dosis de inhalación de contaminantes, se recomienda usar protección respiratoria. - En vías con alto tráfico vehicular prefiera llevar a los niños en brazos, evite que caminen o vayan en coche de bebé; ya que hay mayor contaminación del aire cerca del suelo. - Al interior de lugares evite exponerse a sustancias químicas para limpieza, polvo, moho, y fuentes de combustión (velas, inciensos, etc.). - Limpie las superficies y pisos de la vivienda utilizando paños o trapos humedecidos con agua - para evitar que se levante el polvo. Si se encuentra cercade una fuente de humo, hollín o material - particulado, evite mantener abiertas ventanas y puertas. - Evite el consumo de tabaco y sus derivados o exponerse a ambientes en los que haya personas fumando. - Acoja las recomendaciones relacionadas con la actividad física de acuerdo con el nivel de calidad del aire y riesgo en salud. Cuide su salud: - Actualice el esquema de vacunación de acuerdo con la edad, use tapabocas cuando tenga infección respiratoria, lave sus manos frecuentemente y evite contacto con personas que tengan infecciones respiratorias. - Manténgase hidratado, consuma agua y evite bebidas azucaradas o gasificadas. - Acuda al servicio de urgencias en caso de presentar los siguientes signos de alarma: ○ Signos de alarma para menores de cinco (5) años: Respiración rápida, le “silba el pecho” o se le “hunden las costillas” y tos persistente. Un episodio de fiebre en menores de dos (2) meses o en niños mayores de esta edad que consista en fiebre de difícil control o que persista por más de tres (3) días. Decaimiento, somnolencia o irritabilidad. El niño o niña no puede beber ni tomar el pecho o no come nada, vomita todo. Presenta ataques o convulsiones. Está empeorando o “no se ve bien”. ○ Signos de alarma en la comunidad general: Dificultad al respirar. Fatiga inusual o dolor en el pecho. Tos con expectoración purulenta o con pintas de sangre. Decaimiento o cansancio excesivo, así como confusión o alteración de la conciencia. Fiebre de difícil control o que persista por más de tres (3) días.				

Nivel de riesgo	Bajo	Moderado	Regular	Alto	Peligroso
Recomendaciones para población sensible	Aproveche para realizar actividades al aire libre. Ventile la vivienda o lugar de trabajo. Prefiera lugares con buena calidad del aire.	Considere reducir la actividad física que requiera esfuerzo prolongado o intenso al aire libre, en caso de presentar síntomas (tos, ardor en los ojos, dolor de garganta o dificultad para respirar)	Reduzca la actividad física que requiera esfuerzo prolongado o intenso al aire libre y prefiera realizarlas en espacios cerrados, cuidando su calidad del aire	Evite la actividad física que requiera esfuerzo prolongado o intenso al aire libre y prefiera realizarlas en espacios cerrados cuidando su calidad del aire.	Evite todas las actividades al aire libre y en espacios cerrados mantenga un nivel de actividad bajo, cuidando su calidad del aire. Use tapabocas N95 en espacios abiertos y cerrados mientras persista este estado de contaminación del aire. Movílese a zonas de menor contaminación del aire.
Recomendaciones para población general	Aproveche para realizar actividades al aire libre. Ventile la vivienda o lugar de trabajo. Prefiera lugares con buena calidad del aire.	Puede realizar actividades al aire libre. Ventile la vivienda o lugar de trabajo. Prefiera lugares con buena calidad del aire.	Si al realizar actividad física presenta tos o dificultad para respirar, realice descansos con mayor frecuencia.	Reduzca la actividad física que requiera esfuerzo prolongado o intenso al aire libre, prefiera realizarlas en espacios cerrados tomando descansos con mayor frecuencia, cuidando su calidad del aire	Evite todas las actividades al aire libre y en espacios cerrados reduzca la actividad física tomando descansos con mayor frecuencia, cuidando su calidad del aire. Use tapabocas N95 en espacios abiertos y cerrados mientras persista este estado de contaminación. Movílese a zonas de menor contaminación del aire.

Fuente: Elaboración propia en base a Resolución Conjunta 2840 de 2023 Secretaría Distrital de Ambiente - Secretaría Distrital de Salud.

De forma paralela, se establecen recomendaciones de medidas ciudadanas para contribuir, mantener o mejorar la calidad del aire, dependiendo de los colores del IBOCA. Estas recomendaciones indican, entre otras, consultar la página web del IBOCA para mantenerse actualizado, utilizar transporte público, mantener los vehículos particulares en condiciones adecuadas para transitar, mantener al día la revisión técnica, evitar aceleraciones a fondo o frenadas bruscas, evitar la quema de basura, barrer en húmedo, optar por teletrabajo en caso de niveles altos de riesgo, etc.

Adicionalmente, la Alcaldía Mayor de Bogotá cuenta con la facultad de emitir decretos de “pico y placa”, cuyo nombre hace referencia a las horas de mayor tráfico (pico) y a las patentes de los automóviles privados (placa). En estos decretos, que se decretan una vez que se ha determinado

el nivel de respuesta, se establece qué números de patente pueden circular en días pares e impares, en qué horarios y en qué zonas, mientras esté vigente el decreto.

6.1.4 Monterrey, México

La Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM) cuenta con un Programa de Respuesta a Contingencias Ambientales (PRCA, 2021), el cual establece una serie de estrategias, acciones y procedimientos coordinados entre Municipios, el Estado y la Federación para prevenir, controlar y atender los episodios de altas concentraciones de PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 , CO , SO_2 y NO_2 . El PRCA se compone de cinco fases:

1. Etapa preventiva: Se realiza un monitoreo constante de los contaminantes y parámetros meteorológicos en estaciones de monitoreo SIMA (Sistema Integral de Monitoreo Ambiental).
2. Alerta: Se realizan primeras acciones de disminución de emisiones de fuentes fijas, móviles y de área. Grupos vulnerables no deben realizar actividades al aire libre y se recomienda al resto de la población evitar actividades moderadas y vigorosas al aire libre.
3. Contingencia Fase I: Se realizan acciones de paros parciales en fuentes fijas y de área, se limita la circulación en un 20% de todo tipo de vehículos, en ciertos sectores.
4. Contingencia Fase II: Se realizan acciones de paros parciales en mayor escala en fuentes fijas y de área, se limita la circulación en un 20% de todo tipo de vehículos en toda la ZMM. Tanto los grupos vulnerables como el resto de la ciudadanía deben permanecer en espacios interiores.
5. Desactivación: Fase de retorno a las actividades normales mediante la declaratoria de terminación de cualquiera de las fases descritas anteriormente. Los establecimientos y actividades generadoras de emisiones deberán presentar un informe, en los siguientes 10 días hábiles posteriores a la desactivación, comunicando las medidas ejecutadas durante la fase declarada, incluyendo: Descripción de las medidas efectuadas durante el episodio, listado de equipos y/o actividades suspendidas, cálculo de las emisiones reducidas, evidencia fotográfica de las acciones realizadas.

En la Tabla 6-17 se presentan los criterios para la activación de las fases. Para declarar cualquiera de las fases se requiere cumplir de manera simultánea el Criterio 1 y Criterio 2, excepto en el caso de Alerta, la cual se emite al alcanzar la concentración establecida en el Criterio 3.

- Criterio 1: Relacionado al Índice de Aire y Salud, corresponde al rango de concentraciones en que se alcanza la categoría “Muy Mala”.
- Criterio 2: Se calcula en base a los límites establecidos en la normativa mexicana de calidad del aire¹⁸.

¹⁸ En el PRCA vigente se consideraron los límites establecidos en la norma NOM-021-SSAI-1993 que regulaba el CO , NOM-022-SSAI-2010 para el SO_2 y NOM-020-SSAI-2014 para el O_3 . En la actualidad existen nuevas versiones de dichas normas, sin embargo, no son utilizadas en la determinación de los criterios establecidos en el PRCA.

- Criterio 3: Relacionado al Índice de Aire y Salud, corresponde al rango de concentraciones en que se alcanza la categoría “Extremadamente Mala”.

Tabla 6-17 Criterios para la activación de las fases del PRCA (Monterrey)

Fase	O ₃ [ppm]		CO [ppm]		SO ₂ [ppm]	
	Media horaria		Media móvil 8 horas		Media 24 horas	
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 1	Criterio 2
Etapas Preventiva	>= 0,107	>= 0,070	>=11,1	>=12	>=0,111	>=0,253
Alerta	>= 0,130	>= 0,093	>=13,1	>=13,9	>=0,166	>=0,345
	Criterio 3					
	>=0,184		>=18,61		>=0,301	
Contingencia Fase 1	>= 0,154	>=0,115	>=15,51	>=15,9	>=0,221	>=0,435
Contingencia Fase 2	>= 0,184	>= 0,137	>=18,61	>=18,9	>=0,301	>=0,566
Desactivación	Alguna de las fases disminuya sus criterios hasta las concentraciones de Etapa Preventiva					

Fuente: Elaboración propia en base a información del PRCA de la ZMM.

El Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud, denominado Índice Aire y Salud, tiene propósito informativo sobre el estado de la calidad del aire, los riesgos a la salud y las medidas de protección que deberán difundirse a la población. Se calcula e informa de manera horaria para cada una de las estaciones de monitoreo SIMA, a través de la página web de aire estatal, aplicaciones móviles, redes sociales y medios de comunicación general.

Índice AIRE y SALUD	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de PM ₁₀ promedio móvil ponderado de 12 horas* (µg/m ³)	Intervalo de PM _{2.5} promedio móvil ponderado de 12 horas* (µg/m ³)	Intervalo de O ₃ promedio de una hora (ppm)	Intervalo de O ₃ promedio móvil de ocho horas (ppm)	Intervalo de NO ₂ promedio de una hora (ppm)	Intervalo de SO ₂ promedio móvil de 24 horas (ppm)	Intervalo de CO promedio móvil de ocho horas (ppm)
Buena	Bajo	≤ 50	≤ 25	≤ 0.051	≤ 0.051	≤ 0.107	≤ 0.008	≤ 8.75
Aceptable	Moderado	>50 y ≤ 75	>25 y ≤ 45	>0.051 y ≤ 0.095	>0.051 y ≤ 0.070	>0.107 y ≤ 0.210	>0.008 y ≤ 0.110	>8.75 y ≤ 11.00
Mala	Alto	>75 y ≤155	>45 y ≤79	>0.095 y ≤0.135	>0.070 y ≤0.092	>0.210 y ≤0.230	>0.110 y ≤0.165	>11.00 y ≤13.30
Muy Mala	Muy Alto	>155 y ≤235	>79 y ≤147	>0.135 y ≤0.175	>0.092 y ≤0.114	>0.230 y ≤0.250	>0.165 y ≤0.220	>13.30 y ≤15.50
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	> 236	> 147	> 0.175	> 0.114	> 0.250	> 0.220	> 15.50

Figura 6-1 Índice Aire y Salud para contaminantes criterio en Monterrey, México.

Fuente: Página web de aire del Estado de Nueva León
(http://aire.nl.gob.mx/map_calidad.html).

Dentro del programa se establece que el Comité Directivo es quien toma la decisión de levantar la fase del PRCA que se haya declarado, una vez que mejora la calidad del aire. Se compone por:

1. Gobernador del Estado de Nuevo León: En cuanto se alcanza alguna de las fases da las instrucciones para que se difunda el comunicado a toda la población y órdenes de gobierno.
2. Secretario General de Gobierno.
3. Secretario de Desarrollo Sustentable: Gira instrucciones al interior de la Secretaría para difundir el mensaje en redes sociales de la Secretaría y a las fuentes de competencia estatal y a las Autoridades Federales y Municipales.
4. Procurador Estatal de Desarrollo Sustentable: Da instrucciones para que los inspectores a su cargo inicien operativo de inspección de las actividades y establecimientos de competencia estatal.
5. Secretario de Salud: Emite recomendaciones y medidas específicas a la población en materia de protección de la salud, y se prepara para dar atención a la población que pudiera presentar efectos por la calidad del aire.
6. Secretaría de Educación: Da instrucciones a las instituciones educativas para que tomen las medidas necesarias para proteger a los estudiantes. Coordinará las acciones que se llevarán por parte de las instituciones académicas, públicas y privadas, incluyendo clubes y ligas deportivas infantiles.
7. Comunicación Social del Estado: Difunde el boletín o comunicado a través de la página de gobierno del Estado y difunde a los medios de comunicación.

Por otro lado, se tiene al Comité Operativo, el cual es el encargado de difundir la información relacionada con la fase declarada entre los agremiados y/o fuentes de competencia, además de cuando se suspende la fase declarada. También es el responsable de llevar a cabo y supervisar el cumplimiento de las medidas establecidas en los comunicados. Se compone de diversos miembros, entre los cuales destacan:

- Subsecretario de Protección al Medio Ambiente y Recursos Naturales: Mantiene informado al Secretario de Desarrollo Sustentable sobre las condiciones de la calidad del aire, y con el apoyo de la Dirección de Gestión Integral de la Calidad del Aire genera el boletín o comunicados del PRCA para declarar la fase correspondiente, el cual será emitido posteriormente por el Secretario.
- Protección Civil del Estado y los Municipios: realizarán medidas para prevenir y combatir incendios.

Cuando se alcanza alguna de las fases, se emite un comunicado o boletín incluyendo información sobre la fase activada y el contaminante involucrado; los supuestos necesarios para mantener la fase que se declara, así como las condiciones necesarias para declarar su fin; las medidas preventivas, restrictivas y en su caso suspensivas que deberá acatar la población, servicios públicos y privados, actividades industriales, de inmobiliaria y comercial, como también el sector de transporte.

A continuación, desde la Tabla 6-18 hasta la Tabla 6-21 se muestran los lineamientos y obligaciones que son emitidos durante cada fase. Las obligaciones típicas de la fase de Alerta se conservarán en las fases de Contingencia I y II.

Tabla 6-18 Lineamientos para fuentes fijas, móviles y de área durante la fase de Alerta.

ALERTA		
Fuentes fijas	Fuentes de área	Fuentes móviles
Uso de equipos anticontaminantes, humectación de patios, construcciones y vialidades, incluyendo el control de emisiones generadas por actividades al aire libre como por ejemplo pavimentación.	Mantener humectadas todas las superficies que no cuenten con cobertura vegetal, para minimizar la resuspensión de partículas.	No pueden circular vehículos generadores de emisiones contaminantes ostensibles (visibles/manifiestas)
Reducir las actividades a la intemperie como mantenimientos, pintura y soldaduras, u otras que generen el contaminante.	Para el transporte de materiales, deben mantener el material humectado y las cajas deberán estar selladas utilizando lonas que eviten la dispersión de materiales.	
Cobertura y/o humectación de materiales almacenados a granel.	No realizar quema de combustibles o cualquier material a cielo abierto, incluso para el entrenamiento de brigadas contra incendio. Se prohíbe la quema de basura	
Limpieza de áreas pavimentadas y riego de superficies que carecen de algún tratamiento superficial.		
No realizar actividades de voladura (fragmentación mineral).		
Minimizar el tránsito de vehículos en vialidades que no estén pavimentadas		

Fuente: Elaboración propia en base a información del PRCA de la ZMM.

Tabla 6-19 Lineamientos para población general y otros sectores durante la fase de Alerta.

ALERTA			
Escuelas y planteles educativos	Ligas deportivas infantiles	Equipos deportivos que tengan partidos locales	Población general
Minimizar actividades al aire libre, mantener cerradas puertas y ventanas.	No realizar actividades al aire libre.	Abstenerse de usar pirotecnia y quema de combustibles sólidos en sus instalaciones.	Evitar actividades al aire libre, no usar pirotecnia, abstenerse del encendido de fogatas.
Apagar motores vehiculares de transporte escolar y autos particulares en tiempos de espera.			Acudir al servicio médico ante cualquier malestar en vías respiratorias.
Humectar áreas sin cubierta vegetal.	Suspender ensayos y prácticas deportivas.		
Mantener alerta el servicio médico para atender a cualquier alumno o personal escolar.		Grupos sensibles (niños < 12 años, adultos > 65 años, mujeres embarazadas y personas con padecimientos bronco-respiratorios y cardiovasculares) deben mantenerse en interiores.	

Fuente: Elaboración propia en base a información del PRCA de la ZMM.

Tabla 6-20 Lineamientos para fuentes fijas, móviles y de área durante Contingencia Fase I.

CONTINGENCIA FASE I		
Fuentes fijas	Fuentes de área	Fuentes móviles
Paro parcial de actividades tal que permita la reducción de sus emisiones al menos en un 50% de los contaminantes que generaron la contingencia.	Suspensión de obras de mantenimiento urbano a la intemperie que emitan el contaminante criterio.	Restringir la circulación del 20% de los vehículos conforme al número de terminación de la placa en el sector o sectores donde se presentaron las concentraciones que generaron la contingencia (se determinan previamente los sectores por color). Excepción de vehículos de servicio público, de emergencias, eléctricos, híbridos y a gas natural.
Suspender la operación de gasolineras en un 20%, excepto las que cuenten con el sistema de recuperación de vapores con una eficiencia mínima del 90%.	Paro parcial de actividades de construcción de obras públicas y privadas tal que se reduzcan sus emisiones en un 50% de los contaminantes que generaron la contingencia.	

Fuente: Elaboración propia en base a información del PRCA de la ZMM.

Tabla 6-21 Lineamientos para fuentes fijas, móviles y de área durante Contingencia Fase II.

CONTIGENCIA FASE II		
Fuentes fijas	Fuentes de área	Fuentes móviles
Paro de actividades tal que permita la reducción de sus emisiones en un 70% de los contaminantes que generaron la contingencia.	Suspensión de obras públicas a la intemperie que emitan el contaminante.	Restricción vehicular del 20% de vehículos en toda la ZMM. Excepción de vehículos de servicio público, de emergencias, eléctricos, híbridos y a gas natural.
Suspender actividades en los establecimientos que utilicen combustible de leña o carbón y no cuenten con equipo de control de emisiones.	Paro parcial de actividades de construcción de obras públicas y privadas, tal que reduzcan sus emisiones en un 70% de los contaminantes que generaron la contingencia.	Vehículos cuyo peso bruto supere los 15.000 kg no podrán circular en la Zona Metropolitana, deberán usar vialidades periféricas que serán definidas por el Comité Directivo junto a los puntos de desvío.

Fuente: Elaboración propia en base a información del PRCA de la ZMM.

6.1.5 Sao Paulo, Brasil

En el Decreto Estatal n° 59.113 (Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013) se establece el Plan de Emergencia para Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica, con el objetivo de coordinar el conjunto de medidas preventivas adoptadas por el gobierno del estado, los municipios, las entidades privadas y la comunidad para evitar riesgos graves e inminentes para la salud de la población. Se establecen tres niveles de alerta ambiental: Atención, Alerta y Emergencia. Corresponderá a la CETESB (Compañía Ambiental del Estado de Sao Paulo) declarar el Estado de Atención, a la Secretaría del Medio Ambiente declarar el Estado de Alerta y al Gobernador del Estado declarar el Estado de Emergencia. En la Tabla 6-22 se muestran las concentraciones por contaminante que activan los niveles de alerta, para los cuales basta con que al menos uno de los criterios se supere para que el nivel de alerta sea establecido.

Tabla 6-22 Condiciones de establecimiento de criterios de alerta en Sao Paulo

Criterios de alerta	MP _{2.5} (µg/m ³ 24h)	MP ₁₀ (µg/m ³ 24h)	SO ₂ (µg/m ³ 24h)	O ₃ (µg/m ³ 8h)	NO ₂ (µg/m ³ 1h)	CO (ppm 8h)
Nivel de Atención	125	250	800	200	1.130	15
Nivel de Alerta	210	420	1.600	400	2.260	30
Nivel de Emergencia	250	500	2.100	600	3.000	40

Fuente: Elaboración propia en base al Decreto Estatal n°59.113 de 23/04/2013

Durante los episodios críticos, las fuentes de contaminación atmosférica estarán sujetas a las restricciones presentadas en la Tabla 6-23.

Tabla 6-23 Restricciones para fuentes emisoras durante episodios críticos (Sao Paulo)

Episodio	Contaminante del episodio crítico	
	CO, O ₃	MP, NO ₂ y SO ₂
Nivel de Atención	En las RCQA ⁽¹⁾ se solicitará la restricción voluntaria del uso de vehículos motorizados particulares.	En las RCQA: 1. La limpieza de purgas de calderas que utilicen fuel-oil o biomasa sólo podrá efectuarse entre 12:00 - 16:00 horas. 2. El inicio de nuevas operaciones industriales y de transformación y el reinicio de las paralizadas por mantenimiento o cualquier otro motivo deberán ser aplazados.
Nivel de Alerta	Se restringirá el acceso de vehículos motorizados particulares en áreas establecidas en los planes específicos de las RCQA.	En las RCQA: 1. Se prohíbe la limpieza por purga de las calderas que utilicen fuelóleo o biomasa mientras dure el episodio. 2. La quema de paja de caña de azúcar debe detenerse inmediatamente. 3. Las emisiones de fuentes estacionarias prioritarias, establecidas en los planes específicos de las RCQA, deben ser detenidas inmediatamente.
Nivel de Emergencia	Se prohíbe la circulación de vehículos automotores particulares y el transporte de carga en la RCQA.	En la RCQA: 1. Se prohíbe el procesamiento industrial de fuentes emisoras que generan el contaminante del episodio crítico. 2. Se detendrá inmediatamente la quema de paja de caña de azúcar en las RCQA. 3. Se prohíbe la quema de combustibles líquidos y sólidos en fuentes estacionarias 4. Se prohíbe la circulación de vehículos diésel, con excepción de los autobuses.

(1): Para la gestión de la calidad del aire, el territorio del Estado de Sao Paulo es dividido en Regiones de Control de la Calidad del Aire (RCQA), que coinciden con las 22 Unidades de Gestión de Recursos Hídricos (UGRHI) del Estado de Sao Paulo.

Fuente: Elaboración propia en base al Decreto Estatal n°59.113 de 23/04/2013

Adicionalmente, se calcula el Índice de calidad del aire y salud, que es utilizado principalmente para comunicar riesgos a la población. En la Tabla 6-24 se muestran los rangos de concentración por contaminante para los distintos rangos del índice. Al igual que en otros países, este índice se calcula por contaminante y solo se comunica el de mayor valor.

Tabla 6-24 Criterios para establecer niveles de calidad del aire en Sao Paulo.

Calidad	Índice	MP ₁₀ (µg/m ³ 24h)	MP _{2.5} (µg/m ³ 24h)	O ₃ (µg/m ³ 8h)	CO (ppm 8h)	NO ₂ (µg/m ³ 1h)	SO ₂ (µg/m ³ 24h)
Buena	0-40	0 - 50	0 - 25	0 – 100	0 – 9	0 – 200	0 – 20
Moderada	41-80	> 50 - 100	> 25 – 50	> 100 – 130	> 9 – 11	> 200 – 240	> 20 – 40
Mala	81-120	> 100 - 150	> 50 – 75	> 130 – 160	> 11 – 13	> 240 – 320	> 40 – 365
Muy mala	121-200	> 150 - 250	> 75 – 125	> 160 -200	> 13 - 15	> 320 – 1130	> 365 – 800
Pésima	> 200	> 250	> 125	> 200	> 15	> 1130	> 800

Fuente: Elaboración propia

6.1.6 Beijing, China

Beijing cuenta con un plan de contingencia contra la contaminación atmosférica para reducir la contaminación y proteger la salud pública, donde la gestión de episodios críticos se establece de

acuerdo con un Índice de Calidad del Aire (AQI) calculado por separado para los contaminantes $MP_{2.5}$, MP_{10} , O_3 , NO_2 , SO_2 y CO .

Para obtener el Índice de Calidad del Aire (AQI) se realiza el mismo cálculo que en la Ecuación 6, según la Norma HJ 633-2012 de China. En la Tabla 6-24 se muestra la categoría AQI según los niveles de concentración para cada contaminante.

Tabla 6-25 Índice de Calidad del Aire de China [$\mu g/m^3$]

Niveles AQI	Categoría AQI	AQI	SO_2 (1h)	SO_2 (24 h)	O_3 (1h)	O_3 (8 h)	CO (1h)	CO (24 h)	NO_2 (1h)	NO_2 (24h)	PM_{10} (24h)	$PM_{2.5}$ (24h)
Nivel 1	Excelente	0-50	150	50	160	100	5	2	100	40	50	35
Nivel 2	Buena	51-100	500	150	200	160	10	4	200	80	150	75
Nivel 3	Contaminación leve	101-150	650	475	300	215	35	14	700	180	250	115
Nivel 4	Contaminación moderada	151-200	800	800	400	265	60	24	1.200	280	350	150
Nivel 5	Contaminación intensa	201-300	(1)	1600	800	800	90	36	2.340	565	420	250
Nivel 6	Contaminación grave	>300	(1)	>1600	>800	(2)	>90	>36	>2.340	>565	>420	>250

Nota 1: Si el valor de concentración promedio de una hora de SO_2 es superior a $800 \mu g/m^3$, ya no se realizará el cálculo del subíndice de calidad del aire.

Nota 2: Si el valor de concentración promedio de 8 horas de O_3 es superior a $800 \mu g/m^3$, ya no se calculará su subíndice de calidad del aire.

Fuente: (HJ 633—2012: Technical Regulation on Ambient Air Quality Index, 2012)

La ciudad cuenta con un sistema municipal de alerta de contaminación atmosférica dividido en tres niveles que van en función de la gravedad de la contaminación, tal como se muestra en la Tabla 6-26.

Tabla 6-26 Niveles de alerta para Beijing.

Nivel de actuación o respuesta	Categoría del AQI	Verificador
Amarillo	Buena	AQI > 200 durante 48 horas
Naranja	Contaminación leve	AQI > 200 durante 72 horas
Rojo	Contaminación moderada	AQI > 200 durante 96 horas

Fuente: (Beijing Municipality, 2018)

A continuación, se muestran las medidas de precaución que establece la Municipalidad de Beijing para los distintos niveles de alerta mostrados en la Tabla 6-26.

Tabla 6-27 Medidas de precaución para la Alerta Amarilla

Consejos de salud	Propuestas de medidas de reducción de emisiones	Medidas obligatorias de reducción de emisiones.
Aconsejar resguardarse en casa y evitar actividades fuera del hogar a población con mayor riesgo, niños, adulto mayor, personas con enfermedades respiratorias, cardiovasculares, cerebrovasculares y otras enfermedades crónicas.	Se motivará a las personas a utilizar el sistema de transporte público para reducir el número de autos en la carretera. Los conductores deben apagar inmediatamente los motores al detenerse para evitar un ralentí	Limpieza profunda a las carreteras cada día
Se detendrán clases al aire libre, ejercicios durante los recreos y deportes a los chicos de preescolar, básica y media	Más medidas de control del polvo en las construcciones, las superficies de tierra descubierta y las zonas de apilamiento de materiales.	Paralización de todo tipo de pintura exterior con brocha o pulverizador, estabilización de terrenos con hormigón proyectado, toda demolición, corte de piedra y cemento y remoción de tierras.
Los departamentos de protección del medio ambiente, sanidad y planificación familiar, y educación, así como los gobiernos de distrito, intensificarán sus esfuerzos dentro de sus sectores o jurisdicciones en materia de medidas sanitarias y respuestas de emergencia a la contaminación atmosférica.	Se incrementa la limpieza de carreteras, para disminuir el polvo en ellas.	Los fabricantes incluidos en la lista de alerta amarilla deben suspender o restringir la producción.
	Se prohíben los asados en espacios abiertos	
	Limitar el uso de materias primas y productos que contengan compuestos orgánicos volátiles, como revestimientos, pinturas y disolventes.	

Fuente: (Beijing Municipality, 2018)

Tabla 6-28 Medidas de precaución para la Alerta Naranja

Consejos de salud	Propuestas de medidas de reducción de emisiones	Medidas obligatorias de reducción de emisiones.
Aconsejar resguardarse en casa y evitar actividades fuera del hogar a población con mayor riesgo, niños, adulto mayor, personas con enfermedades respiratorias, cardiovasculares, cerebrovasculares y otras enfermedades crónicas. El público en general también es aconsejado de reducir sus actividades fuera de sus hogares	Se motivará a las personas a utilizar el sistema de transporte público para reducir el número de autos en la carretera. Los conductores deben apagar inmediatamente los motores al detenerse para evitar un ralentí	Limpieza profunda a las carreteras cada día
Se detendrán todo tipo de actividad al aire libre, a los chicos de prescolar, básica y media	Más medidas de control del polvo en las construcciones, las superficies de tierra descubierta y las zonas de apilamiento de materiales.	Paralización de todo tipo de pintura exterior con brocha o pulverizador, estabilización de terrenos con hormigón proyectado, toda demolición, corte de piedra y cemento y remoción de tierras.
Las instituciones de salud proporcionarán información publicitaria, y asesoramiento médico, a quienes padezcan enfermedades respiratorias	Se incrementa la limpieza de carreteras, para disminuir el polvo en ellas	Existirán restricciones de vehículos en horario punta de tráfico en ciertos distritos, se prohibirá la circulación de todos los vehículos ligeros de gasolina que cumplan las normas China I y Ch (incluidos los vehículos de autoescuela).
	Limitar el uso de materias primas y productos que contengan compuestos orgánicos volátiles, como revestimientos, pinturas y disolventes.	Se prohibirán la circulación de vehículos (a excepción los de energía limpia), que transporten residuos de construcción, tierra y grava
	Existirá un horario más flexible en horarios de trabajo	Fabricantes incluidos en la lista de alerta naranja deben suspender o restringir la producción.
		Se prohíben fuegos artificiales y barbacoas al aire libre

Fuente: (Beijing Municipality, 2018)

Tabla 6-29 Medidas de precaución para la Alerta Roja

Consejos de salud	Propuestas de medidas de reducción de emisiones	Medidas obligatorias de reducción de emisiones.
Aconsejar resguardarse en casa y evitar actividades fuera del hogar a población con mayor riesgo, niños, adulto mayor, personas con enfermedades respiratorias, cardiovasculares, cerebrovasculares y otras enfermedades crónicas. El público en general también es aconsejado de reducir sus actividades fuera de sus hogares	Se motivará a las personas a utilizar el sistema de transporte público para reducir el número de autos en la carretera. Los conductores deben apagar inmediatamente los motores al detenerse para evitar un ralentí	Limpieza profunda a las carreteras principales cada día
Se recomienda al público que trabaja al aire libre, utilice mascarilla y tomen medidas preventivas	Aumentar medidas de control del polvo en las construcciones, las superficies de tierra descubierta y las zonas de apilamiento de materiales.	Se suspenden actividades que impliquen pintura exterior con brocha o pulverizador, estabilización de terrenos con hormigón proyectado, toda demolición, corte de piedra y cemento y remoción de tierras.
Que los chicos de preescolar, básica y media, tomen medidas como un horario flexible o suspensión de clases por completo	Se incrementa la limpieza de carreteras, para disminuir el polvo en ellas	Vehículos ligeros de gasolina que cumplan las normas de emisiones China I y II quedarán prohibidos en las carreteras; los que cumplan norma China III podrán circular los días pares e impares en función de su patente. Vehículos estatales deben cumplir restricción de patente, y un 30% adicional debe permanecer fuera de las calles.
Las instituciones médicas y sanitarias organizarán personal especializado para ofrecer consultas sanitarias, dar información sobre medidas preventivas, garantizar la disponibilidad de servicios de urgencia y el diagnóstico y tratamiento de pacientes con enfermedades relacionadas.	Todas las fuentes industriales deberán cumplir las normas de emisión e intensificar el uso eficiente de los equipos de tratamiento de la contaminación atmosférica.	Se prohibirán la circulación de vehículos (a excepción los de energía limpia), que transporten residuos de construcción, tierra y grava
	Limitar el uso de materias primas y productos que contengan compuestos orgánicos volátiles, como revestimientos, pinturas y disolventes.	Los fabricantes incluidos en la lista de alerta roja deben suspender o restringir la producción.
	Las empresas e instituciones pueden adoptar modalidades flexibles, como alternar los días de trabajo y de descanso, o trabajar a distancia.	Se prohíben fuegos artificiales y barbacoas al aire libre Aumentar la transmisión de electricidad desde otras ciudades para reducir la carga de generación eléctrica de Beijing.

Fuente: (Beijing Municipality, 2018)

6.1.7 Síntesis de la revisión de gestión de episodios críticos

A continuación, en la Tabla 6-30 se presenta un cuadro resumen con las fases de episodios críticos para cada país, junto a las concentraciones que activan dichas fases y los índices de calidad del

aire respectivos. Se incluye la norma de calidad del aire para cada país, equivalente a un AQI igual a 100.

Tabla 6-30 Resumen de las fases de episodios críticos y valores AQI.

Índice de calidad del aire (AQI)	Fase	O ₃		SO ₂		CO	
		[µg/m ³]		[µg/m ³]		[mg/m ³]	
		1h	8h	1h	24h	1h	8h
	Chile						
100	Norma	(1)		350			10
200	Alerta	400		500			17
300	Pre-emergencia	800		650			34
500	Emergencia	1000		950			40
	USA NY						
100	Norma	240	140	215		40	
150	Advertencia	250	142	217		41	
300	Alerta 1	410	212	872		18	
400	Alerta 2	810		1730		35	
500	Emergencia	1010		2299		46	
	USA CA						
100	Norma	240					
150	Aviso de salud	300					
300	Alerta 1	400					
400	Alerta 2	800					
500	Emergencia	1000					
	España						
100	Norma	(1)		350			
150	Preaviso	160					
200	Umbral de información	180		350			
300	Umbral de alerta	240		500			
	Colombia						
100	Norma		100	100			5
150	Alerta Fase 1		108	39			5
200	Alerta Fase 2		138	64			7
300	Emergencia		282	183			17
500	Emergencia		433	308			28
	México						
100	Norma	190			288		13
200	Etapas preventiva	214			663		14
300	Alerta	260			904		16
400	Contingencia 1	308			1140		18
500	Contingencia 2	368			1483		22
	Brasil						
100	Norma		140		60		10
200	Atención		200		800		17
400	Alerta		400		1600		34
500	Emergencia		600		2100		46
	China						
100	Norma	200	160		150	10	
200	Amarilla, Naranja, Roja ⁽²⁾	800	800		1600	90	

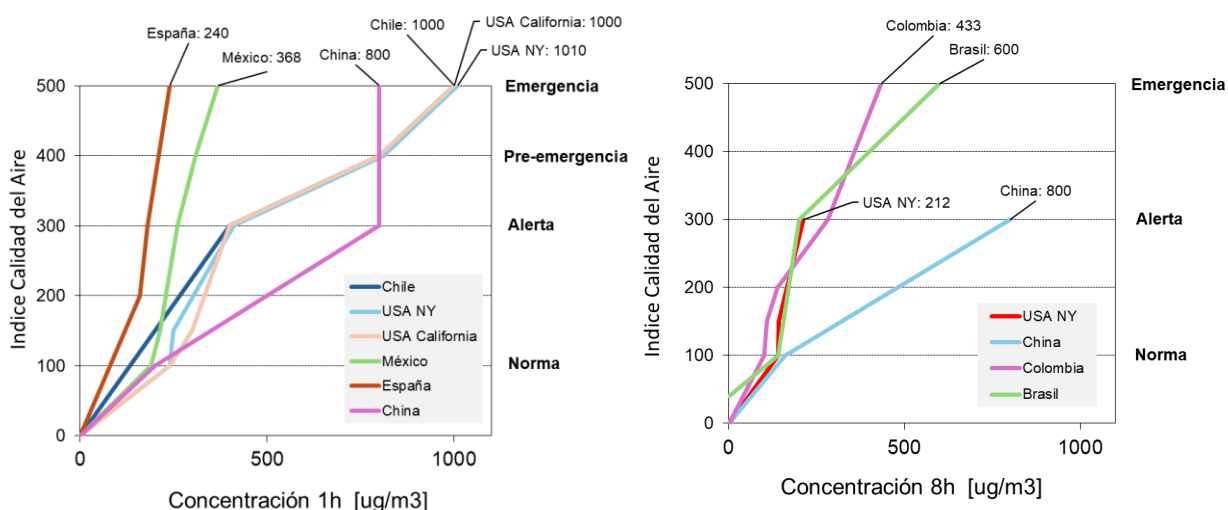
Nota 1: La norma considera métrica de 8 horas.

Nota 2: Las fases consideran la cantidad de horas en que se mantiene un AQI > 200.

Fuente: Elaboración propia

Con el fin de poder equiparar las distintas fases incorporadas en la gestión de episodios críticos de las ciudades revisadas, se realizaron gráficos para el O_3 , SO_2 y CO con el índice de calidad del aire que representaría cada fase. De esta manera, desde la Figura 6-2 hasta la Figura 6-4 se muestran gráficos de líneas, donde cada línea corresponde a un país, y cada punto dentro de la línea representa una fase, determinada por una concentración específica y equivalente a un índice de calidad del aire.

Dentro de la revisión se encontraron fases para episodios de emergencia de ozono tanto para métricas de 1 hora como de 8 horas. En la Figura 6-2 se puede observar que, para la métrica de 1 hora, España cuenta con fases que establecen niveles de concentración más bajos para activarse, mientras que en Chile y Estados Unidos se establecen las concentraciones menos estrictas para activar una fase de “emergencia” (equivalente a un índice de calidad del aire de 500). Por otro lado, para la media de 8 horas se puede apreciar que los países establecen fases de concentraciones similares, con excepción de China que establece un nivel mucho más laxo.



Nota: Para el caso de China, las fases de episodios críticos van aumentando según la cantidad de horas en que se mantiene un AQI > 200, por eso se observa un crecimiento vertical.

Figura 6-2 Comparación Índice de Calidad del Aire para O_3 .

Fuente: Elaboración propia

Respecto al SO_2 , se encontraron fases para episodios de emergencia de ozono tanto para métricas de 1 hora como de 24 horas. En la Figura 6-3 se puede observar que, para la métrica de 1 hora, Colombia cuenta con fases que establecen niveles de concentración más bajos para activarse, mientras que en Estados Unidos se establecen las concentraciones menos estrictas para activar una fase de “emergencia”. Por otro lado, para la media de 24 horas se puede apreciar que México activa su primera fase a una concentración menor que los otros países, incluso para definir la situación de emergencia establece una concentración más estricta. Por otro lado, China considera una mayor concentración para establecer su primera fase.

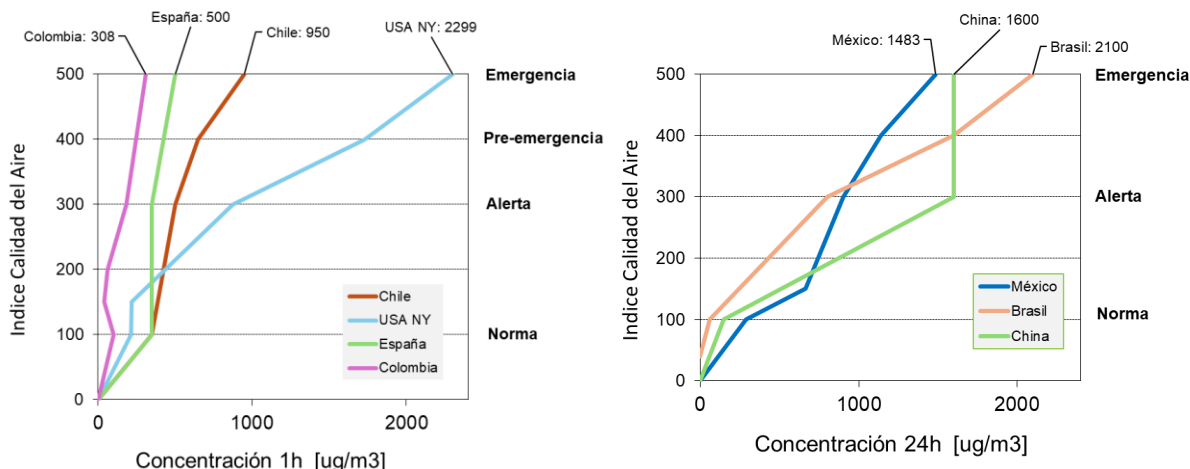


Figura 6-3 Comparación Índice de Calidad del Aire para SO₂.

Fuente: Elaboración propia

Para el CO, se encontraron fases para episodios de emergencia con métricas de 1 hora y 8 horas. En la Figura 6-4 se puede observar que, para la métrica de 1 hora, las concentraciones consideradas para activar las fases en Estados Unidos son más estrictas que en China. Por otro lado, para la media de 8 horas se puede ver que Colombia activa sus primeras fases a niveles más estrictos, en comparación a los otros países, aunque México establece una situación de emergencia antes que todos los demás, siendo Brasil quien establece esta fase a un valor mucho más alto de concentración.

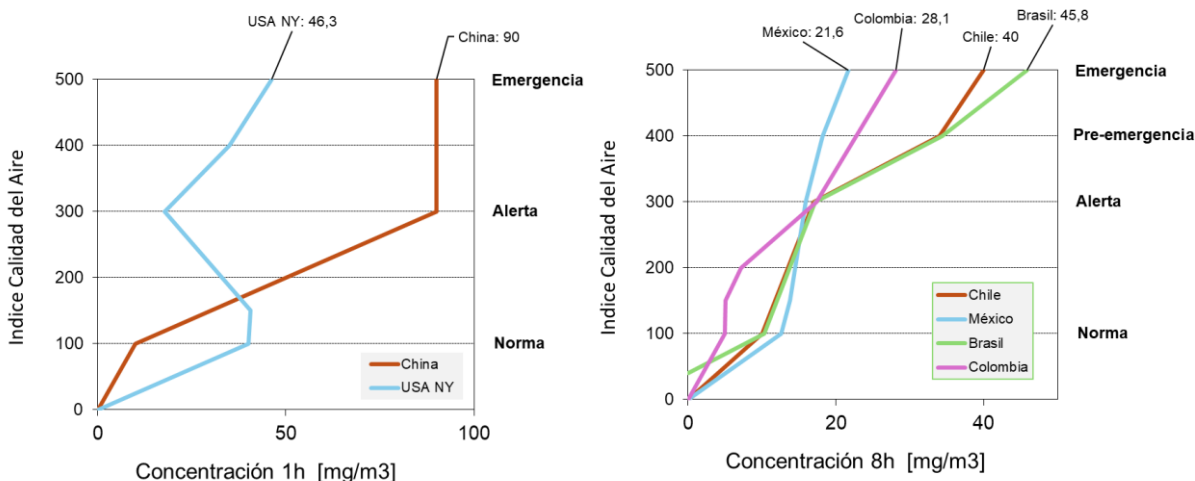


Figura 6-4 Comparación Índice de Calidad del Aire para CO.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Tabla 6-31 se muestra un resumen de las medidas aplicadas para cada ciudad en sus respectivas fases de episodios críticos, junto al índice de calidad del aire al que corresponderían.

Tabla 6-31 Resumen medidas aplicadas en gestión de episodios críticos.

Índice de calidad aire	Fase	Acciones
	USA NY	
300	Alerta 1	Usar combustibles con bajo contenido de cenizas y azufre, mantenimiento de calderas en horarios específicos, desvío de generación eléctrica a otras áreas. En industrias manufactureras reducir o postergar la producción, postergar la eliminación de desechos y reducir la demanda de calor en los procesos.
400	Alerta 2	Se prepara para una Emergencia. Industrias manufactureras cesan, reducen o postergan su producción, y eliminación de emisiones de residuos.
500	Emergencia	Se adoptan los planes de emergencia. Industrias manufactureras reducen al máxima su demanda de calor y vapor.
	USA CA	
150	Aviso de salud	Prohibición de quemas al aire libre, suspensión de actividades extenuantes para estudiantes, recomendación de reducir la circulación innecesaria de vehículos, identificación de instalaciones objetivo para reducción de emisiones.
300	Alerta 1	Reducir operaciones innecesarias de vehículos y equipos motorizados, considerar estudiantes se mantengan en el interior, instalaciones que emitan más de 50 ton/año de precursores del ozono deben implementar medidas de control de emisiones.
400	Alerta 2	Cierre de instalaciones educativas y agencias públicas no esenciales, suspensión de todos los eventos al aire libre, instalaciones que emitan más de 50 ton/año de precursores del ozono y de producción de asfalto deben reducir sus emisiones y producción al máximo.
500	Emergencia	Cierre de instalaciones recreativas, comerciales e industriales no esenciales, y las instalaciones gubernamentales no necesarias para la salud, seguridad pública o defensa nacional. Se solicita realizar viajes compartidos de emergencia o el uso de transporte público.
	España	
150	Preaviso	Validación de datos de las estaciones de monitoreo, asegurar disponibilidad y funcionamiento de mecanismos para niveles de actuación posteriores, recomendaciones a la población sobre actividad física.
200	Umbral de información	Comunicar la etapa a la población y organismos, convocar la Comisión de Calidad del Aire, recomendaciones a la población sobre actividad física.
300	Umbral de alerta	Comunicar la etapa a la población y organismos, convocar la Comisión de Calidad del Aire, recomendaciones a la población sobre actividad física.
	Colombia	
150	Alerta Fase 1	Recomendaciones a la población sobre actividad física.
200	Alerta Fase 2	Recomendaciones a la población sobre actividad física.
300	Emergencia	Recomendaciones a la población sobre actividad física, uso de tapabocas N95 en espacios abiertos y cerrados, movilizarse a zonas de menor contaminación.

Índice de calidad aire	Fase	Acciones
500	Emergencia	Recomendaciones a la población sobre actividad física, uso de tapabocas N95 en espacios abiertos y cerrados, movilizarse a zonas de menor contaminación.
	México	
300	Alerta	Usar equipos anticontaminantes, humectar áreas y materiales para evitar resuspensión, reducir actividades al aire libre que generen el contaminante, no realizar actividades de voladura, minimizar el tránsito en caminos no pavimentados, no quemar combustible o materiales ni hacer fogatas, no pueden circular vehículos generadores de humo negro/azul, no usar pirotecnia, recomendaciones a la población sobre actividad física y salud, grupos sensibles deben estar en interiores.
400	Contingencia 1	Reducir 50% emisiones de fuentes fijas, construcción de obras públicas y privadas. Restringir 20% la circulación de automóviles en el sector crítico, reducir 20% la operación de gasolineras sin recuperación de vapores (con eficiencia 90%). Suspender obras de mantenimiento al aire libre que emitan el contaminante.
500	Contingencia 2	Reducir 70% emisiones de fuentes fijas, construcción de obras públicas y privadas. Restringir 20% la circulación de automóviles en toda el área metropolitana (>15.000 kg no podrán circular). Suspender actividades que usen leña o carbón y no cuenten con control de emisiones. Suspender obras públicas al aire libre que emitan el contaminante.
	Brasil	
200	Atención	CO y O ₃ : En las Regiones de Control de la Calidad del Aire (RCQA) se solicitará la restricción voluntaria del uso de vehículos motorizados particulares. SO ₂ , MP y NO ₂ : En las RCQA mantenimiento de calderas en horario específico. El inicio o reinicio operaciones industriales deberán ser aplazados.
400	Alerta	CO y O ₃ : Restricción de vehículos motorizados particulares en áreas establecidas en los planes específicos de las RCQA. SO ₂ , MP y NO ₂ : En las RCQA se prohíbe la limpieza de las calderas. Deben detenerse la quema de paja de caña y las emisiones de fuentes estacionarias prioritarias (establecidas en los planes específicos de las RCQA).
500	Emergencia	CO y O ₃ : Se prohíbe la circulación de vehículos motorizados particulares y el transporte de carga en las RCQA. SO ₂ , MP y NO ₂ : En las RCQA se prohíbe actividades industriales que generen el contaminante crítico, la quema de combustibles líquidos y sólidos.
	China	
200	Amarilla, Naranja, Roja	Amarilla: Recomendaciones a la población sobre actividad física y salud. Se propone fomentar el uso del transporte público, medidas de control de resuspensión de polvo, limitar el uso de materias primas y productos
300		

Índice de calidad aire	Fase	Acciones
400		que contengan COVs, aumento de la limpieza de calles, paralizar todas las actividades de construcción y mantenimiento exterior que generen emisiones. Fabricantes incluidos en la lista de alerta amarilla deben suspender o restringir la producción. Naranja: Recomendaciones a la población sobre actividad física y salud. Horario laboral más flexible, restricción vehicular en horario punta para ciertos sectores, prohibida circulación de vehículos que transporten residuos de construcción, tierra y grava. Fabricantes incluidos en la lista de alerta naranja deben suspender o restringir la producción. Prohibición de fuegos artificiales o asados. Roja: Recomendaciones a la población sobre actividad física y salud, uso de mascarilla para personas que trabajen al aire libre, flexibilidad en horarios de clases o suspensión de las mismas. En fuentes emisoras intensificar el uso eficiente de los equipos de tratamiento de la contaminación. Horario laboral flexible o teletrabajo. Medidas de restricción vehicular y prohibición de circulación. Fabricantes incluidos en la lista de alerta roja deben suspender o restringir la producción. Aumentar la transmisión de electricidad desde otras ciudades no críticas.

Fuente: Elaboración propia

6.2 Gestión de episodios críticos en Chile

Actualmente la gestión de episodios críticos está asociada a los Planes de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) o a las medidas provisionales y complementarias decretadas en zonas saturadas¹⁹. La Tabla 6-32 muestra un resumen de los PPA nacionales que cuentan con un apartado específico para la gestión de episodios críticos. Se observa que, de los planes de gestión de episodios críticos abarcados en los PDA, solamente se tiene al SO₂ en las comunas de Quintero, Concón y Puchuncaví, para periodos de 1 hora. Si bien existe un PPDA asociado a la Región Metropolitana por O₃ y CO, entre otros contaminantes, en el solo se establece un Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica por MP₁₀, el cual se implementa anualmente durante el periodo comprendido entre el 1 de mayo y 31 de agosto.

Tabla 6-32 Resumen de planes GEC vigentes en el país.

PDA en el que se abarca	Contaminantes considerados en GEC
Quintero, Concón y Puchuncaví (D.S. N°105/2018)	SO ₂ , MP ₁₀ , MP _{2,5} , COVs
Tocopilla (D.S. N°70/2010)	MP ₁₀ , MP _{2,5}
Región Metropolitana (D.S. N°31/2016)	
Valle central de la región de O'Higgins (D.S. N°1/2021)	
Chillán y Chillán Viejo (D.S. N°48/2016)	
Los Ángeles (D.S. N°4/2017)	
Concepción (D.S. N°6/2018)	
Temuco y Padre Las Casas (D.S. N°8/2015)	
Valdivia (D.S. N°25/2017)	
Osorno (D.S. N°47/2016)	
Coyhaique (D.S. N°7/2019)	
Talca y Maule (D.S. N°49/2016)	MP ₁₀
Valle Central de Curicó (D.S. N°44/2017)	MP _{2,5}

Fuente: Elaboración propia

Los niveles que originan situaciones de emergencia ambiental pueden ser obtenidos mediante la constatación de las concentraciones del contaminante a partir de alguna de las estaciones monitoras EMRPG, o por medio de la aplicación de una metodología de pronóstico de calidad del aire o meteorológico (elaborado por el MMA para pronosticar la calidad del aire en zonas saturadas).

Por otro lado, existen Planes de Descontaminación Atmosférica para las zonas circundantes de fundiciones, que se presentan en la Tabla 6-33. En ellos, se establecen cronogramas de reducción de emisiones cuyo objetivo final es el cumplimiento de las normas primarias de calidad del aire. Se menciona que las fundiciones deben adoptar medidas operacionales tendientes a evitar o controlar los episodios críticos de contaminación, las cuales se establecen en un Plan Operacional

¹⁹ Esto permite aplicar acciones mientras se elabora o actualiza un Plan de Descontaminación Atmosférica.

que es elaborado por cada establecimiento y debe ser aprobado por el Servicio de Salud de la región a la que pertenecen.

Tabla 6-33 Resumen de PDA mineros vigentes en el país.

PDA	Contaminantes considerados
Fundición Chuquicamata (D.S. N° 206/2000)	SO ₂ , MP
María Elena y Pedro de Valdivia D.S. N°164/1998	MP
Fundición Hernán Videla (D.S. N° 180/1994)	SO ₂ , MP, As
Fundición de Potrerillos División Salvador (D.S. N° 179/1998)	SO ₂ , MP
Fundición Caletones División El Teniente (D.S. N° 81/1998)	SO ₂ , MP

Fuente: Elaboración propia

En el caso de que los niveles de concentración de SO₂ superen lo permitido por la norma, las divisiones de las fundiciones deben avisar a la población cercana de tal situación recomendando que se adopten las siguientes medidas:

- En situación de Alerta, los ancianos y personas con enfermedades cardíacas y respiratorias deben permanecer en sus casas o en un recinto cerrado, manteniendo puertas y ventanas cerradas.
- En situación de Advertencia, adicionalmente, la suspensión de clases de educación física y de actividades en el exterior.
- En situación de Emergencia, adicionalmente, todas las personas deben permanecer en sus casas o en un recinto cerrado, manteniendo puertas y ventanas cerradas minimizando las actividades físicas, desplazándose sólo para concurrir a su trabajo o por razones de fuerza mayor.

6.2.1 PDA Concón, Quintero y Puchuncaví

El Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví fue aprobado por el D.S. N°105 en 2018. Incluye una sección para la Gestión de Episodios Críticos (en adelante, GEC) para los contaminantes SO₂, MP₁₀, MP_{2.5}, NO_x, COVs. La GEC se implementa cuando el Delegado Presidencial Regional declara la condición de episodio crítico, ya sea a partir de malas condiciones de ventilación (definido en la Resolución N° 1 del MMA de 2023) o en caso de producirse un aumento en el número de atenciones en centros de salud que pudieran estar asociados con emisiones atmosféricas, previo informe de la Seremi de Salud. Para esto, la SEREMI del Medio Ambiente informará diariamente al Delegado Presidencial Regional, sobre la calidad del aire y el pronóstico meteorológico de las condiciones de ventilación, basándose en lo informado por la Dirección Meteorológica de Chile. De esta manera, el Delegado Presidencial Regional declarará la condición de episodio crítico a través de una resolución, que será comunicada oportunamente a los servicios competentes.

La GEC se implementará durante el periodo comprendido entre el 1 de enero al 31 de diciembre de cada año, entre las 00:00 y 08:00 horas (este horario puede ser extendido en caso de que las malas condiciones de ventilación persistan más allá del horario señalado).

La gestión de episodios críticos considera:

1. Las medidas de episodios críticos, que corresponden al conjunto de medidas incorporadas en los Planes Operacionales (que forman parte de un Plan de Descontaminación o Plan de Prevención), incluyen la paralización de fuentes, que permitan reducir emisiones en forma inmediata en periodos de malas condiciones de ventilación o derivados de otros eventos de emanaciones de contaminante.
2. Plan Comunicacional, cuya finalidad será informar oportunamente a la comunidad respecto de la Gestión de Episodios Críticos, para lograr el cumplimiento de las medidas de episodios críticos y promover conductas tendientes a reducir los niveles de exposición. Dicho Plan estará a cargo del Delegado Presidencial Regional, con apoyo de la SEREMI del Medio Ambiente. El Plan Comunicacional para el año 2023, aprobado por la Resolución Exenta N°1 del 3 de enero de 2023, establece los siguientes canales de información:
 - El sitio web institucional del Ministerio del Medio Ambiente (<https://airecqp.mma.gob.cl/>).
 - Twitter de la Delegación Presidencial Regional, SEREMI Medio Ambiente y Seremi de Salud. La Delegación Presidencial Regional debe informar por sus redes sociales, de forma diaria, horario de inicio y término de GEC (@dprvalparaiso) con activación de planes operaciones por parte de las empresas.
 - Gestión de medios mediante vocería del Delegado Presidencial Regional: Seremi del Medio Ambiente o Autoridad competente a quien se le delegue la vocería (nacional, regional, provincial o local).
3. Programa de fiscalización, entendido como el conjunto de acciones orientadas a la adecuada implementación de las medidas de la Gestión de Episodios Críticos, coordinado por la Superintendencia del Medio Ambiente y con la colaboración del Delegado Presidencial Regional, la SEREMI del Medio Ambiente, la SEREMI de Salud, las Municipalidades respectivas, y los órganos de la Administración del Estado competentes.

Una vez que se declara la GEC, las empresas del sector industrial deben activar sus Planes Operacionales aprobados previamente por la SEREMI del Medio Ambiente. Estos planes contienen al menos:

- a) Identificación de las fuentes emisoras del establecimiento, sean puntuales, areales o fugitivas, de SO₂, MP₁₀, MP_{2.5}, NO_x, COVs.
- b) Ubicación georreferenciada de las fuentes emisoras del establecimiento.
- c) Estimación o cálculo de emisiones.
- d) Medidas operacionales destinadas a disminuir las emisiones a la atmósfera de contaminantes criterio. El contenido de las medidas descritas será conforme a las características de los procesos industriales propios de cada establecimiento (paralización o reducción de la intensidad de funcionamiento de fuentes emisoras; reprogramación o disminución de ciclos de operación; aumentar la tasa de captura de emisiones; reprogramación de actividades de mantenimiento que sean susceptibles de generar emisiones; restricción de actividades de carga y descarga de hidrocarburos y venteos

desde estanques de almacenamiento de hidrocarburos, que no cuenten con sistemas de recuperación y/o eliminación de vapores.

- e) Porcentaje de reducción de emisiones para cada una de las fuentes emisoras identificadas.

A modo de ejemplo, en la Tabla 6-34 se listan algunas medidas establecidas en el Plan Operacional de la empresa ENAP Aconcagua, establecido en la Resolución Exenta N°2841/2024, que se deben ejecutar apenas se registre un nivel de emergencia para SO₂ en la comuna de Concón.

Tabla 6-34 Medidas operacionales ENAP Aconcagua frente a episodios críticos por SO₂.

Condición	Acción
Alerta	La carga en la unidad de Hidrotreatmento (HDT), no debe superar los 220 m3/hr durante el periodo que se registre y mantenga el nivel de Alerta.
Pre-emergencia	La carga en la unidad de Hidrocracking (HCK), no debe superar los 86 m3/hr durante el periodo que se registre y mantenga el nivel de Pre-emergencia.
Emergencia	La carga en la unidad de Hidrotreatmento (HDT), no debe superar los 187 m3/hr durante el periodo que se registre y mantenga el nivel de Emergencia. La carga en la unidad de Hidrotreatmento (HDT), no debe superar los 78 m3/hr durante el periodo que se registre y mantenga el nivel de Emergencia.

Fuente: Resolución Exenta N°2841/2024.

6.3 Propuesta de programas de medidas de gestión de episodios a implementar en los distintos territorios afectados por altos niveles de concentración de contaminantes

De la revisión de protocolos internacionales de gestión de episodios críticos realizada en la sección anterior, se da cuenta que en general los planes presentan medidas y procesos similares a lo establecido en Chile. Entonces, no se propone la creación de un nuevo programa de medidas de gestión de emergencia, sino que la implementación de algunos elementos que se destacan de la revisión internacional. Respecto al plomo, la posibilidad de implementar un programa de episodios críticos se discute en la Sección 6.3.1.1.

6.3.1 Propuesta de implementación

A continuación, se describen propuestas de elementos a implementar en la gestión actual de episodios críticos en Chile, cuya factibilidad sería conveniente de evaluar.

6.3.1.1 Valores que determinan las fases de los episodios críticos

En Chile los episodios de emergencia de O₃ involucran la métrica de 1 hora, sin embargo, en Bogotá y Sao Paulo estos episodios se establecen por medio de la métrica de 8 horas. Luego, existen ciudades como Nueva York y Beijing en donde los episodios se establecen tanto para métricas de 1 hora y 8 horas. De las ciudades que consideran la métrica de 1 hora, Madrid y

Monterrey son las que establecen las concentraciones más estrictas para activar una fase de “emergencia” (equivalente a un índice de calidad del aire de 500), con $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $368 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, mientras que en Chile se alcanza con $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Respecto al CO , de las ciudades que consideran la métrica de 8 horas para la gestión de episodios críticos al igual que en Chile, Monterrey es quien declara una situación de “emergencia” a nivel más estricto, con $21,6 \text{ mg}/\text{m}^3$, casi la mitad de lo que se establece en Chile para esta fase ($40 \text{ mg}/\text{m}^3$). En Bogotá el valor establecido para la situación de emergencia también es más estricto que la situación nacional, con $28 \text{ mg}/\text{m}^3$, y es quien activa sus primeras fases a niveles más estrictos, lo que es comprensible considerando que su norma también es la más estricta ($5 \text{ mg}/\text{m}^3$). De hecho, en Bogotá se activa la primera fase de emergencia apenas se alcanza el valor de la norma. Por otro lado, Nueva York y Beijing consideran episodios de emergencia solamente para la métrica de 1 hora.

La mitad de las ciudades revisadas declaran episodios de emergencia para el SO_2 considerando la métrica de 1 hora, al igual que en Chile, mientras que la otra mitad utiliza la métrica de 24 horas. Bogotá es la ciudad más estricta al momento de establecer los niveles de concentración que determinan sus fases de emergencia para el periodo de 1 hora, declarando la primera fase con $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a pesar de que su norma se encuentra en $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y activa la fase de “emergencia” en $308 \mu\text{g}/\text{m}^3$, casi tres veces menor a lo establecido en Chile ($950 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En Madrid, el valor establecido para la situación de emergencia también es más estricto que la situación nacional, con $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En base a los párrafos anteriores, es que podría evaluarse la incorporación del uso de la métrica de 8 horas para establecer episodios críticos de O_3 aparte de la que ya existe de 1 hora. Lo mismo para el caso del SO_2 , de manera que considere también la métrica de 24 horas para establecer los niveles de emergencia. Además, se podría evaluar la posibilidad de rebajar los valores límites que establecen las fases de emergencia para SO_2 y O_3 , de manera que se encuentren a la par que otras ciudades como Madrid, Bogotá y Monterrey. Lo anterior debido a que, para estos contaminantes, los valores que establecen un nivel de emergencia en Chile son entre tres y cuatro veces más altas que la ciudad más exigente entre las revisadas.

6.3.1.2 Verificadores para establecer los episodios de emergencia

Se propone evaluar la incorporación de verificadores explícitos para establecer los episodios críticos de contaminación. Como se menciona en el programa GEC de ozono para la ciudad de Madrid, bastaría con que alguna de las estaciones de la red de monitoreo supere el umbral de saturación, para activar la fase de emergencia a nivel comunal o provincial, dependiendo de la magnitud de estas resoluciones geográficas dentro de una región. Por otro lado, en Bogotá se considera como verificador que $\geq 50\%$ de las estaciones de la red de monitoreo de una zona superen el nivel definido para activar una fase de emergencia, o al menos 27 de 36 horas (75%) consecutivas alcancen ese nivel.

En Chile, estos verificadores no se encuentran explícitos en los decretos de las normas que define los niveles de episodios críticos. Se propone evaluar la factibilidad de implementar un verificador similar al de Madrid, donde el gatillante del episodio crítico es la superación en 1 monitor o un esquema más flexible como el de Bogotá donde las concentraciones se superen en al menos el 50% de la red. Se puede evaluar un verificador a nivel comunal, en el caso que exista uno o más monitores en una comuna. Si es más de un monitor, el verificador podría establecerse como Bogotá, mientras que, si es solo uno, podría realizarse como Madrid. En comunas donde no existen monitores, el verificador podría definirse a nivel provincial y se agruparían varias comunas en torno a el o los monitores presentes en las comunas correspondientes.

6.3.1.3 Índice de Calidad del Aire

Las medidas que existen actualmente para las distintas fases de alerta, pre-emergencia y emergencia se enfocan mayoritariamente en las fuentes emisoras, con el objetivo de disminuir los niveles de contaminación para proteger la salud de las personas. Sin embargo, resulta interesante considerar un mayor involucramiento de la población en acciones personales que contribuyan en la reducción de emisiones y/o resguarden su salud frente a episodios de emergencia ambiental.

El Índice de Calidad del Aire (AQI), definido en la Sección 6.1.1, se utiliza para informar a la población sobre la calidad del aire de manera simplificada con el fin de que puedan tomar acciones personales que les permitan proteger su salud. Sería conveniente evaluar la factibilidad de implementar el índice AQI como herramienta complementaria a las fases de emergencia, debido a que es una manera sencilla de comunicar diariamente a las personas en qué momento la calidad del aire está alcanza niveles riesgosos a la salud tanto para los grupos sensibles como la población general, de forma que las personas tomen las precauciones pertinentes para contribuir en la reducción de emisiones y/o disminuir su exposición a la contaminación.

El AQI incluye información de los grupos sensibles (ver Tabla 6-3) para cada contaminante atmosférico, lo que resulta muy beneficio ya que permitiría a las personas saber si ellos o alguien que conozca se encontraría más propenso a verse afectado un día que la calidad del aire no esté en la categoría de “Buena”, reconocer los síntomas que podrían tener (como tos, dificultad para respirar) o prestar atención en caso de que alguien de su entorno los esté presentando y de esta manera estar más preparados en caso de que empeoren y deban acudir a un centro asistencia del salud. De la misma manera, que reciban información directa de recomendaciones permitiría que se pudiera evitar esta situación e incluso evitar la aparición de síntomas. Recomendaciones como evitar actividad física al aire libre o reprogramar en otro horario, tener a mano medicación específica, evitar exposición al tráfico vehicular intenso, entre otras detalladas en la Tabla 6-4.

En caso de que se quisiera implementar, afectaría al Artículo 2 del D.S. N°104/2019 que define al Índice de calidad de aire de gases referido al dióxido de azufre (ICAGSO₂), por lo que debería modificarse para dejarlo sin efecto. Por otro lado, se trata de un índice que se ha implementado

en otros países (Estados Unidos, Colombia, Brasil y China), por lo que este aspecto sería una ventaja para Chile ya que tendría un “modelo a seguir”.

6.3.1.4 Plan Comunicacional

En la Sección 6.2.1 se mencionaron los canales de información abarcados en el Plan Comunicacional en el marco del PDA de las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví. Estos son similares a los encontrados dentro de la revisión de GEC de las ciudades, como el uso de página web oficial, redes sociales, radio, televisión, entre otras. Sin embargo, respecto a las redes sociales solo se menciona el Twitter de la Delegación Presidencial Regional, SEREMI Medio Ambiente y Seremi de Salud. Debido a esto, se podría evaluar la factibilidad de implementar otras plataformas de redes sociales como Instagram o Facebook, para abarcar a grupos sociales que no cuenten con cuenta en Twitter, e incluso la posibilidad de crear una aplicación gubernamental dedicada a difundir esta información. Para lo anterior sería recomendable considerar una evaluación preliminar que permita identificar el alcance a la comunidad que tendría cada una de estas plataformas. Además, se podría implementar un sistema de avisos por mensajería de texto comunicando el AQI y las recomendaciones a la población.

6.3.1.5 Evaluación periódica de los GEC

Se propone realizar evaluaciones periódicas a las medidas propuestas dentro de los programas GEC, con el fin de efectuar mejoras basadas en datos y retroalimentación, que posteriormente servirían de insumo y punto de partida para las actualizaciones de los PPDA. Para esto se podría establecer indicadores de desempeño que permitieran evaluar la efectividad de las medidas implementadas, además del nivel de cumplimiento de estas.

6.3.1.6 GEC para ozono

Si bien la Región Metropolitana ha sido la única declarada a nivel nacional como zona saturada por O₃ mediante el D.S. N°131/1996, actualmente no se establecen medidas específicas para este contaminante dentro de un programa de gestión de episodios críticos. Por lo tanto, en base a la revisión realizada en la Sección 6.1, se recomiendan las siguientes medidas para los niveles de emergencia que se establecen en el D.S. N°112/2002. Aunque estas medidas podrían centrarse en la temporada de verano, dada la evidencia científica que muestra un aumento en las concentraciones de O₃ durante este período, la creciente variabilidad climática registrada en la actualidad asociada al cambio climático sugiere la conveniencia de que tales medidas y también sus mecanismos de fiscalización asociados sean aplicables a lo largo de todo el año.

Alerta

- Prohibido todas las quemas al aire libre, incluidas quemas agrícolas y de gestión forestal y la incineración en toda la zona afectada.
- Suspensión de las actividades extenuantes sostenidas de los estudiantes que duren más de 1 hora.

- Que los grupos sensibles de la población reduzcan el ejercicio físico intenso al aire libre.
- Recomendación para reducir la circulación innecesaria de vehículos motorizados y preferir el transporte público.
- Comunicar a instalaciones objetivo la preparación de acciones de reducción de emisiones en caso de activarse etapas posteriores de emergencia.

Pre-emergencia

A las medidas mencionadas anteriormente, se agregan:

- Restricción vehicular y reducir cualquier operación innecesaria de equipos motorizados.
- Suspensión de las actividades extenuantes de los estudiantes y mantenerse en interior.
- Que la población general reduzca el ejercicio físico intenso al aire libre y los grupos sensibles reduzcan la exposición prolongada al aire libre.
- Solicitar a instalaciones que emitan precursores del ozono por sobre un umbral (por ejemplo, más de 50 ton/año) que activen medidas de control de emisiones, con su respectiva fiscalización.
- Solicitar a las instalaciones de producción de asfalto que reduzcan la producción.

Emergencia

A las medidas mencionadas anteriormente, se agregan:

- Que la población evite el ejercicio físico y la exposición al aire libre.
- Se prohíbe la circulación de vehículos transporte de carga.
- Cierre de instalaciones públicas que no sean esenciales para emergencias de salud y protección de la seguridad o defensa nacional.
- Cierre de todas las instalaciones comerciales e industriales que no sean de emergencia.
- Cierre de instalaciones educativas y recreativas.
- Suspensión de todos los eventos al aire libre.

6.3.1.7 GEC para monóxido de carbono

De la revisión de programas de gestión de episodios críticos en las seis ciudades, solamente Sao Paulo hacía una referencia explícita de medidas para enfrentar un episodio crítico por CO, las cuales se enfocaban principalmente en restricción vehicular (Tabla 6-23).

En el caso de Chile, la restricción vehicular ya existe implementada en aquellas regiones que presentan los niveles de CO más altos, como lo son la RM. Es por esto que no se propone gestión de episodios críticos para este contaminante, dado que las medidas internacionales revisadas sólo repiten protocolos actuales que están definidos para otros contaminantes y así se evita la sobre-regulación.

6.3.2 Gestión de episodios críticos para el Plomo

La gestión de la contaminación ambiental por plomo en ambientes comunitarios se centra en el control de la exposición de largo plazo de la población debido a la naturaleza de la toxicidad del

plomo, que depende solo de la concentración de plomo acumulado en la sangre. Aunque la toxicidad del plomo es bien conocida y sus efectos adversos pueden ser significativos incluso a concentraciones bajas pero prolongadas, especialmente en niños, la información disponible no ha identificado efectos agudos derivados de la inhalación de plomo.

Los efectos crónicos del plomo están bien documentados y se asocian con una amplia gama de impactos adversos en la salud, que incluyen efectos neurológicos, renales, cardiovasculares, hematológicos, inmunológicos, reproductivos y en el desarrollo, tanto en niños como en adultos. Estos efectos se han asociado con niveles de plomo en sangre desde 10 µg/dL, y no se ha identificado un umbral seguro para estos efectos (ver sección 3.1.1). El plomo se acumula en la sangre debido a la exposición de largo plazo. Un evento de alta concentración de plomo en el ambiente contribuye a la acumulación de plomo en la sangre (de igual manera que la exposición prolongada a niveles bajos de plomo), pero no existe evidencia de producir un efecto agudo por sí misma. Los efectos en salud dependen solo del plomo acumulado en la sangre y no de forma directa del plomo presente en el aire (ver sección 3.1.1.2).

Dado lo anterior, la gestión de la exposición al plomo en ambientes comunitarios se enfoca en la prevención y el manejo a largo plazo de la exposición crónica, en lugar de la gestión de episodios críticos agudos. Esto implica la implementación de medidas preventivas, como la reducción de la exposición a fuentes de plomo, el monitoreo de los niveles de plomo en sangre y ambientales, y la educación de las comunidades sobre los riesgos del plomo y las prácticas seguras para minimizar la exposición.

7. Diseño e implementación de una campaña de monitoreo para plomo

En este capítulo se presenta el diseño e implementación de una campaña de monitoreo para plomo. Antes del diseño, es necesaria una identificación y análisis de técnicas de muestreo, lo cual se detalla en la siguiente sección.

7.1 Identificación de técnicas de análisis de muestras para el monitoreo discontinuo

De acuerdo con el *“Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air”* de la EPA (U.S. EPA, 1999a), existen diferentes técnicas para analizar compuestos inorgánicos en el aire. Las técnicas para analizar plomo en filtros con partículas de material particulado respirable (MP₁₀, MP_{2.5}, MP_{1.0}, etc.) corresponden a:

- Espectroscopia de absorción atómica (AAS)
- Fluorescencia de rayos X (XRF)
- Plasma de acoplamiento inductivo (ICP)
- Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP/MS)
- Emisión de rayos X inducida por protones (PIXE)

7.1.1 Espectroscopia de absorción atómica (U.S. EPA, 1999b)

Las muestras pueden ser tomadas en filtros de fibra de vidrio en un muestreador de alto volumen, y posteriormente son extraídas en ácido caliente o por microondas. Aunque el método preferido de extracción es por microondas. La técnica AAS consiste en medir la cantidad de luz UV/visible absorbida por un elemento. La muestra líquida es vaporizada y atomizada por una llama (absorción atómica por llama (FAA)) o en un horno de grafito (absorción atómica en horno de grafito (GFAA)). Los átomos en estado basal absorben energía, se excitan y avanzan a un estado de energía más alto. Esta longitud de onda de luz absorbida es observada por un monocromador y un detector que mide la cantidad de luz absorbida por el elemento. La cantidad de energía absorbida es proporcional a la concentración del elemento en la muestra. La determinación de la concentración del metal se puede obtener utilizando una curva de calibración o directamente desde el instrumento.

La espectroscopia de absorción atómica mide solo un elemento por análisis. Al comparar las dos técnicas (FAA y GFAA), esta última es una técnica más avanzada y con mayor sensibilidad, tiene menor límite de detección y es posible usar una menor cantidad de muestra. Entre las desventajas de GFAA se encuentran el tiempo de análisis (varios minutos), y la programación del horno puede ser compleja. En cambio, la técnica FAA tiene las ventajas de ser fácil de aplicar y el análisis es rápido. Entre sus desventajas se encuentra que requiere utilizar gases (que pueden ser costosos) y requiere una gran cantidad de muestra (CS Analytical, 2022).

El límite de detección (MDL) para el plomo utilizando FFA es 2,2 (ng/m³) y GFAA es 0,05 (ng/m³). Estos límites de detección consideran un muestreo de 24 horas con un flujo de 1,13 m³/min utilizando un muestreador de alto volumen.

7.1.2 Fluorescencia de rayos X (XRF) (U.S. EPA, 1999f)

Las muestras pueden ser colectadas en filtros de teflón o filtros Nucleopore, aunque los filtros de teflón son más fáciles de manipular ya que cuentan con un anillo de poliestireno como soporte. La muestra debe ser colectada en forma uniforme en la superficie del filtro, de lo contrario no puede ser analizada, ya que solo se usa una fracción de la superficie del filtro en la medición.

Esta técnica consiste en que un tubo de rayos X irradia rayos X a la muestra (sobre una superficie del orden de 1 cm² de filtro), excitando a los electrones dentro de los átomos internos de la muestra y desplazándolos. Este vacío es reemplazado por electrones de capas superiores, lo que genera una pérdida de energía, esta pérdida de energía se registra como fluorescencia y es único para cada elemento. Puede analizar a los elementos químicos entre el sodio (Na) y el plomo (Pb). Entre las ventajas de esta técnica se encuentran: la preparación de la muestra es rápida, simple y segura y que no requiere digestión ni dilución, es un método no destructivo (los filtros se pueden guardar para eventuales contramuestras). Sin embargo, sus resultados pueden verse afectados por la interferencia de otros materiales, ruido background (Raw Materials, 2023).

El límite de detección para el plomo utilizando filtros de teflón en partículas finas es 0,45 (ng/m³) ó 1,5 (ng/cm²) y el MDL utilizando filtros Nucleopore en MP10 es 4,06 (ng/m³) ó 1,5 (ng/cm²). Estos límites de detección son para un muestreador dicotómico por 24 horas utilizando filtros de 37 mm de diámetro y un flujo de 0,9 (m³/h) y 0,1 (m³/h) para las fracciones fina y gruesa del MP₁₀, respectivamente (utilizando muestreadores de bajo volumen).

7.1.3 Plasma de acoplamiento inductivo (ICP) (U.S. EPA, 1999c)

Las muestras pueden ser tomadas en filtros de cuarzo o fibra de vidrio en un muestreador de alto volumen, y posteriormente son extraídas en ácido caliente o por microondas. La base de esta técnica es la medición de la emisión atómica usando una técnica de espectroscopia óptica. Las muestras líquidas son nebulizadas y el aerosol líquido así generado es transportado neumáticamente a una zona de ionización que es un plasma. Estos iones al volver a su estado fundamental emiten radiaciones de longitud de onda característica de cada elemento. Luego un sistema óptico separa la radiación según su longitud de onda y un detector mide la intensidad de estas radiaciones asociándolas con la concentración de cada elemento de la muestra.

Esta técnica es más compleja que la espectroscopia de absorción atómica, lo que implica mayores costos y tiempo de análisis, pero tiene las ventajas de mayor sensibilidad, todos los elementos pueden ser medidos al mismo tiempo (a diferencia de la ASS), excelente precisión, excelente rango dinámico lineal (LDR), usa gases inertes y el instrumento es fácil de operar.

El límite de detección para el plomo 7 (ng/m^3). Este límite de detección considera un muestreo por 24 horas utilizando un flujo de $1,13 \text{ (m}^3/\text{min)}$, utilizando un muestreador de alto volumen.

7.1.4 Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP/MS) (U.S. EPA, 1999d)

Las muestras pueden ser tomadas en filtros de cuarzo o fibra de vidrio en un muestreador de alto volumen, y posteriormente son extraídas en ácido caliente o por microondas. Esta técnica consiste en un método para generar iones (ICP) y un método para separar y detectar iones (MS). Las muestras líquidas son nebulizadas y el aerosol así generado es transportado neumáticamente a una zona de ionización que es un plasma. Los iones son separados en el espectrómetro según su relación masa/carga. La concentración de elementos es proporcional al número de iones detectados. Estas pueden ser determinadas mediante una curva de calibración o por dilución isotópica.

Entre las ventajas de esta técnica se puede mencionar que todos los elementos pueden ser medidos al mismo tiempo (o solo se puede analizar un elemento), tiene excelente precisión, excelente LDR, detecta concentraciones menores que ICP, utiliza gases inertes y usa pequeñas cantidades de muestra (a diferencia de ICP). Entre sus desventajas se encuentra el costo.

El límite de detección estimado para el plomo es $0,01 \text{ (ng}/\text{m}^3)$. Este límite de detección considera un muestreo por 24 horas utilizando un flujo de $1,13 \text{ (m}^3/\text{min)}$, utilizando un muestreador de alto volumen.

7.1.5 Emisión de rayos X inducida por protones (PIXE) (U.S. EPA, 1999e)

Para utilizar este método, las muestras de material particulado pueden colectarse en filtros de membrana de policarbonato (PCTE), Teflón o Kapton. Esta técnica no destructiva usa haces de iones energéticos, producidos por un acelerador de partículas para generar haces de protones en el rango 2-5 MeV para crear vacancia de electrones internos del átomo. Cuando los electrones de orbitales mayores llenan esos vacíos, los rayos X emitidos pueden ser detectados con un detector de Silicio y Litio (SiLi).

El límite de detección para el plomo utilizando filtros de teflón en Material particulado suspendido es $16,9 \text{ (ng}/\text{m}^3)$ ó $59 \text{ (ng}/\text{cm}^2)$). Este límite de detección es para un muestreador dicotómico por 24 horas utilizando filtros de 37 mm de diámetro y un flujo de $0,9 \text{ (m}^3/\text{h)}$, utilizando un muestreador de alto volumen.

7.1.6 Comparación de técnicas de análisis

En la Tabla 7-1 se muestra la comparación de las técnicas más utilizadas para detectar metales.

Tabla 7-1 Comparación de técnicas para determinar plomo.

	XRF	FAA	GFAA	ICP-OES	ICP-MS
Límite de detección	0,45 (ng/m ³) ó 1,5 (ng/cm ²). Considera un muestreador dicotómico por 24 horas utilizando filtros de 37 mm y un flujo de 0,9 (m ³ /h) y 0,1 (m ³ /h) respectivamente.	2,2 (ng/m ³). Considera un muestreo de 24 horas con un flujo de 1,13 (m ³ /min)	0,05 (ng/m ³). Considera un muestreo de 24 horas con un flujo de 1,13 (m ³ /min)	7 (ng/m ³). Considera un muestreo por 24 horas utilizando un flujo de 1,13 (m ³ /min).	0,01 (ng/m ³). Considera un muestreo por 24 horas utilizando un flujo de 1,13 (m ³ /min).
Pros	Poca o nula preparación de la muestra, método no destructivo	Análisis fácil y rápido	Técnica avanzada con alta sensibilidad, requiere poca muestra	Equipo fácil de operar, utiliza gases inertes	Excelente límite de detección, utiliza gases inertes, requiere poca muestra
Contras	Los resultados pueden verse afectados por interferencia de otros materiales y ruido background	Requiere gran cantidad de muestra, método destructivo	Largo tiempo de análisis (varios minutos), la programación del horno puede ser compleja, método destructivo	Método destructivo, la muestra debe ser aerosolizada	Método destructivo, desarrollar el método de análisis es bastante más complicado que para ICP-OES, se requiere personal altamente capacitado para el análisis.
Costos²⁰	36 USD (\$32.400)	0,57 UF (\$21.300)	34 USD (\$30.600)	0,30 UF (\$11.100)	45 USD (\$40.500)

Fuente: Técnicas utilizadas en Chile

En Chile, el D.S. 136/2001 que establece norma de calidad primaria para plomo en el aire, menciona que el método de medición de la norma consta de dos etapas: método de muestreo y análisis de plomo. El método de muestreo corresponde a método gravimétrico de muestreador de bajo, medio o alto volumen equipado con cabezal de MP₁₀. Y el análisis de plomo en el MP corresponde a la espectrometría de absorción atómica especificada en la norma ISO 9855 Aire Ambiente - Determinación del Contenido Particulado de Plomo en Aerosoles Captados en Filtros.

En la espectrometría de absorción atómica, la muestra es extraída del filtro utilizando ácido o por microondas. Posteriormente La muestra líquida es vaporizada y atomizada por una llama (absorción atómica por llama (FAA)) o en un horno de grafito (absorción atómica en horno de grafito (GFAA)). Los átomos en estado basal absorben energía, se excitan y avanzan a un estado de energía más alto. Esta longitud de onda de luz absorbida es observada por un monocromador y un detector que mide la cantidad de luz absorbida por el elemento. La cantidad de energía

²⁰ Costo de analizar solamente el plomo (excepto XRF que analiza una serie de elementos). Valores en USD corresponden a laboratorios en EE.UU.

absorbida es proporcional a la concentración del elemento en la muestra. Además de esta técnica, en Chile se han realizado estudios para determinar la concentración de plomo en material particulado utilizando XRF y ICP-OES (están incluidos en los estudios citados en la siguiente Sección 7.2), aunque esos datos no sirven para verificar el cumplimiento normativo dado que no son reconocidos por la norma vigente.

7.1.7 Síntesis de las técnicas de análisis de muestras para el monitoreo discontinuo

De las principales técnicas para el plomo presente en partículas MP_{10} , se tiene que la Espectroscopia de Absorción Atómica (AAS) puede realizarse mediante absorción atómica en llama (FAA) o en horno de grafito (GFAA). La técnica GFAA es más sensible y requiere menos muestra, aunque conlleva un análisis más complejo y lento. Por otro lado, FAA es más rápido, pero necesita más muestra y gases, lo que puede resultar costoso. Los límites de detección son $2,2 \text{ ng/m}^3$ para FAA y $0,05 \text{ ng/m}^3$ para GFAA.

Se tiene también la técnica de Fluorescencia de Rayos X (XRF), que es rápida y no destructiva, pero puede ser afectada por interferencias de otros materiales (superposición de líneas de rayos X de diferentes elementos o de otras fuentes que pueden distorsionar la señal de interés) y ruido de fondo (radiación de rayos X presente en el entorno, la fuente o el detector, que puede reducir la relación señal-ruido y el límite de detección). Los límites de detección son $0,45 \text{ ng/m}^3$ para filtros de teflón y $4,06 \text{ ng/m}^3$ para filtros Nucleopore.

El Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP) es más complejo y costoso que AAS, pero posee mayor sensibilidad y la capacidad de medir todos los elementos simultáneamente. El límite de detección es 7 ng/m^3 .

Además, se tiene la Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP/MS) que permite la medición simultánea de todos los elementos con excelente precisión, aunque su costo es elevado. El límite de detección es $0,01 \text{ ng/m}^3$.

Por último, la Emisión de Rayos X Inducida por Protones (PIXE) utiliza haces de iones para generar vacancias de electrones en los átomos de la muestra, cuyos rayos X emitidos son detectados. Es una técnica no destructiva pero menos sensible que otras. El límite de detección es $16,9 \text{ ng/m}^3$.

Las técnicas FAA, GFAA, ICP/OES e ICP/MS permiten determinar un solo elemento a la vez, por lo que son de especial interés al momento de analizar el plomo de forma independiente. Entre ellas, la que representa una menor inversión, pero también un bajo rendimiento es FAA, mientras que ICP/MS corresponde a la técnica que mayor rendimiento entrega, pero también la más costosa, aunque respecto al precio por muestreo relativo todas están en un nivel similar. Si bien la técnica de ICP/OES tiene el límite de detección de plomo alto en comparación a las otras técnicas analizadas, tiene una baja inversión y puede detectar concentraciones de plomo inferiores a la establecida en la norma chilena.

En Chile, para la medición de la norma de plomo se realiza el análisis en el MP por medio de espectrometría de absorción atómica. Respecto a las otras técnicas mencionadas (ICP/OES e ICP/MS), cada una tiene sus propias ventajas y desventajas. ICP/OES es más compleja, lo que implica mayores costos y tiempo de análisis, pero presenta una mayor sensibilidad por lo que implica una excelente precisión (utilizando un muestreador de alto volumen) y rango dinámico lineal (RDL). Por otro lado, ICP/MS también presenta una gran precisión y RDL, con el límite de detección más bajo que las otras dos técnicas, requiere de pequeñas cantidades de muestra, pero esto también significa un costo mucho más elevado.

Finalmente, la alta inversión requerida para instalar un acelerador de partículas para poder implementar el análisis PIXE hace inviable pensar que esta técnica pueda ser adoptada por un laboratorio nacional.

7.2 Antecedentes de mediciones de plomo en Chile.

A continuación, se presentan los resultados de mediciones de plomo que se han realizado en algunas ciudades de Chile. Esta información es valiosa para la posterior elección de sitios de muestreo de la campaña.

Respecto a la pertinencia de agregar más técnicas de medición de plomo en la normativa ambiental del plomo, se recomienda al menos agregar como técnicas equivalentes a absorción atómica la técnica de fluorescencia de rayos X (XRF en inglés) y las distintas variantes de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP en inglés) que ya han sido aplicadas en el país (ICP-OES, ICP-MS). Esta recomendación se hace considerando que el Estándar Europeo especifica como método de análisis la Absorción Atómica en horno de grafito o ICP-MS (Standard Method for the Measurement of Pb, Cd, As and Ni in the PM₁₀ Fraction of Suspended Particulate Matter, 2005) y la EPA tiene como métodos de referencia Absorción Atómica en llama y ICP-MS (U.S EPA, 2016). También es pertinente en principio agregar la técnica PIXE dentro de la normativa, dado que está disponible comercialmente (en el extranjero).

Tabla 7-2 Concentraciones de plomo medidas en Chile

Ciudad	Fecha	Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)	Referencia	Método de medición de plomo
Temuco	1998	0,311	Source Apportionment of PM ₁₀ and PM _{2.5} in Five Chilean Cities Using Factor Analysis (Kavouras et al., 2001)	XRF
Rancagua	1998	0,309		
Viña del Mar	1998	0,138		
Valparaíso	1998	0,295		
Iquique	1998	0,155		
Iquique	2005	0,107	Diagnóstico y monitoreo de la calidad del aire en las comunas de Arica e Iquique (CONAMA, 2006)	Espectrometría de absorción atómica
Arica	2005	0,070	Diagnóstico y seguimiento calidad del aire para Arica – Iquique – Alto Hospicio (CONAMA, 2009)	Espectrometría de absorción atómica
Iquique	2008	0,096		
Alto Hospicio	2008	0,120	Evaluación de riesgos a la salud de la población por la presencia de Polimetales en la matriz suelo, en la ciudad de Arica (CENMA, 2012)	Espectrometría de absorción atómica
Arica	2010	0,007		
Arica (Colegio Adolfo Beyzaga)	2015	0,007	Determinación de la calidad del aire y evaluación de riesgo en la comuna de Arica por la presencia de Polimetales en la matriz suelo (CENMA, 2015)	Espectrometría de plasma inductivamente acoplado (ICP)
Arica (Colegio Andino)	2015	0,005		
Arica (Colegio Integrado)	2015	0,008		
Arica (Colegio Las Américas)	2015	0,007		
Arica (Colegio Pablo Neruda)	2015	0,008		
Arica (Inacap)	2015	0,009	Informe técnico cumplimiento de normas de calidad del aire por MP ₁₀ , plomo, NO ₂ y SO ₂ (SMA, 2023b)	Espectrometría de absorción atómica
Huasco	2021	0,001		
Huasco	2022	0,002	Informe técnico cumplimiento de normas de calidad del aire por MP ₁₀ , plomo y SO ₂ (SMA, 2023c)	Espectrometría de absorción atómica
Copiapó	2021	0,002		
Paipote	2021	0,023		
San Fernando	2021	0,010		
Tierra Amarilla (ENAMI)	2021	0,010		
Copiapó	2022	0,004		
Paipote	2022	0,013		
San Fernando	2022	0,005		
Tierra Amarilla (ENAMI)	2022	0,008	Informe técnico cumplimiento de normas de calidad del aire por MP _{2.5} , MP ₁₀ , plomo, y SO ₂ (SMA, 2023a)	Espectrometría de absorción atómica
Quintero	2021	0,03		
La Greda	2021	0,007		
Puchuncaví	2021	0,006		
Los Maitenes	2021	0,021		
Valle Alegre	2021	0,006		
Quintero	2022	0,013		
La Greda	2022	0,004		
Puchuncaví	2022	0,003		
Los Maitenes	2022	0,013		
Valle Alegre	2022	0,003		

Fuente: Elaboración propia

7.3 Realización de campañas de monitoreo de Pb

A continuación, se presenta el desarrollo y los resultados de la campaña de monitoreo de plomo, para la cual se realizaron mediciones de material particulado MP₁₀. La propuesta del diseño se encuentra en el Anexo 7 de los Anexos Digitales.

7.3.1 Sitios de monitoreo

Los sitios de muestreo fueron seleccionados considerando los siguientes criterios: cantidad de población urbana expuesta, presencia de desarrollos industriales o de acopios de minerales, transporte, carga y descarga de los mismos o residuos que contengan plomo y volumen del parque automotor existente y proyectado.

La siguiente tabla y figuras muestran los cuatro puntos de monitoreo, todos los cuales corresponden a estaciones de monitoreo SINCA.

Tabla 7-3 Ubicación sitios de muestreo.

Ciudad	Nombre estación SINCA	Coordenadas geográficas UTM Datum WGS84		
		Este	Norte	Uso
Calama	Hospital El Cobre	509242	7516916	19K
Santiago	Pudahuel	337311	6298809	19H
Rancagua	Rancagua I	342015	6218523	19H
Talcahuano	Nueva Libertad	667962	5932742	18H

Fuente: Elaboración propia



Figura 7-1 Ubicación sitio de muestreo Hospital del Cobre, Calama

Fuente: Google Earth

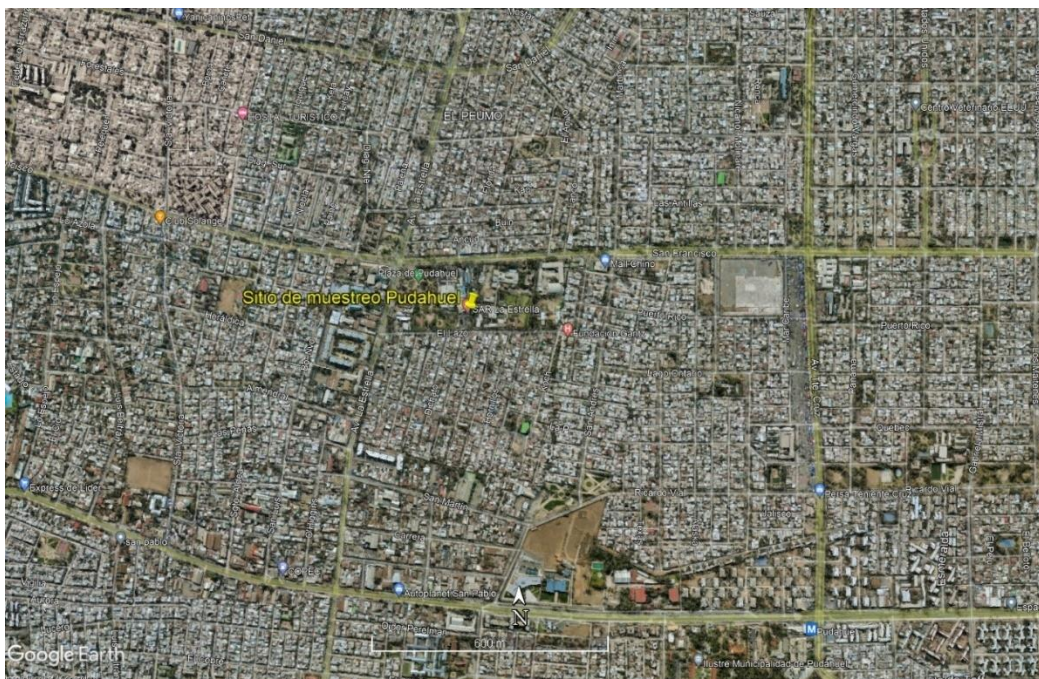


Figura 7-2 Ubicación sitio de muestreo Pudahuel, Santiago

Fuente: Google Earth



Figura 7-3 Ubicación sitio de muestreo Rancagua I, Rancagua.

Fuente: Google Earth



Figura 7-4 Ubicación sitio de muestreo Nueva Libertad, Talcahuano.

Fuente: Google Earth

7.3.2 Materiales y equipos utilizados

El muestreo de MP₁₀ se realizó utilizando filtros de teflón de 47 mm en muestreadores Partisol. Los equipos utilizados en Pudahuel y Rancagua fueron muestreadores Partisol (modelo 2000i Thermo Scientific), en Calama y Talcahuano también se utilizaron muestreadores Partisol (modelo 2000). Ambos equipos son muestreadores de bajo volumen, con sistemas de muestreo de material particulado aprobados por la U.S. EPA como FRM (Federal Reference Method).

En las siguientes imágenes se puede observar que los cabezales de los muestreadores están instalados en altura (a más de 2 metros desde el suelo), lejos de fuentes emisoras, y cumplen con la normativa vigente (Nº 61 de 2008 “Reglamento de Estaciones de Medición de Contaminantes Atmosféricos del Ministerio de Salud”).



Figura 7-5 Muestreador MP₁₀ en estación Hospital El Cobre, Calama.

Fuente: Elaboración propia



Figura 7-6 Muestreador MP₁₀ en estación Pudahuel, Santiago.

Fuente: Elaboración propia



Figura 7-7 Muestreador MP₁₀ en estación Rancagua I, Rancagua.

Fuente: Elaboración propia



Figura 7-8 Muestreador MP₁₀ en estación Nueva Libertad, Talcahuano

Fuente: Elaboración propia

7.3.3 Metodología de muestreo y análisis

El muestreo de MP₁₀ fue colectado por 24 horas cada 3 días, desde 0 a 0 horas. Previo al muestreo los filtros de teflón fueron pesados, por lo cual fueron acondicionados durante 24 horas en una sala con una temperatura de 25 °C ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) y una humedad relativa de 30% ($\pm 5\%$). Después del pasaje, los filtros fueron guardados en placas Petri estériles y luego dentro de un envase metálico (ambos etiquetados) para ser utilizados posteriormente en el muestreo de MP₁₀. Después del muestreo, los filtros vuelven a la sala de pesaje para ser nuevamente acondicionados por 24 horas en las mismas condiciones de temperatura y humedad relativa del pesaje inicial. Posteriormente los filtros son enviados al Laboratorio de Aguas y Alimentos del Dictuc para caracterizar el plomo a través del método ICP/OES.

7.3.4 Normativa aplicable

La siguiente tabla indica la normativa aplicable a las mediciones de plomo realizadas. Los resultados de las mediciones se van a comparar con estos valores límite.

Tabla 7-4 Resumen de valores límites considerados en la medición de plomo en Chile

Contaminante	Normativa	Estadígrafo	Valor límite
MP₁₀	MP ₁₀ (D.S. N°12/2022, MMA)	Concentración diaria, percentil 98	130 µg/m³N
		Promedio aritmético anual de 3 años	50 µg/m³N
Pb	Pb (D.S. N°136/2000, MINSEGPRES)	Promedio anual de dos años	0,5 µg/m³N

Fuente: Elaboración propia

7.3.5 Resultados de las mediciones de Plomo

Los resultados de las mediciones realizadas por DICTUC tanto de la campaña de verano como de otoño se presentan en las siguientes tablas y gráficos. Estos se comparan con la norma de MP₁₀ y las mediciones de las estaciones de monitoreo SINCA.

7.3.5.1 Resultados de la campaña de verano

Resultados MP10

Tabla 7-5 Concentración diaria MP10 Estación Hospital El Cobre (febrero – marzo 2024)

N°	Fecha de muestreo	Concentración MP ₁₀ DICTUC (µg/m³N)
1	20-02-2024	30
2	23-02-2024	22
3	26-02-2024	33
4	29-02-2024	26
5	03-03-2024	11
6	06-03-2024	29
7	09-03-2024	27
8	12-03-2024	33
9	15-03-2024	38
Promedio		28
Máximo		38
Mínimo		11

Fuente: Elaboración propia

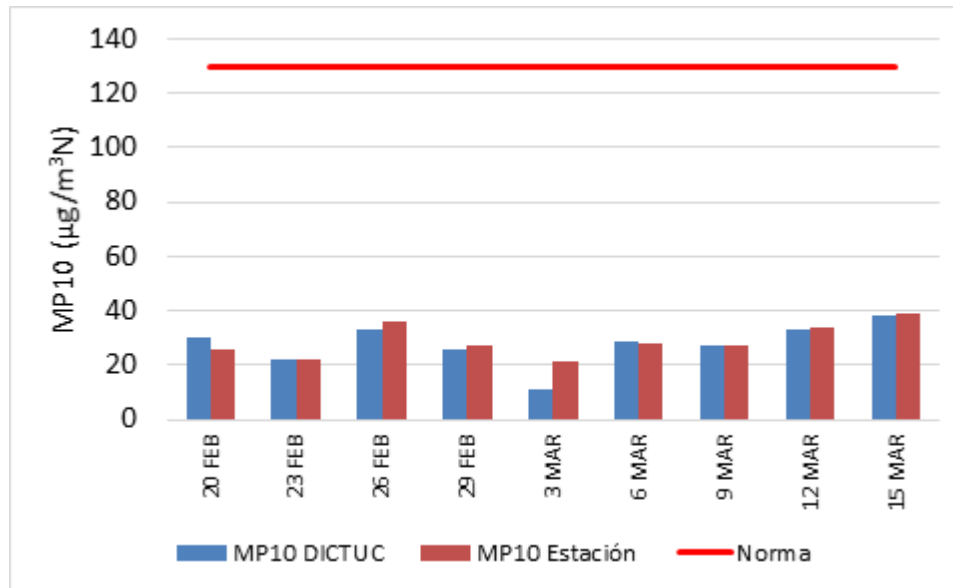


Figura 7-9 Concentración de MP₁₀ estación Hospital el Cobre (febrero – marzo 2024)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-6 Concentración diaria MP₁₀ Estación Pudahuel (febrero – marzo 2024)

N°	Fecha de muestreo	Concentración MP ₁₀ DICTUC (µg/m³N)
1	03-02-2024	57
2	06-02-2024	57
3	14-02-2024	33
4	17-02-2024	55
5	20-02-2024	41
6	23-02-2024	27
7	26-02-2024	45
8	29-02-2024	51
9	03-03-2024	37
10	14-03-2024	66
11	17-03-2024	51
Promedio		47
Máximo		66
Mínimo		27

Fuente: Elaboración propia

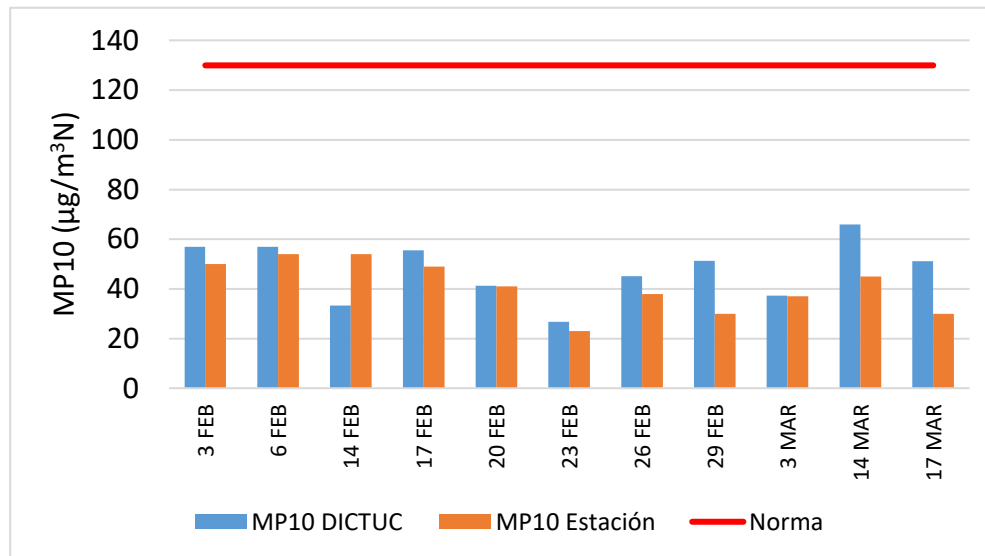


Figura 7-10 Concentración diaria MP10 Estación Pudahuel (febrero – marzo 2024)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-7 Concentración diaria MP10 Estación Rancagua I (febrero – marzo 2024)

N°	Fecha de muestreo	Concentración MP ₁₀ DICTUC (µg/m³N)
1	14-02-2024	69
2	17-02-2024	59
3	20-02-2024	55
4	23-02-2024	22
5	26-02-2024	24
6	29-02-2024	46
7	03-03-2024	57
Promedio		47
Máximo		69
Mínimo		22

Fuente: Elaboración propia

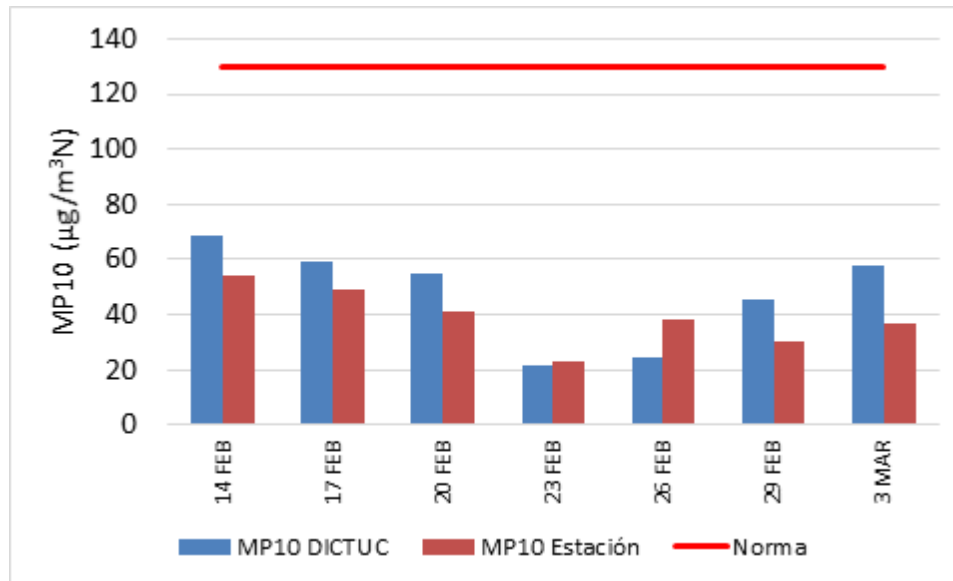


Figura 7-11 Concentración diaria MP10 Estación Rancagua I (febrero – marzo 2024)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-8 Concentración diaria MP10 Estación Nueva Libertad (febrero – marzo 2024)

N°	Fecha de muestreo	Concentración MP ₁₀ DICTUC (µg/m³N)
1	17-02-2024	91
2	20-02-2024	43
3	23-02-2024	65
4	26-02-2024	47
5	29-02-2024	77
6	03-03-2024	74
7	06-03-2024	75
8	09-03-2024	64
9	12-03-2024	27
Promedio		63
Máximo		91
Mínimo		27

Fuente: Elaboración propia

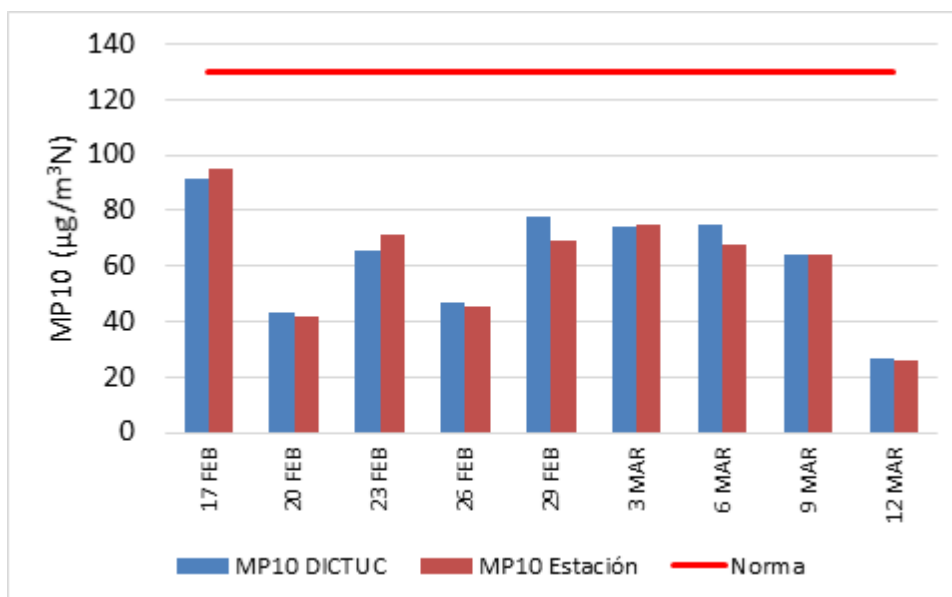


Figura 7-12 Concentración diaria MP10 Estación Nueva Libertad (febrero – marzo 2024)

Fuente: Elaboración propia

Caracterización química del MP₁₀.

Las siguientes tablas muestran las concentraciones de plomo presentes en el material particulado (en el Anexo 8 se encuentra el reporte del laboratorio).

Tabla 7-9 Concentración diaria plomo Estación Hospital El Cobre (febrero – marzo 2024)

N°	Fecha de muestreo	Concentración plomo DICTUC (µg/m³N)
1	20-02-2024	<0,17
2	23-02-2024	<0,17
3	26-02-2024	<0,17
4	29-02-2024	<0,17
5	03-03-2024	<0,17
6	06-03-2024	<0,17
7	09-03-2024	<0,17
8	12-03-2024	<0,17
9	15-03-2024	<0,17

Fuente: Elaboración propia

Todas las muestras se encuentran bajo el límite de detección (0,003 mg/filtro).

Tabla 7-10 Concentración diaria plomo Estación Pudahuel (febrero – marzo 2024)

N°	Fecha de muestreo	Concentración plomo DICTUC ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)
1	03-02-2024	<0,14
2	06-02-2024	<0,14
3	14-02-2024	<0,14
4	17-02-2024	<0,14
5	20-02-2024	<0,14
6	23-02-2024	<0,14
7	26-02-2024	<0,14
8	29-02-2024	<0,14
9	03-03-2024	<0,14
10	14-03-2024	<0,14
11	17-03-2024	<0,14

Fuente: Elaboración propia

Todas las muestras se encuentran bajo el límite de detección (0,003 mg/filtro).

Tabla 7-11 Concentración diaria plomo Estación Rancagua I (febrero – marzo 2024)

N°	Fecha de muestreo	Concentración plomo DICTUC ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)
1	14-02-2024	<0,14
2	17-02-2024	<0,14
3	20-02-2024	<0,14
4	23-02-2024	<0,14
5	26-02-2024	<0,14
6	29-02-2024	<0,15
7	03-03-2024	<0,15

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-12 Concentración diaria plomo Estación Nueva Libertad (febrero – marzo 2024)

N°	Fecha de muestreo	Concentración plomo DICTUC ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)
1	17-02-2024	<0,13
2	20-02-2024	<0,13
3	23-02-2024	<0,13
4	26-02-2024	<0,13
5	29-02-2024	<0,13
6	03-03-2024	<0,13
7	06-03-2024	<0,13
8	09-03-2024	<0,13
9	12-03-2024	<0,13

Fuente: Elaboración propia

Todas las muestras se encuentran bajo el límite de detección (0,003 mg/filtro).

7.3.5.2 Resultados de la campaña de otoño

La campaña de otoño se realizó en los mismos sitios de monitoreo que en verano. Los resultados de las mediciones realizadas por DICTUC se presentan en las siguientes tablas y gráficos. Estos se comparan con la norma de MP₁₀ y las mediciones de las estaciones de monitoreo SINCA.

Resultados MP₁₀

Tabla 7-13 Concentración diaria MP₁₀ Estación Hospital El Cobre (abril – mayo 2024)

N°	Fecha de muestreo	Concentración MP ₁₀ DICTUC (µg/m ³ N)
1	16-04-2024	19
2	19-04-2024	27
3	22-04-2024	26
4	25-04-2024	25
5	28-04-2024	20
6	01-05-2024	25
7	04-05-2024	17
8	07-05-2024	16
9	10-05-2024	19
10	13-05-2024	15
	Promedio	21
	Máximo	27
	Mínimo	15

Fuente: Elaboración propia

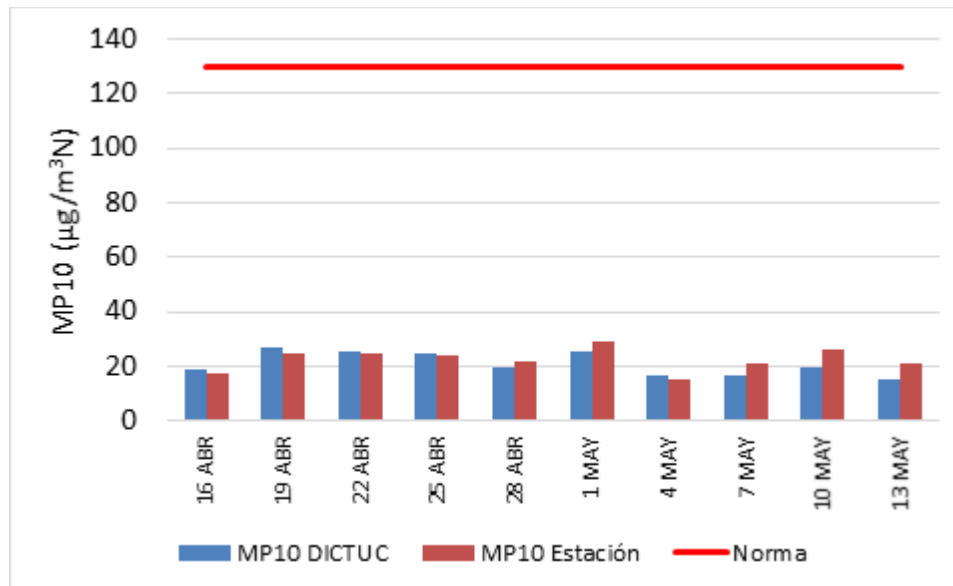


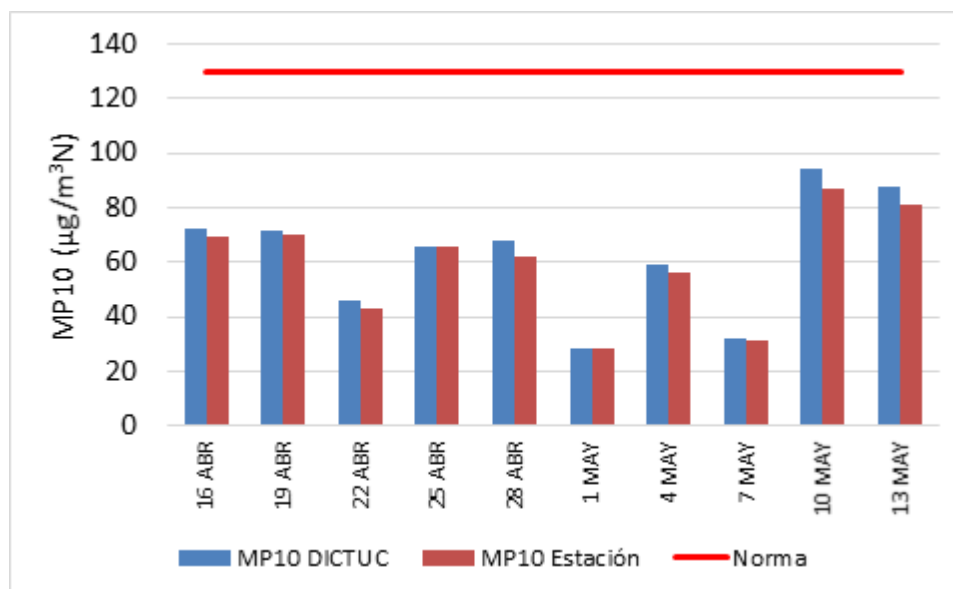
Figura 7-13 Concentración de MP₁₀ estación Hospital el Cobre (abril – mayo 2024)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-14 Concentración diaria MP₁₀ Estación Pudahuel (abril – mayo 2024)

N°	Fecha de muestreo	Concentración MP ₁₀ DICTUC (µg/m ³ N)
1	16-04-2024	73
2	19-04-2024	72
3	22-04-2024	46
4	25-04-2024	66
5	28-04-2024	68
6	01-05-2024	28
7	04-05-2024	59
8	07-05-2024	32
9	10-05-2024	94
10	13-05-2024	88
	Promedio	62
	Máximo	94
	Mínimo	28

Fuente: Elaboración propia

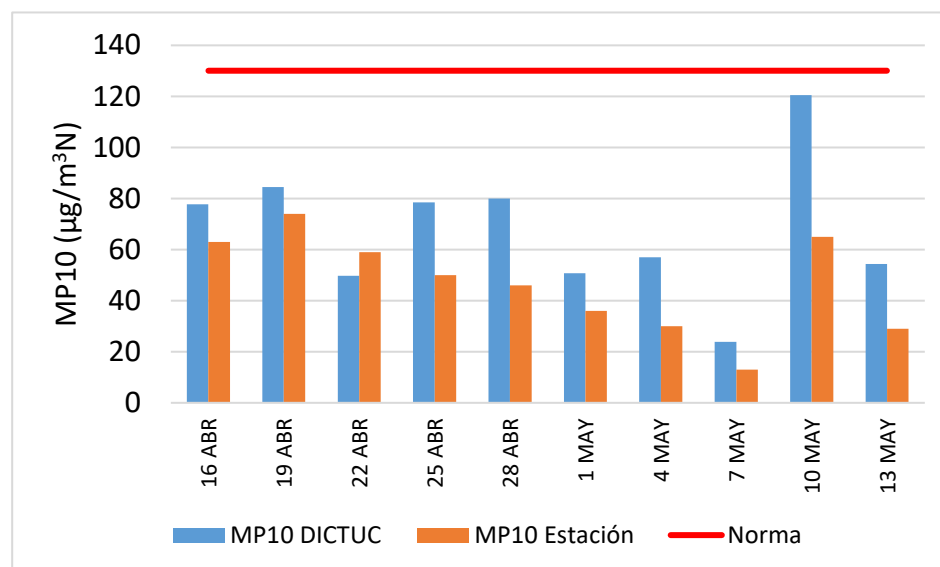

Figura 7-14 Concentración diaria MP₁₀ Estación Pudahuel (abril – mayo 2024)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-15 Concentración diaria MP₁₀ Estación Rancagua I (abril – mayo 2024)

N°	Fecha de muestreo	Concentración MP ₁₀ DICTUC (µg/m ³ N)
1	16-04-2024	78
2	19-04-2024	84
3	22-04-2024	50
4	25-04-2024	79
5	28-04-2024	80
6	01-05-2024	51
7	04-05-2024	57
8	07-05-2024	24
9	10-05-2024	121
10	13-05-2024	54
	Promedio	68
	Máximo	121
	Mínimo	24

Fuente: Elaboración propia

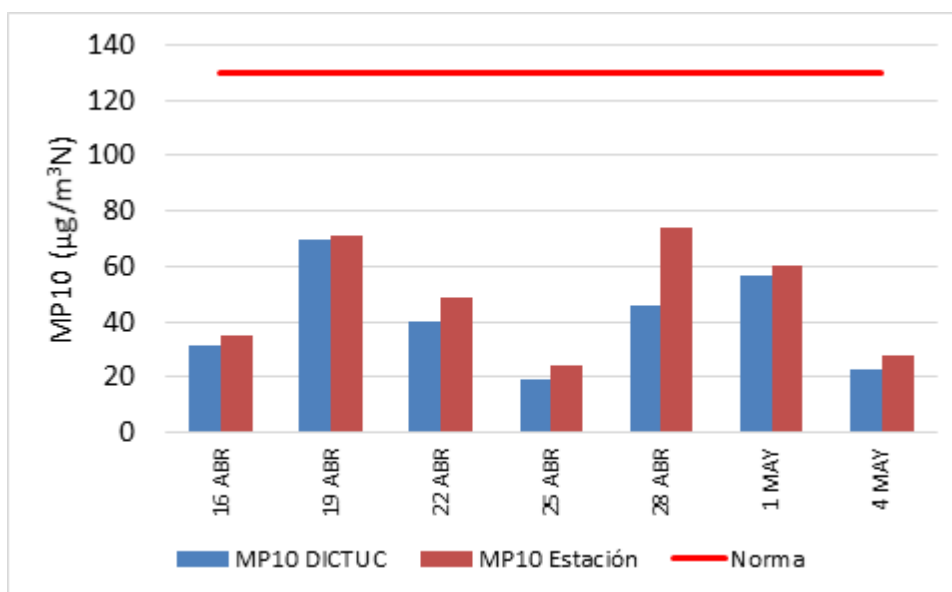

Figura 7-15 Concentración diaria MP₁₀ Estación Rancagua I (abril – mayo 2024)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-16 Concentración diaria MP₁₀ Estación Nueva Libertad (abril – mayo 2024)

N°	Fecha de muestreo	Concentración MP ₁₀ DICTUC (µg/m ³ N)
1	16-04-2024	31
2	19-04-2024	70
3	22-04-2024	40
4	25-04-2024	19
5	28-04-2024	46
6	01-05-2024	57
7	04-05-2024	23
	Promedio	41
	Máximo	70
	Mínimo	19

Fuente: Elaboración propia


Figura 7-16 Concentración diaria MP₁₀ Estación Nueva Libertad (abril – mayo 2024)

Fuente: Elaboración propia

Caracterización química del MP₁₀

Las siguientes tablas muestran las concentraciones de plomo presentes en el material particulado de los cuatro sitios de monitoreo (en el Anexo 9 se encuentra el Informe de ensayo del laboratorio de la campaña de otoño).

Tabla 7-17 Concentración diaria plomo Estación Hospital El Cobre (abril – mayo 2024)

N°	Fecha de muestreo	Concentración plomo DICTUC($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)
1	16-04-2024	<0,17
2	19-04-2024	<0,17
3	22-04-2024	<0,17
4	25-04-2024	<0,17
5	28-04-2024	<0,17
6	01-05-2024	<0,17
7	04-05-2024	<0,17
8	07-05-2024	<0,17
9	10-05-2024	<0,17
10	13-05-2024	<0,17

Fuente: Elaboración propia

Todas las muestras se encuentran bajo el límite de detección (0,003 mg/filtro).

Tabla 7-18 Concentración diaria de plomo Estación Pudahuel (abril – mayo 2024)

N°	Fecha de muestreo	Concentración plomo DICTUC ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)
1	16-04-2024	<0,14
2	19-04-2024	<0,14
3	22-04-2024	<0,14
4	25-04-2024	<0,14
5	28-04-2024	<0,14
6	01-05-2024	<0,14
7	04-05-2024	<0,14
8	07-05-2024	<0,15
9	10-05-2024	<0,14
10	13-05-2024	<0,14

Fuente: Elaboración propia

Todas las muestras se encuentran bajo el límite de detección (0,003 mg/filtro).

Tabla 7-19 Concentración diaria plomo Estación Rancagua I (abril – mayo 2024)

N°	Fecha de muestreo	Concentración plomo DICTUC ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)
1	16-04-2024	<0,14
2	19-04-2024	<0,14
3	22-04-2024	<0,14
4	25-04-2024	<0,14
5	28-04-2024	<0,14
6	01-05-2024	<0,14
7	04-05-2024	<0,14
8	07-05-2024	<0,14
9	10-05-2024	<0,14
10	13-05-2024	<0,14

Fuente: Elaboración propia

Todas las muestras se encuentran bajo el límite de detección (0,003 mg/filtro).

Tabla 7-20 Concentración diaria plomo Estación Nueva Libertad (abril – mayo 2024)

N°	Fecha de muestreo	Concentración plomo DICTUC ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)
1	16-04-2024	<0,13
2	19-04-2024	<0,14
3	22-04-2024	<0,13
4	25-04-2024	<0,13
5	28-04-2024	<0,13
6	01-05-2024	<0,13
7	04-05-2024	<0,13

Fuente: Elaboración propia

Todas las muestras se encuentran bajo el límite de detección (0,003 mg/filtro).

7.3.6 Conclusiones de las campañas de monitoreo

Respecto a la campaña de monitoreo de verano, en todas las mediciones se cumple con la normativa diaria de MP_{10} . La medición concentración más alta se obtuvo en la estación Nueva Libertad el día 17 de febrero de 2024, registrando 91 ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$). En todos los filtros analizados, el análisis químico indica que el plomo se encuentra bajo el límite de detección, que es 0,003 mg/filtro. En todos los casos se cumple con la normativa vigente de 0,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$).

En la campaña de monitoreo de otoño nuevamente las mediciones cumplen con la normativa diaria de MP_{10} . La medición concentración más alta se obtuvo en la estación Rancagua I el día 10 de mayo de 2024, registrando 121 ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$). Es posible que, en el caso del monitoreo de otoño de Rancagua, el equipo Partisol haya sobrestimado en aproximadamente un 50% la concentración ambiental de MP_{10} y, por lo tanto, también haya sobrestimado en ese mismo porcentaje la concentración ambiental de plomo en ese mismo sitio. En todos los filtros analizados, el análisis químico indica que el plomo se encuentra bajo el límite de detección, que es 0,003 mg/filtro. En todos los casos se cumple con la normativa vigente de 0,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$).

En general, las concentraciones de MP_{10} registradas por DICTUC son similares a las de las estaciones de monitoreo SINCA, excepto en Rancagua para la campaña de otoño, donde las concentraciones medidas en filtros fueron un 50% superiores a las mediciones SINCA. La medición de concentración más alta se obtuvo en la estación Rancagua el día 10 de mayo de 2024, registrando 121 ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$). Dado que este fue el único caso donde hubo una discrepancia de más del 20% entre el promedio medido en SINCA y el medido en filtros, se puede suponer que hubo un sesgo positivo en el muestreo de dicho equipo Partisol. Esto significa que los resultados para plomo presentados en la Tabla 7-19 están sobrestimados también en un 50%. En otras palabras, se sigue cumpliendo con la normativa del plomo en dicho sitio de medición.

8. Propuesta de escenarios de revisión para las normas primarias de SO₂, O₃, Pb y CO y para norma secundaria de SO₂

8.1 Propuesta de nuevos escenarios normativos y valores que generarían episodios de contaminación atmosférica

La propuesta de avanzar en los estándares de normativa ambiental que se propone responde a los siguientes criterios:

- Las normas buscan proteger a la población y los ecosistemas, por lo que el objetivo final es poder reducir las concentraciones lo más posible.
- Es la OMS la organización de referencia internacional a la hora de evaluar los niveles de concentraciones que puedan proteger a la población, por lo que sus recomendaciones son la base sobre la cual comparar la normativa local. Sin embargo, esta misma institución reconoce una gradualidad en el avance normativo, para lo cual establece objetivos intermedios (OI) con el fin de guiar un avance escalonado.
- Junto con lo anterior, la OMS genera los valores guía (VG) a partir de los estadígrafos de cada contaminante que causan los efectos en salud de acuerdo con la evidencia científica reciente. Es así como existen normas basadas en valores máximos de 1 hora, de 8 horas o promedios diarios y anuales. Sin embargo, no siempre estos estadígrafos se repiten en todos los contaminantes. Por ejemplo, en el caso del O₃, la evidencia habla de los efectos en salud de los valores máximos de 8 horas, pero no así de los promedios diarios o anuales. Los escenarios de norma siguen esta misma referencia y se enfocan en aquellos estadígrafos de las concentraciones que están respaldados por la evidencia reciente.
- Existe una interacción entre las distintas propuestas de norma para un mismo contaminante, que deben ser analizadas con el objetivo de elegir aquellas que generan mayor impacto en la reducción de emisiones, y así evitar sobre-regulaciones que no tendrían efectos en los objetivos finales de reducción de concentraciones.
- En aquellos lugares donde la norma actual ya cumple los criterios de la OMS, se propone reducir los estándares y evaluar su costo y beneficio de igual forma. La dificultad en estos radica hacia qué valores se debiera apuntar, ya que no existirían recomendaciones de la OMS. En estos casos se recomienda ampliar el análisis de recomendaciones hacia otras instituciones internacionales y/o países, como son la Unión Europea y la EPA.

Siguiendo los puntos previamente expuestos es que se proponen las siguientes normas para ser evaluadas en el presente estudio (ver Tabla 8-1). Los escenarios contemplan los valores base, que corresponden a la normativa actual. En algunos casos, las normas chilenas están alineadas con los objetivos intermedios de la OMS, como se indica en el O_3 . Los escenarios también contemplan dos propuestas de normas a evaluar, dentro de las cuales siempre se incluye el VG de la OMS. En el caso del CO , la OMS recomienda normas en base a promedios de 24 horas, por lo cual, son esos los evaluados, a diferencia de la norma actual basada en máximos de 1 hora. Para el SO_2 , se evalúa tanto la norma primaria como secundaria. En el caso de la norma primaria, se consideran las normas de máximos de 1 hora y los promedios diarios. Esto se debe comparar con los efectos de la norma secundaria, que se mide en promedios anuales.

Tabla 8-1 Propuesta de normas.

Contaminante	Escenario	Fuente	Max 1h	Max 8h	Media 24h	Media anual
O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Base	NPCA		120		
	Propuesta 1	OMS-OI1		100		
	Propuesta 2	OMS-VG		60		
CO (mg/m^3)	Base	NPCA	30	10		
	Propuesta 1	Canadá; OMS-OI1	25		7	
	Propuesta 2	OMS-VG			4	
SO_2 primaria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Base	NPCA	350		150	60
	Propuesta 1	Propuesto por contraparte; OMS-OI1; Alemania	250		125	50
	Propuesta 2	USA; OMS-VG; UE2030	197		40	20
SO_2 secundaria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Base	NSCA	700		260	60
	Propuesta 1	Propuesto por contraparte			150	50
	Propuesta 2	Propuesto por contraparte; UE			150	20
Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Base	NPCA				0,5
	Propuesta 1	Propuesto por contraparte				0,3
	Propuesta 2	Propuesto por contraparte				0,15

NPCA: Norma primaria de calidad del aire.

NSCA: Norma secundaria de calidad del aire.

OI: Objetivo Intermedio de la OMS.

VG: Valor Guía de la OMS.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 8-2 se muestran valores propuestos para establecer los episodios críticos de contaminación atmosférica según cada escenario de revisión de normas. Sin embargo, si bien estos valores se basan en los niveles actuales de decreto de episodios, requieren una evaluación posterior que permita determinar si efectivamente corresponden a los umbrales óptimos.

Tabla 8-2 Valores que generarían episodios de contaminación atmosférica.

Contaminante	Métrica	Escenario	Fuente	Norma	Alerta	Pre-emergencia	Emergencia
O ₃ (µg/m ³)	1h	Base	NPCA	⁽¹⁾	400	800	1.000
	8h	Propuesta 1	⁽²⁾	100	138	282	433
		Propuesta 2	⁽³⁾	60	83	170	260
CO (mg/m ³)	8h	Base	NPCA	10	17	34	40
	1h	Propuesta 1	⁽⁴⁾	25	43	85	100
		Propuesta 2	-	-	-	-	-
SO ₂ (µg/m ³)	1h	Base	NPCA	350	500	650	950
		Propuesta 1	⁽⁴⁾	250	360	465	680
		Propuesta 2	⁽⁴⁾	197	280	370	535

(1): La norma sólo considera métrica de 8 horas.

(2): Los valores se establecen según lo recopilado de la gestión de episodios críticos en Bogotá, ya que la norma vigente de Colombia corresponde a 100 µg/m³ al igual que la propuesta 1.

(3): Los valores se estimaron en base al porcentaje de superación que representan los valores de los niveles de emergencia de la propuesta 1 por sobre la norma propuesta 1 (de O₃). De esta manera, los niveles de alerta, pre-emergencia y emergencia ambiental se declaran una vez superada la norma en un 38%, 182% y 333% respectivamente.

(4): Los valores se estimaron según lo que establece la norma vigente actual, es decir, en base al porcentaje de superación que representan los valores de los niveles de emergencia por sobre la norma. De esta manera, para el CO los niveles de alerta, pre-emergencia y emergencia ambiental se declaran una vez superada la norma en un 70%, 240% y 300% respectivamente. Para el SO₂, estos niveles se declaran una vez superada la norma en un 42,86%, 85,71% y 171,43% respectivamente.

Fuente: Elaboración propia

8.1.1 Evaluación de la necesidad de modificar la Norma Primaria de Plomo en Aire

En la revisión de la normativa actual sobre la concentración de plomo en el aire, que establece un límite de 0,5 µg/m³, se han considerado diversos factores que sustentan la decisión de mantener el estándar sin cambios. A continuación, se presentan los argumentos principales:

- Efectividad de las Medidas Históricas:** Los antecedentes toxicológicos y los estudios ambientales realizados en Chile indican que las concentraciones de plomo en el aire no superan la norma actual. Esto demuestra la efectividad de las medidas históricas implementadas, como la eliminación del plomo en la gasolina y en las pinturas. Estas acciones han contribuido significativamente a que el aire no constituya actualmente una fuente principal de exposición al plomo en el país.
- Necesidad de Gestión de Otras Fuentes de Exposición:** Aunque la calidad del aire ha mejorado, es crucial verificar y gestionar otras fuentes potenciales de plomo en el ambiente. Ejemplos de estas fuentes incluyen los pesos utilizados para pescar y la munición de caza. Estas prácticas, que han sido objeto de regulación en la Unión Europea, podrían ser áreas clave para futuras investigaciones y regulaciones en Chile.
- Implementación del biomonitorio:** Se propone la introducción de biomonitorio biológico en la Encuesta Nacional de Salud como una medida preventiva. Este enfoque permitiría la detección temprana de exposiciones al plomo, ayudando a evaluar la efectividad de las políticas actuales y a identificar nuevas fuentes de exposición.
- Evaluación de la Norma Basada en la Relación Dosis-Respuesta:** Considerando la relación dosis-respuesta de 1:5 entre la concentración de plomo en el aire y en la sangre, la norma

actual permitiría que los niveles de plomo en sangre no superen los 2,5 µg/dL. Este nivel está significativamente por debajo del umbral de 10 µg/dL, asociado con efectos adversos en la salud. Cabe destacar que, aunque la literatura científica sugiere que no existe un nivel seguro de plomo en la sangre, los niveles actuales se mantienen en un rango considerado de bajo riesgo relativo.

Las evidencias actuales sugieren que la normativa de plomo en el aire en Chile es adecuada y efectiva en minimizar los riesgos para la salud pública. Sin embargo, se recomienda continuar con el monitoreo ambiental y el estudio de otras fuentes potenciales de exposición al plomo. Además, la implementación de biomonitoreo en la Encuesta Nacional de Salud fortalecerá aún más la capacidad del país para gestionar y responder a los riesgos asociados con la exposición al plomo.

8.2 Análisis de convergencia entre propuesta de norma y otros instrumentos regulatorios

A continuación, en las subsecciones siguientes se realiza una revisión de los instrumentos regulatorios que interactúan con la propuesta de norma, principalmente por establecer límites de emisión para los contaminantes de interés para el estudio, y posteriormente se realiza un análisis de la convergencia entre la propuesta de normas y los instrumentos regulatorios revisados.

8.2.1 Normas de emisión

8.2.1.1 Centrales Termoeléctricas

El D.S N°13/2011 del MMA establece la Norma de Emisión para Centrales Termoeléctricas para MP, NO_x, SO₂ y Hg. Se aplica a unidades de generación eléctrica (calderas o turbinas) con una potencia térmica ≥50 MWt (megavatios térmicos, considerando el límite superior del valor energético del combustible), exceptuando calderas y turbinas que forman parte de procesos de cogeneración. Los límites máximos de emisión se indican a continuación:

Tabla 8-3 Límites de emisión para fuentes emisoras del D.S. N°13/2011 (mg/m³N).

Combustible	Material Particulado (MP)		Dióxido de azufre (SO ₂)		Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	
	Fuentes existentes	Fuentes nuevas	Fuentes existentes	Fuentes nuevas	Fuentes existentes	Fuentes nuevas
Sólido	50	30	400	200	500	200
Líquido	30	30	30	10	200	120
Gas	NA	NA	NA	NA	NA	50

NA: No aplica.

Fuente: D.S N°13/2011 del MMA.

La Resolución Exenta N°569/2023 aprobó el anteproyecto de la norma de emisión de centrales termoeléctricas, elaborado a partir de la revisión del D.S. N°13/2011, y lo somete a consulta

ciudadana. Los límites máximos de emisión que establece el anteproyecto se muestran en la Tabla 8-4.

Tabla 8-4 Límites de emisión para fuentes emisoras en la R. Exenta N°569/2023 (mg/m³N).

Combustible	Material Particulado (MP)		Dióxido de azufre (SO ₂)		Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	
	Fuentes existentes	Fuentes nuevas	Fuentes existentes	Fuentes nuevas	Fuentes existentes	Fuentes nuevas
Sólido	30	10	200	120	200	120
Líquido	30	20	10	10	120	100
Gas	NA	NA	NA	NA	50	50

NA: No aplica.

Fuente: Resolución Exenta N°569/2023.

8.2.1.2 Fundiciones de cobre

El D.S. N°28/2013, del MMA establece la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico, que contempla la reducción de las emisiones al aire de MP, SO₂, As y Hg. La Tabla 8-3 muestra los límites de emisión para el contaminante SO₂. Es relevante mencionar que la Resolución Exenta N°1119/2020 dio inicio al proceso de revisión del D.S. N°28/2013.

Tabla 8-5 Límites de emisión SO₂ para fundiciones del D.S. N°28/2013.

Fundición	Límite máximo de emisión SO ₂	
	Fuentes existentes (ton/año)	Fuentes nuevas*
Altonorte	24.000	≤2% en peso del azufre ingresado a la fuente emisora
Caletones	47.680	
Chagres	14.400	
Chuquicamata	49.700	
Hernán Videla Lira ⁽¹⁾	12.880	
Potrerosillos	24.400	
Ventanas ⁽²⁾	14.650	

* Fuente emisora que ha obtenido su resolución de calificación ambiental con posterioridad a la publicación del decreto.

(1): Actualmente se encuentra con suspensión temporal de las operaciones.

(2): La fundición cerró en mayo de 2023.

Fuente: D.S. N°28/2013 del MMA.

Además, se establece que:

- En las chimeneas de las plantas de ácido existentes se debe emitir una concentración de SO₂ ≤600 ppm concentración promedio horaria.
- En otras fuentes industriales emisoras de arsénico existentes, las plantas de ácido deben emitir una concentración de SO₂ ≤400 ppm concentración promedio horaria.
- En las chimeneas de las plantas de ácido nuevas se debe emitir una concentración de SO₂ ≤200 ppm concentración promedio horaria.

8.2.1.3 Incineración, Coincineración y Coprocesamiento

El D.S. N°29/2013 del MMA establece la norma de emisión para Incineración, Coincineración y Coprocesamiento para SO₂, CO, NO_x, MP y otros contaminantes. La Tabla 8-6 muestra los valores límites de emisión permitidos en el efluente de fuentes emisoras.

Tabla 8-6 Límites de emisión para fuentes emisoras del D.S. N°29/2013 (mg/m³N).

Contaminante	Incineración	Coprocesamiento en hornos de cemento y Coincineración en hornos rotatorios de cal*	Coincineración de biomasa en instalaciones forestales
SO ₂	50	-	-
CO	50	-	50
NO _x	300	-	-
MP	30	50	50
Pb y sus compuestos, indicado como metal	1	1	1

* Que utilicen combustibles distintos a combustibles tradicionales.

Fuente: D.S. N°29/2013 del MMA.

8.2.1.4 Grupos electrógenos

El D.S. N°38/2020 del MMA establece la norma de emisión para grupos electrógenos, para los contaminantes CO, MP, HCNM+NO_x y NO_x, tal como muestran las tablas a continuación:

Tabla 8-7 Límites de emisión para grupos electrógenos nuevos* del D.S. N°38/2020 (g/kWh).

Desplazamiento volumétrico por colindo del motor (litros)	Potencia máxima (kW)	Provenientes del sistema de escape		
		CO	HCNM+NO _x	MP
NA	$19 \leq P < 37$	5,5	7,5	0,6
NA	$37 \leq P < 75$	5	4,7	0,4
NA	$75 \leq P < 130$	5	4	0,3
NA	$130 \leq P < 560$	3,5	4	0,2
$d < 10$	$P \geq 560$	3,5	6,4	0,2
$10 \leq d < 15$	$P \geq 560$	5	7,8	0,27
$15 \leq d < 20$	$560 \leq P < 3300$	5	8,7	0,5
	$P \geq 3300$	5	9,8	0,5
$20 \leq d < 25$	$P \geq 560$	5	9,8	0,5
$25 \leq d < 30$	$P \geq 560$	5	11	0,5
Desplazamiento volumétrico por colindo del motor (litros)	Potencia máxima (kW)	Velocidad máxima del motor (rpm)	NO _x	MP
$d \geq 30$	$P \geq 560$	$n < 130$	3,4	0,15 ⁽²⁾
		$130 \leq n < 2000$	$9,0 \cdot n^{-0,20}$ (1)	
		$2000 \leq n$	2,0	

NA: No aplica.

*Grupos electrógenos cuya importación se realiza a contar de 24 meses desde la entrada en vigencia del decreto.

(1): Redondear límite máximo de emisión a un decimal.

(2): O hasta un máximo de 0,4 (g/kWh), cuando esté justificado por las consideraciones específicas del proyecto

Fuente: D.S N°38/2020 del MMA.

Tabla 8-8 Límites de emisión para otros grupos electrógenos del D.S. N°38/2020 (g/kWh).**

Desplazamiento volumétrico por colindo del motor (litros)	Potencia máxima (kW)		Provenientes del sistema de escape		
		CO	HCNM+NO _x	NO _x	MP
NA	$130 \leq P < 560$	3,5	NA	0,4	0,02
$d < 10$	$P \geq 560$	3,5	Na	0,67	0,03
$10 \leq d < 30$	$560 \leq P < 3700$	5	1,8	NA	0,04
	$3700 < P$	5	1,8	NA	0,06
Desplazamiento volumétrico por colindo del motor (litros)	Potencia máxima (kW)	Velocidad máxima del motor (rpm)	NO _x		MP
$d \geq 30$	$P \geq 560$	$n < 130$	3,4		0,15 ⁽²⁾
		$130 \leq n < 2000$	$9,0 * n^{-0,20}$ (1)		
		$2000 \leq n$	2,0		

NA: No aplica.

**Grupos electrógenos cuya importación se realiza a contar de 48 meses desde la entrada en vigencia del decreto.

(1): Redondear límite máximo de emisión a un decimal.

(2): O hasta un máximo de 0,4 (g/kWh), cuando esté justificado por las consideraciones específicas del proyecto

Fuente: D.S N°38/2020 del MMA.

8.2.2 Planes de Prevención y Descontaminación Atmosférica

Se revisaron todos los PDA vigentes y se observó que la mayoría de ellos contiene un capítulo de control de emisiones de fuentes estacionarias, en los que se incluyen límites máximos de emisión de SO₂, tal como resume la Tabla 8-9.

Tabla 8-9 Límites de emisión SO₂ para fuentes estacionarias en los PDA.

Tipo de fuente	PDA	Potencia térmica	Límite máximo de emisión de SO ₂ (mg/m ³ N)	
			Fuentes existentes	Fuentes nuevas
Calderas*	Calama (D.S. N°5/2022)	≥ 1 y < 3 MWt	NA	400
		≥ 3 y < 20 MWt	NA	400
		≥ 20 MWt	400 ⁽¹⁾	400
	Concón, Quintero y Puchuncaví (D.S. N°105/2018)	≥ 300 kWt y < 1 MWt	NA	100
		≥ 1 MWt y < 20 MWt	200	50
		≥ 20 MWt	200	20
	O'Higgins (D.S. N°1/2021)	≥ 1 MWt y < 20 MWt	NA	400
		≥ 20 MWt	600 ⁽²⁾	200
			400 ⁽³⁾	
	Concepción (D.S. N°6/2018)	> 75 kWt y ≤ 1 MWt	NA	100
		≥ 1 MWt y ≤ 20 MWt	200	50
		> 20 MWt	200	20
	Los Ángeles (D.S. N°4/2017)	≥ 3 MWt y < 20 MWt	NA	400
		≥ 20 MWt	400	200
	Talca y Maule (D.S. N°49/2016)	≥ 75 kWt y < 3 MWt	NA	400
		≥ 3 MWt y < 20 MWt	600	400
		≥ 20 MWt y < 50 MWt	400	200
		≥ 50 MWt	400	200
	Curicó (D.S. N°44/2017)	≥ 1 MWt y < 3 MWt	NA	400
		≥ 3 MWt y < 20 MWt	600	400
		≥ 20 MWt	400	200
	Chillán (D.S. N°48/2016)	≥ 75 kWt y < 3 MWt	NA	400
		≥ 3 MWt y < 20 MWt	600	400
		≥ 20 MWt	400	200
	Temuco (D.S. N°8/2015)	≥ 75 kWt y < 3 MWt	NA	400
		≥ 3 MWt y < 20 MWt	600	400
		≥ 20 MWt	400	200
	Valdivia (D.S. N°25/2017)	≥ 3 MWt y < 20 MWt	NA	400
		≥ 20 MWt	400	200
	Osorno (D.S. N°47/2016)	≥ 3 MWt y < 20 MWt	600	400
		≥ 20 MWt	400	200
Hornos	Concepción (D.S. N°6/2018)	Vidrio > 20 MWt	Combustible gaseoso 500	300
			Combustible líquido 1.000	600
		Cemento y Cal > 20 MWt	400	100

NA: No aplica.

* Calderas que usen combustible de origen fósil, en estado líquido o sólido

(1): Aplica solo a calderas cuyo estado del combustible es sólido.

(2): 24 meses desde publicación del Plan.

(3): 48 meses desde publicación del Plan.

Fuente: Elaboración propia a partir de información de los PDA.

En el PDA Concón, Quintero y Puchuncaví (CQP) también se establece un límite de emisión de SO₂ específico para las fuentes estacionarias de CODELCO División Ventanas, el Complejo Termoeléctrico Ventanas y ENAP Refinerías Aconcagua.

Tabla 8-10 Emisiones máximas permitidas en grandes fuentes del PDA CQP.

Emisiones máximas permitidas	Emisiones de SO ₂ (ton/año)		
	CODELCO División Ventanas ⁽¹⁾	Complejo Termoeléctrico Ventanas ⁽²⁾	ENAP Refinerías Aconcagua
Antes de la publicación del Plan	14.650	8.877	2.190
Desde la publicación del Plan	10.561	5.579	1.492
En el plazo de 3 años contado desde la publicación del Plan	9.523	5.326	1.145

(1): La fundición cerró en mayo de 2023.

(2): En la actualidad, dos de las unidades generadoras de este complejo se encuentran cerradas (Ventanas 1 y 2), y las otras dos unidades restantes (Central Nueva Ventanas y Central Campiche) tienen programado su cierre a 2025 (ver Tabla 9-1).

Fuente: PDA Concón, Quintero y Puchuncaví (D.S. N°105/2018).

El PDA de la Región Metropolitana incluye un capítulo de control de emisiones de fuentes estacionarias, en donde establece límites máximos de emisión para el SO₂ y CO mostrados en la Tabla 8-11, para fuentes estacionarias cuya emisión dependa exclusivamente del combustible utilizado, es decir, en la cual los gases de combustión no contengan materias producto del proceso y deben cumplirse en todas las condiciones de operación de la fuente. Además, el PDA contiene un capítulo de fuentes móviles en el que se establecen límites máximos de emisión de CO provenientes del sistema de escape, para vehículos del transporte público; maquinaria fuera de ruta; vehículos livianos de pasajeros con sello verde o amarillo; vehículos comerciales livianos y medianos año 1999 y posteriores con sello verde o amarillo; vehículos comerciales livianos y medianos año 1998 y anteriores con sello verde. También se establecen límites máximos de emisión de CO para grupos electrógenos nuevos que utilicen motores de combustión interna con encendido por compresión.

Tabla 8-11 Límite de emisión SO₂ y CO para fuentes estacionarias en PDA RM.

Tipo de fuente	Potencia térmica	Límite máximo de emisión de SO ₂ (ng/J)*	Límite máximo de emisión de CO (ppm)
Calderas	$\geq 300 \text{ kWt y } < 1 \text{ MWt}$	20	
	$\geq 1 \text{ MWt}$	10	
Procesos con combustión	$\leq 1 \text{ MWt}$	30	
	$> 1 \text{ MWt}$	20	
Calderas y procesos con combustión	$\geq 1 \text{ MWt}$		100

* Valores referidos al poder calorífico inferior del combustible.

Fuente: PDA Región Metropolitana (D.S. N°31/2016).

Desde la entrada en vigencia del PDA Calama, todos los proyectos o actividades nuevas y la modificación de aquellos existentes que se sometan o deban someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), deben compensar sus emisiones totales anuales en un 120%, directas o indirectas, cuando éstas implican un aumento sobre la situación base²¹ ≥ 50 ton/año en el caso del SO₂. En los PDA de CQP, Región Metropolitana, O'Higgins y Concepción, se

²¹ Se entiende por situación base todas aquellas emisiones atmosféricas existentes en la zona del Plan, previo al ingreso de un proyecto o actividad al SEIA.

establece un sistema de compensación de emisiones de 120% cuando se aumenta sobre la situación base ≥ 10 ton/año, para el caso del SO_2 .

8.2.3 Convergencia entre propuesta de normas y los instrumentos regulatorios revisados

Los instrumentos regulatorios revisados tienen en común que establecen límites de emisión de los contaminantes de interés aplicados a diversas fuentes: termoeléctricas, fundiciones, incineradoras, grupos electrógenos, vehículos, entre otros. Las normas de emisión diferencian entre límites para fuentes nuevas y existentes, siendo más exigentes para estas últimas, lo que refleja un enfoque gradual en la reducción de emisiones y por ende la mejora continua de la calidad del aire. Los PDA también establecen mecanismos de compensación de emisiones, donde se exige que nuevas actividades o modificaciones que incrementen las emisiones sobre ciertos umbrales compensen sus emisiones totales.

La relación emisión-concentración no es lineal, ya que depende de varios procesos y características propias de cada fuente emisora, como el tipo de fuente, el nivel de fondo o *background* del contaminante, condiciones geográficas y meteorológicas de la zona, entre otros. Por lo tanto, no es posible comparar los límites de emisión revisados en los instrumentos regulatorios de manera directa con los niveles de concentración propuestos en la Sección 8.1, con el fin de evaluar su sinergia. Sin embargo, la propuesta de norma complementa los instrumentos regulatorios existentes y genera un mayor compromiso de mejora en la calidad del aire, especialmente en las zonas regidas por PDA, ofreciendo un marco normativo más robusto y específico para el control de emisiones en estas áreas de interés. En ese sentido, la integración de las normas propuestas con los PDA es esencial para establecer un enfoque coherente en la gestión de la calidad del aire, teniendo en cuenta que los PDA proporcionan un contexto regulatorio que considera las particularidades de cada región.

Se podría evaluar la factibilidad de realizar una modelación de dispersión de los contaminantes, considerando los factores ambientales y concentraciones de fondo con el fin de tener un mayor entendimiento de si los valores límites de concentración de las normas propuestas vendrían a ser más exigentes que lo que se regula actualmente en el país. Sin perjuicio de lo anterior, los PDA contemplan diversas estrategias para reducir la contaminación, tales como la promoción de tecnologías más limpias, incentivos para la modernización de fuentes emisoras y programas de monitoreo y vigilancia ambiental. Estas iniciativas ya están en marcha y podrían facilitar la implementación de las normas propuestas, en el caso de que fuera factible una actualización de las mismas.

8.3 Diagnóstico del cumplimiento de los nuevos escenarios normativos

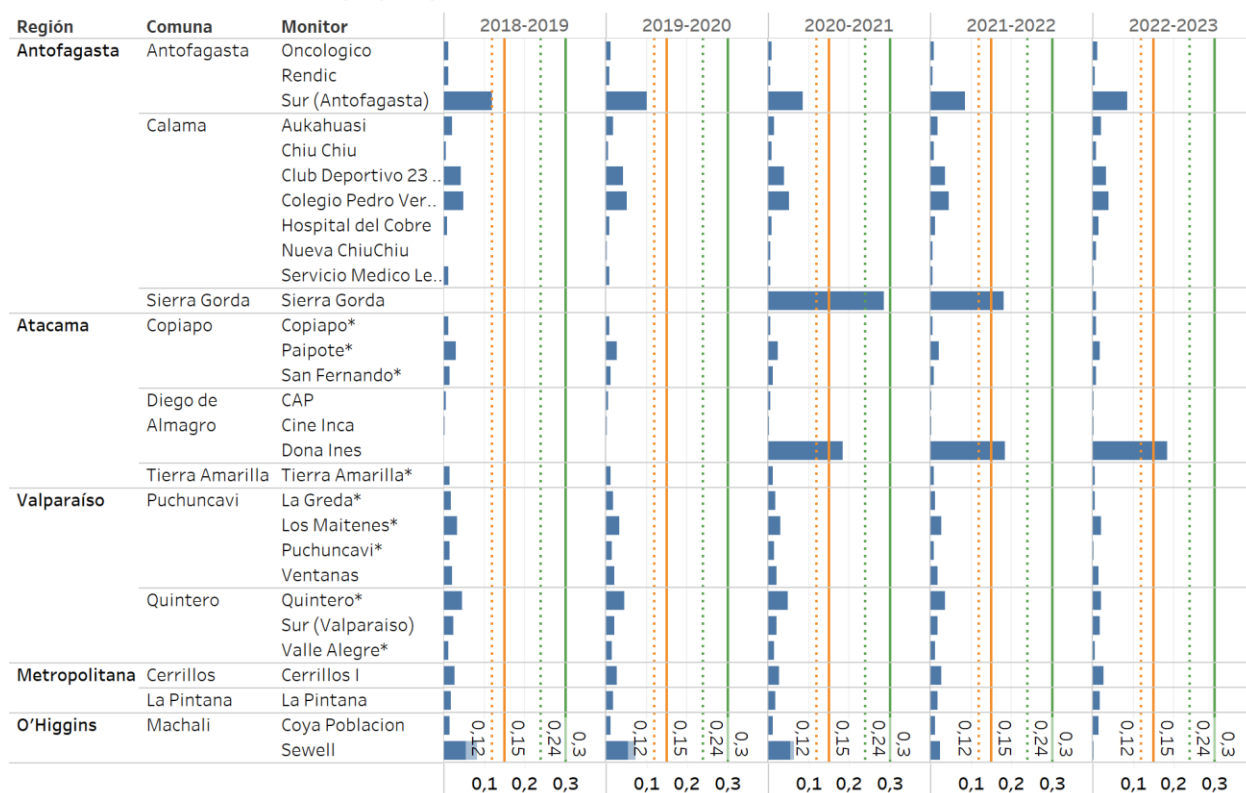
En la Sección 5.3 se realizó un diagnóstico de la calidad del aire por medio de un análisis de cumplimiento normativo respecto a la norma vigente. Con la misma base de datos utilizada en dicho análisis se procedió a analizar el cumplimiento de escenarios normativos propuestos para el periodo 2019-2023, además de estimar la cantidad de episodios de emergencia ambiental que estos ocasionarían.

8.3.1 Plomo

A continuación, se muestra el cumplimiento normativo respecto a las dos normas anuales propuestas. La Figura 8-1 muestra el promedio bianual para las concentraciones anuales de plomo por estación de monitoreo. La línea verde hace referencia a la primera propuesta de norma ($0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que la línea naranja corresponde a la segunda propuesta de norma ($0,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Las líneas punteadas indican los valores que determinan zonas de latencia (superior al 80% de la norma propuesta) para cada escenario normativo.

Se logra observar que para el escenario de propuesta 1, la comuna de Sierra Gorda en la Región de Antofagasta resultaría ser una zona de latencia durante el año 2021. A pesar de esto, los promedios en general se mantienen muy por debajo de la norma propuesta. Por otro lado, para el escenario de propuesta 2 se aprecia que las comunas de Sierra Gorda y Diego de Almagro serían zonas saturadas durante los años 2021 y 2022, aunque para el año 2023 la concentración promedio para Sierra Gorda disminuye significativamente, mientras que Diego de Almagro continuaría siendo zona de latencia. Se debe destacar también la estación Sur en la comuna de Antofagasta, que durante el año 2019 promedió una concentración que clasifica a la comuna como zona de latencia para la propuesta 2. De todas las estaciones de monitoreo mencionadas anteriormente, ninguna cuenta con representatividad poblacional para el plomo, y Sierra Gorda resultó ser una zona de interés a partir del diagnóstico de la calidad del aire (Sección 5.3.5).

Promedio bianual de Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



* Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional.

Figura 8-1 Análisis de cumplimiento de propuestas de norma anual para plomo.

Fuente: Elaboración propia a partir de información proporcionada por la SMA.

8.3.2 Dióxido de azufre

Las propuestas de norma primaria para SO_2 consideran concentraciones horarias, diarias y anuales. La Figura 8-2 muestra el promedio trianual para el percentil 99 de las concentraciones horarias de SO_2 por estación de monitoreo. La línea verde hace referencia a la primera propuesta de norma ($250 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que la línea naranja corresponde a la segunda propuesta de norma ($197 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Las líneas punteadas indican los valores que determinan zonas de latencia para cada escenario normativo.

Se observa que, para el primer escenario normativo de 1 hora, las comunas de Catemu y Puchuncaví serían zonas saturadas en base a los registros de las estaciones Santa Margarita y Campiche, respectivamente, durante todo el periodo analizado (2019-2023). Respecto al segundo escenario normativo, la situación se repite para estas comunas, sumándose además la comuna de Panquehue como zona de latencia para el periodo 2022-2023 a partir de los registros de la estación Lo Campo. De las estaciones monitoras mencionadas, Santa Margarita y Lo Campo cuentan con representatividad poblacional.

La Figura 8-3 muestra el promedio trianual para el percentil 99 de las concentraciones diarias de SO₂ por estación de monitoreo. Se indica en color verde la propuesta de norma 1 (125 µg/m³) y en naranja la propuesta de norma 2 (40 µg/m³). En líneas punteadas se indican los valores que determinan zonas de latencia para cada escenario normativo. En este caso, para la propuesta 1 de 24 horas queda en evidencia que Puchuncaví sería zona de latencia durante el 2019, y desde el 2020 en adelante corresponde a una zona saturada, según registros de la estación Campiche. Por otro lado, Catemu sería zona saturada en el año 2019 y desde el 2020 hasta el 2021 corresponde a una zona de latencia, en base a registros de la estación Santa Margarita (EMRP).

Respecto a la propuesta 2 de escenario normativo de 24 horas, son varias las comunas que resultarían como zona de latencia o saturada, por lo que se resumen los resultados en la Tabla 8-12. Se observa que Catemu, Concón, Puchuncaví, Independencia, Curanilahue y Hualpén son comunas que durante todo el periodo analizado representarían zonas saturadas para la propuesta de norma, y de las cuales solamente las cuatro primeras cuentan con estaciones de monitoreo con representatividad poblacional.

Tabla 8-12 Zonas saturadas y de latencia para propuesta 2 de norma primaria 24 horas SO₂.

Región	Comuna	Año				
		2019	2020	2021	2022	2023
Antofagasta	Tocopilla	Saturada	Saturada	Saturada	Latencia	Latencia
Valparaíso	Catemu ⁽¹⁾	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	Concón ⁽¹⁾	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	Panquehue ⁽¹⁾	Saturada	Latencia	Latencia	Latencia	Latencia
	Puchuncaví ⁽¹⁾	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	Quillota				Saturada	Saturada
	Quintero ⁽¹⁾	Latencia	Latencia	Saturada	Saturada	Saturada
Metropolitana	Independencia ⁽¹⁾	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	Quilicura				Latencia	Latencia
Ñuble	Quillón		Latencia	Saturada	Saturada	Saturada
Biobío	Coronel					Saturada
	Curanilahue	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	Hualpén	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	Talcahuano			Latencia		

(1): La comuna posee estaciones con representatividad poblacional.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 8-4 muestra el promedio trianual de las concentraciones anuales de SO₂ por estación de monitoreo. Se indica en color verde la propuesta 1 de norma primaria anual (50 µg/m³) y en naranja la propuesta 2 de norma primaria anual (20 µg/m³). En líneas punteadas se indican los valores que determinan zonas de latencia para cada escenario normativo. Para la propuesta de norma secundaria anual, se proponen los mismos valores de los escenarios normativos que la propuesta de norma primaria, por lo que el siguiente análisis sirve para ambas normativas.

Para la propuesta 1 se observa que, en todo el periodo analizado, Catemu sería una zona saturada, pero solamente durante el año 2019, ya que a partir del 2020 hasta el 2022 se consideraría una zona de latencia. Durante el 2023 se observa que la comuna de Independencia resultaría ser una zona de latencia. Ambas comunas cuentan con estaciones de monitoreo con representatividad poblacional.

Respecto a la propuesta 2 de escenario normativo anual, nuevamente se da que son varias las comunas que resultarían como zona de latencia o saturada, por lo que se resumen los resultados en la Tabla 8-13. Se observa que Catemu, Puchuncaví, Independencia y Curanilahue son comunas que durante todo el periodo analizado representarían zonas saturadas para la propuesta de norma. Catemu, Puchuncaví e Independencia poseen estaciones EMRP, mientras que solo Puchuncaví posee también EMRRN.

Tabla 8-13 Zonas saturadas y de latencia para propuesta 2 de norma anual SO₂ (Prim y Sec).

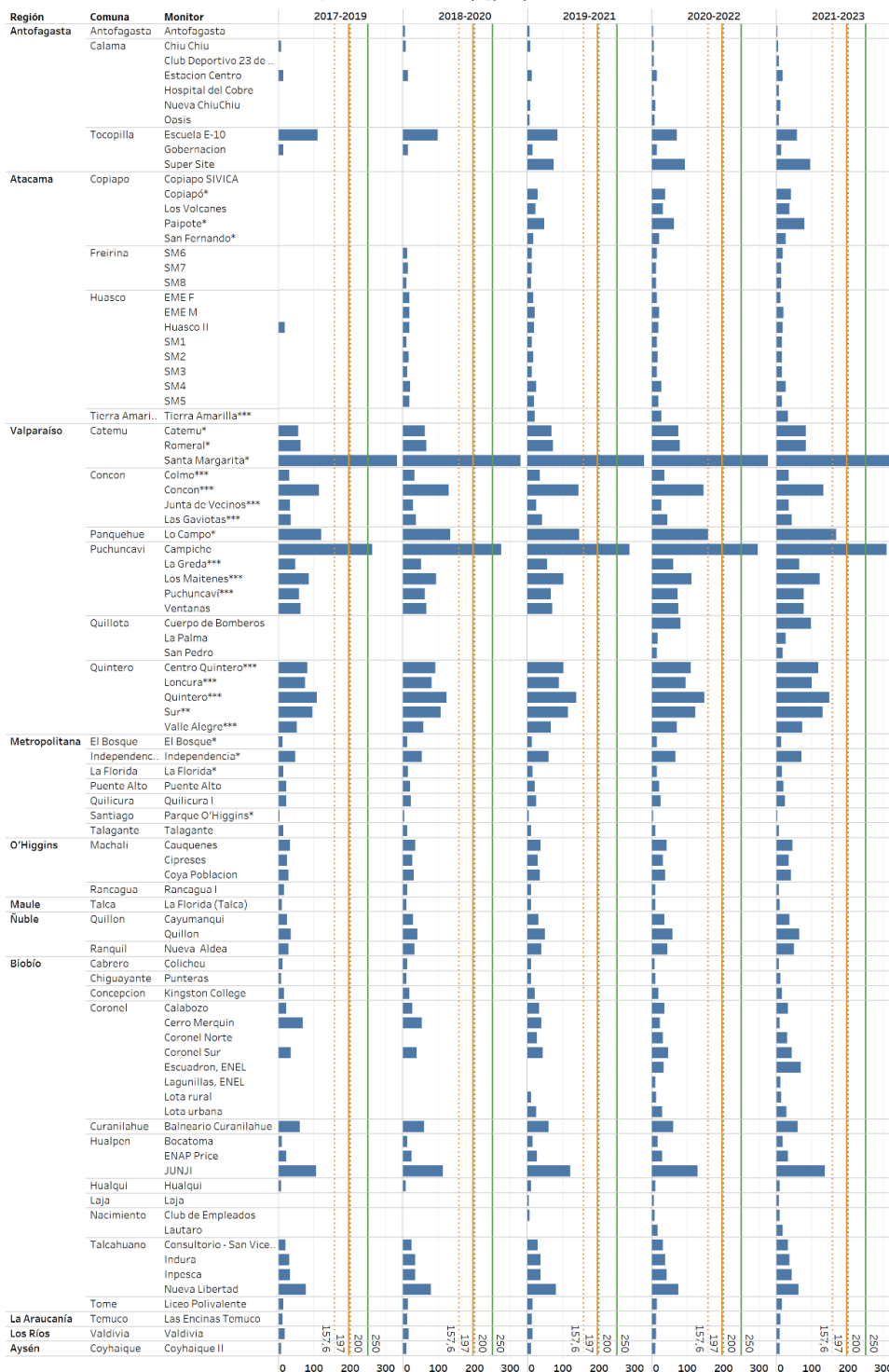
Región	Comuna	Año				
		2019	2020	2021	2022	2023
Valparaíso	Catemu ⁽¹⁾	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	Panquehue ⁽¹⁾	Latencia	Latencia			
	Puchuncaví ⁽²⁾	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	Quillota				Saturada	Saturada
Metropolitana	Independencia ⁽¹⁾	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	Quilicura			Latencia	Latencia	Saturada
Ñuble	Ranquil					Latencia
Biobío	Curanilahue	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada

(1): La comuna posee estaciones con representatividad poblacional.

(2): La comuna posee estaciones con representatividad poblacional y de recursos naturales.

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a las propuestas de norma secundaria de 24 horas para SO₂, para ambas propuestas se establece un mismo valor, que corresponde a 150 µg/m³. La Figura 8-5 muestra el promedio trianual para el percentil 99,7 de las concentraciones diarias de SO₂ por estación de monitoreo. Se logra observar que la comuna de Puchuncaví (que posee EMRRN) sería una zona de latencia durante el 2019 y 2020, para luego pasar a ser una zona saturada a partir del año 2021 en adelante. Por otro lado, Catemu también resultaría ser una zona de latencia durante el 2020 y 2021, sin embargo, no cuenta con EMRRN.

P.99 concentraciones horarias de SO₂, promedio trianual (µg/m³)


* Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional.

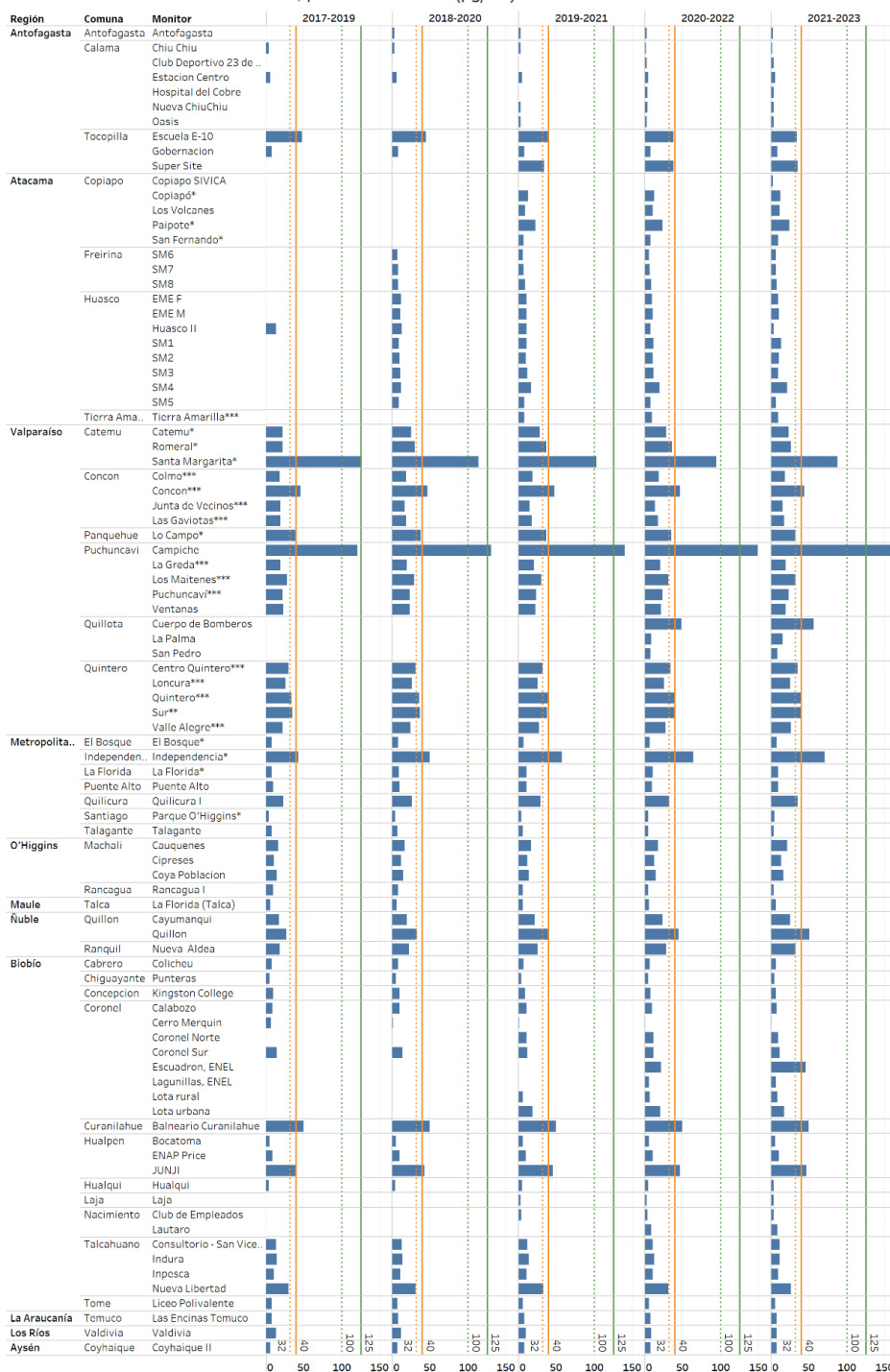
** Corresponde a una estación monitora con representatividad de recursos naturales.

*** Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional y también con representatividad de recursos naturales.

Figura 8-2 Análisis de cumplimiento de propuestas de norma horaria para SO₂.

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

P.99 concentraciones diarias de SO₂, promedio trianual (µg/m³)



* Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional.

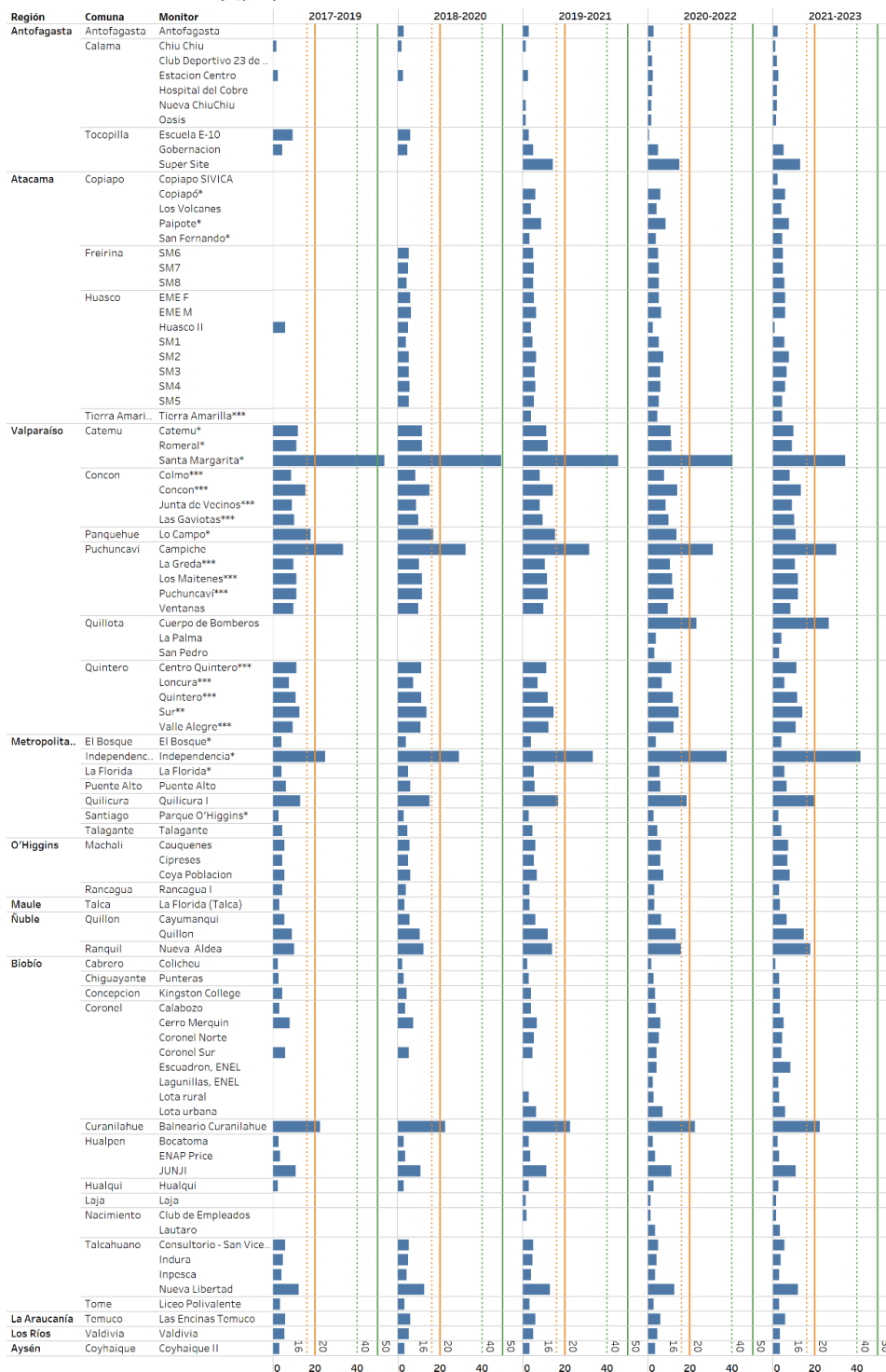
** Corresponde a una estación monitora con representatividad de recursos naturales.

*** Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional y también con representatividad de recursos naturales.

Figura 8-3 Análisis de cumplimiento de propuestas de norma diaria para SO₂.

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

Promedio trianual de SO₂ (µg/m³)



* Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional.

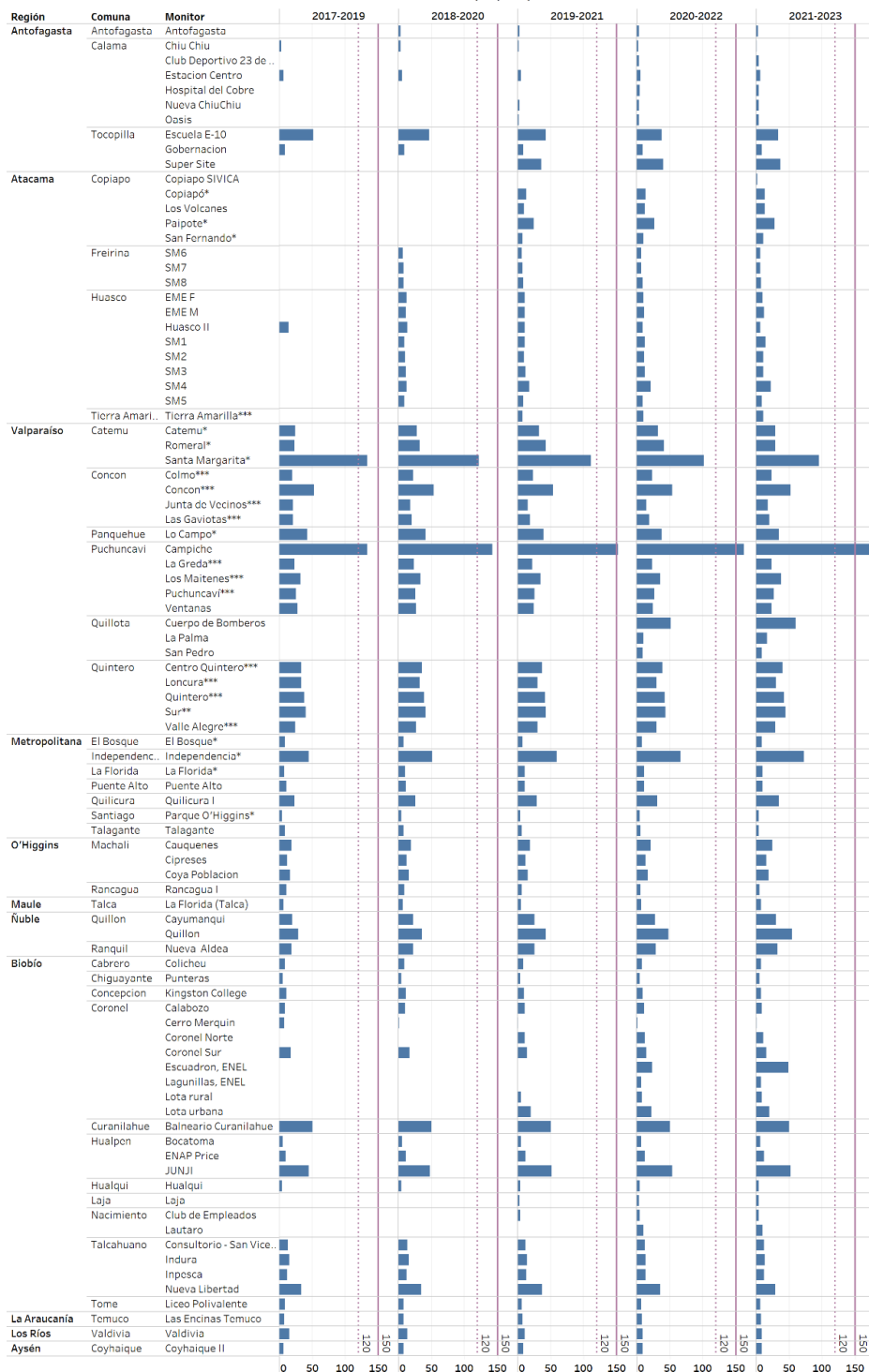
** Corresponde a una estación monitora con representatividad de recursos naturales.

*** Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional y también con representatividad de recursos naturales.

Figura 8-4 Análisis de cumplimiento de propuestas de norma anual para SO₂.

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

P.99,7 concentraciones diarias de SO₂, promedio trianual (µg/m³)



* Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional.

** Corresponde a una estación monitora con representatividad de recursos naturales.

*** Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional y también con representatividad de recursos naturales.

Figura 8-5 Análisis de cumplimiento de propuesta de norma secundaria 24h para SO₂.

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

En la Tabla 8-14 se muestra a modo de ejercicio, la cantidad de episodios de emergencia ambiental por SO₂ para el periodo 2019 a 2023, según los valores propuestos en la Tabla 8-2 que corresponden a la métrica de 1 hora. Se observa que todos los episodios de emergencia ambiental solo ocurren en la región de Valparaíso. Para el escenario normativo 1, se dan episodios de alerta durante el periodo 2021-2023, pero solo un episodio de pre-emergencia ambiental durante el año 2023. Respecto al escenario normativo 2, se dan episodios de alerta en Valparaíso durante todo el periodo analizado, siendo el año 2019 con mayor cantidad de episodios. En cambio, para la propuesta 2 solo se observan episodios de pre-emergencia ambiental durante el 2021 y 2023. No se encontraron episodios de nivel de emergencia para ninguno de los escenarios normativos.

Tabla 8-14 Cantidad de episodios de emergencia ambiental para SO₂ por región (2019-2023).

Escenario	Episodio	Región	Año				
			2019	2020	2021	2022	2023
Propuesta 1	Alerta	Antofagasta	0	0	0	0	0
		Atacama	0	0	0	0	0
		Valparaíso	0	0	4	1	1
		Metropolitana	0	0	0	0	0
		O'Higgins	0	0	0	0	0
		Maule	0	0	0	0	0
		Biobío	0	0	0	0	0
		Los Ríos	0	0	0	0	0
		Aysén	0	0	0	0	0
	Pre-emergencia	Antofagasta	0	0	0	0	0
		Atacama	0	0	0	0	0
		Valparaíso	0	0	0	0	1
		Metropolitana	0	0	0	0	0
		O'Higgins	0	0	0	0	0
		Maule	0	0	0	0	0
		Biobío	0	0	0	0	0
		Los Ríos	0	0	0	0	0
		Aysén	0	0	0	0	0
	Emergencia	Antofagasta	0	0	0	0	0
		Atacama	0	0	0	0	0
		Valparaíso	0	0	0	0	0
		Metropolitana	0	0	0	0	0
		O'Higgins	0	0	0	0	0
		Maule	0	0	0	0	0
		Biobío	0	0	0	0	0
		Los Ríos	0	0	0	0	0
		Aysén	0	0	0	0	0
Propuesta 2	Alerta	Antofagasta	0	0	0	0	0
		Atacama	0	0	0	0	0
		Valparaíso	30	12	24	7	8
		Metropolitana	0	0	0	0	0
		O'Higgins	0	0	0	0	0
		Maule	0	0	0	0	0

	Pre-emergencia	Biobío	0	0	0	0	0
		Los Ríos	0	0	0	0	0
		Aysén	0	0	0	0	0
		Antofagasta	0	0	0	0	0
		Atacama	0	0	0	0	0
		Valparaíso	0	0	2	0	1
		Metropolitana	0	0	0	0	0
		O'Higgins	0	0	0	0	0
		Maule	0	0	0	0	0
		Biobío	0	0	0	0	0
	Emergencia	Los Ríos	0	0	0	0	0
		Aysén	0	0	0	0	0
		Antofagasta	0	0	0	0	0
		Atacama	0	0	0	0	0
		Valparaíso	0	0	0	0	0
		Metropolitana	0	0	0	0	0
		O'Higgins	0	0	0	0	0
		Maule	0	0	0	0	0
		Biobío	0	0	0	0	0
		Los Ríos	0	0	0	0	0
		Aysén	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

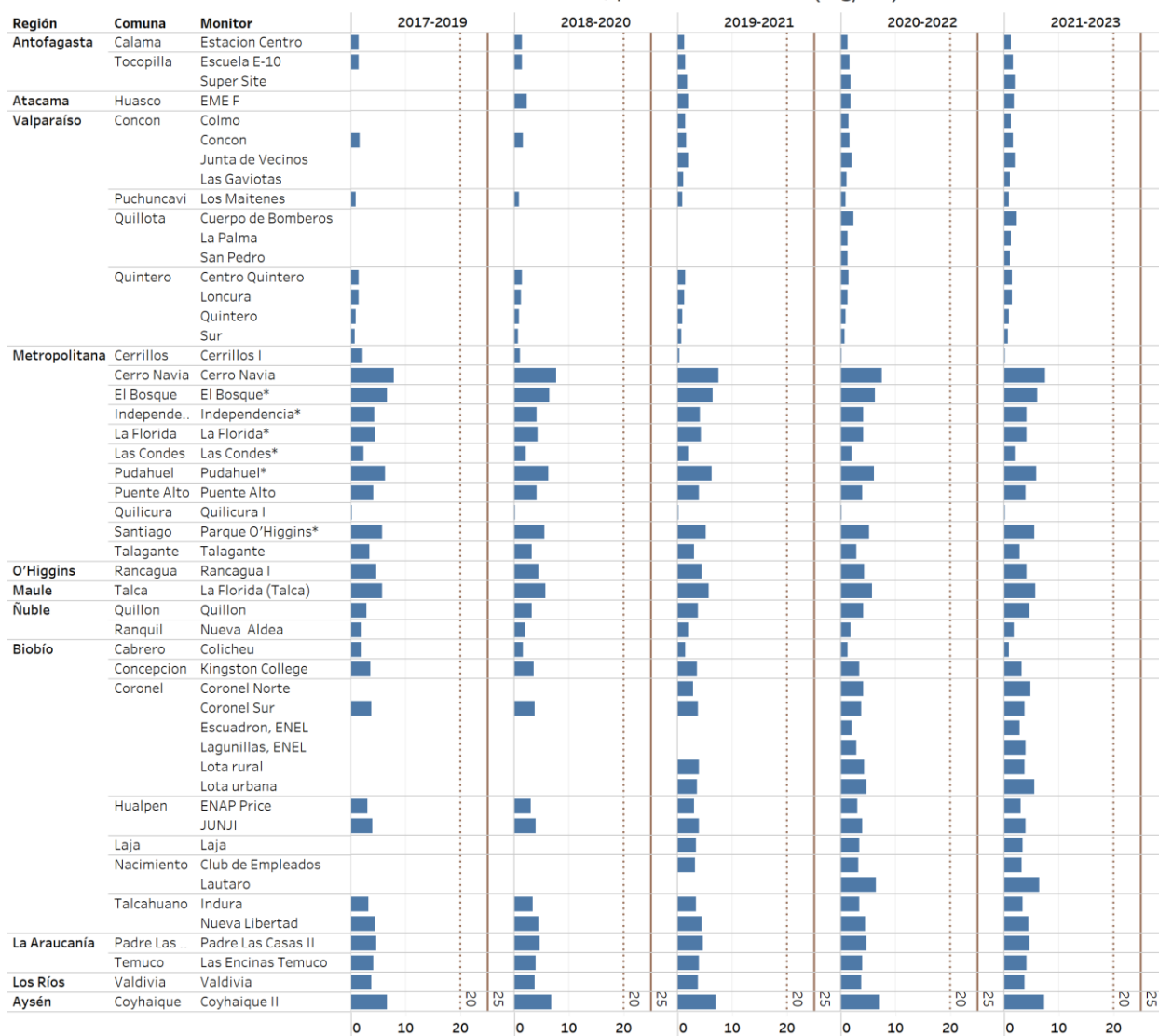
8.3.3 Monóxido de carbono

En el caso del CO los escenarios propuestos incluyen la métrica de 1 hora y 24 horas. La Figura 8-6 muestra el promedio trianual para el percentil 99 de los máximos diarios de las concentraciones horarias de CO por estación de monitoreo. Se incluye una línea café con la propuesta 1 de norma horaria (25 mg/m³), ya que la propuesta 2 no contempla un valor para esta métrica. Se observa que, durante todo el periodo analizado, no habrían zonas saturadas ni de latencia para el escenario normativo 1.

Respecto a la propuesta de 24 horas, en la Figura 8-7 se muestra el promedio trianual para el percentil 99 de las concentraciones diarias de CO por estación de monitoreo. Se indica en color verde la propuesta de norma 1 (7 mg/m³) y en naranja la propuesta de norma 2 (4 mg/m³). En líneas punteadas se indican los valores que determinan zonas de latencia para cada escenario normativo. Se observa que para la propuesta 1 no habrían zonas saturadas ni de latencia, sin embargo, para la propuesta 2 se obtendrían varias zonas de latencia: Cerro Navia y Coyhaique durante todo el periodo analizado, y Coronel durante los años 2021-2022. Sin embargo, ninguna de estas comunas cuenta con EMRP.

Al realizar el análisis de la cantidad de episodios de emergencia ambiental que se obtendría para las propuestas de norma, según los valores propuestos en la Tabla 8-2 que corresponden a la métrica de 1 hora, no se encontró ningún episodio durante el periodo 2019-2023.

P.99 máximos diarios de concentraciones horarias de CO, promedio trianual (mg/m³)

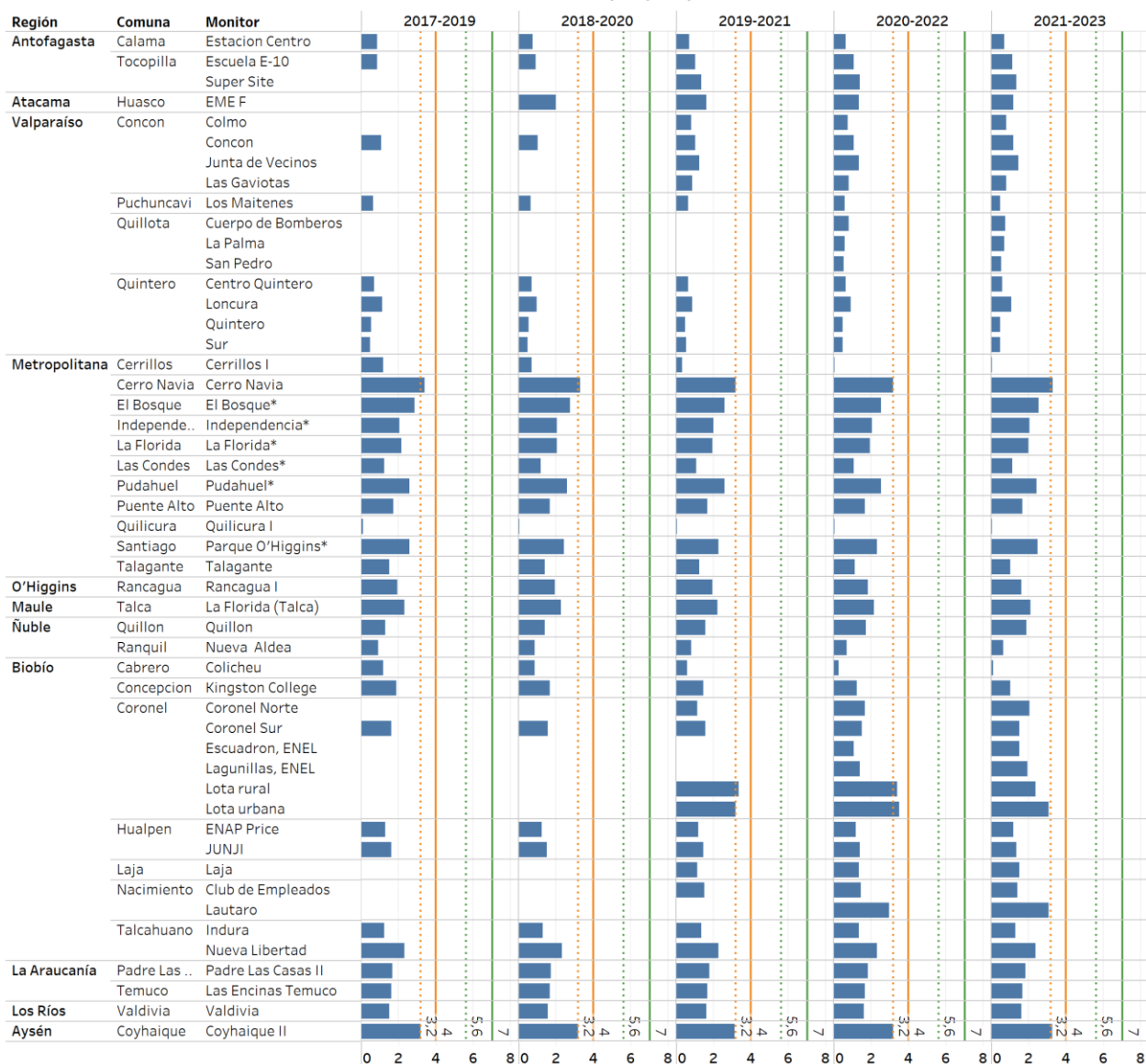


* Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional.

Figura 8-6 Análisis de cumplimiento de propuesta de norma horaria para CO.

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

P.99 concentraciones diarias de CO, promedio trianual (mg/m³)



* Corresponde a una estación monitorea con representatividad poblacional.

Figura 8-7 Análisis de cumplimiento de propuestas de norma diaria para CO.

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

8.3.4 Ozono

Los escenarios de norma propuestos para el O₃ consideran las concentraciones máximas de 8 horas. La Figura 8-8 muestra el promedio trianual para el percentil 99 de los máximos diarios de las concentraciones octohorarias de O₃ por estación de monitoreo. La línea verde hace referencia a la primera propuesta de norma (100 µg/m³), mientras que la línea naranja corresponde a la segunda propuesta de norma (60 µg/m³). Las líneas punteadas indican los valores que determinan zonas de latencia para cada escenario normativo.

Se observarían varias zonas de latencia o saturadas para las propuestas de escenarios normativos, sin embargo, destaca la Región Metropolitana por sobre las demás ya que cuenta con varias estaciones de monitoreo con representatividad poblacional para el O₃, y representaría una zona saturada para ambos escenarios de normas durante todo el periodo analizado.

La Tabla 8-15 muestra un resumen de las zonas saturadas y de latencia para la propuesta 1 de norma de 8 horas para el O₃. Se observa que la región de O'Higgins durante todo el periodo resultaría zona saturada en base a las dos comunas que miden este contaminante: Rengo y San Fernando. Los Andes (Región de Valparaíso) y Quillón (Región de Ñuble) serían zonas saturadas desde el 2020 en adelante. Por otro lado, se ve que la Región del Biobío presentaría varias comunas como zona de latencia durante el periodo.

Tabla 8-15 Resumen zonas saturadas y de latencia para propuesta 1 de norma O₃.

Región	Comuna	Año				
		2019	2020	2021	2022	2023
Antofagasta	Calama	Saturada	Latencia	Latencia	Latencia	Saturada
Atacama	Huasco				Latencia	Saturada
Valparaíso	Los Andes		Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	Concón		Latencia	Latencia	Latencia	
	Quillota				Latencia	
Metropolitana	Varias	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
O'Higgins	Rengo	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	San Fernando	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
Maule	Talca					Latencia
Ñuble	Quillón	Latencia	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	Ranquil	Latencia	Latencia	Saturada	Saturada	Saturada
Biobío	Cabrero	Latencia	Latencia	Latencia		
	Coronel					Latencia
	Laja			Latencia	Latencia	Latencia
	Nacimiento			Latencia	Latencia	Latencia
	Talcahuano				Latencia	Latencia

Fuente: Elaboración propia.

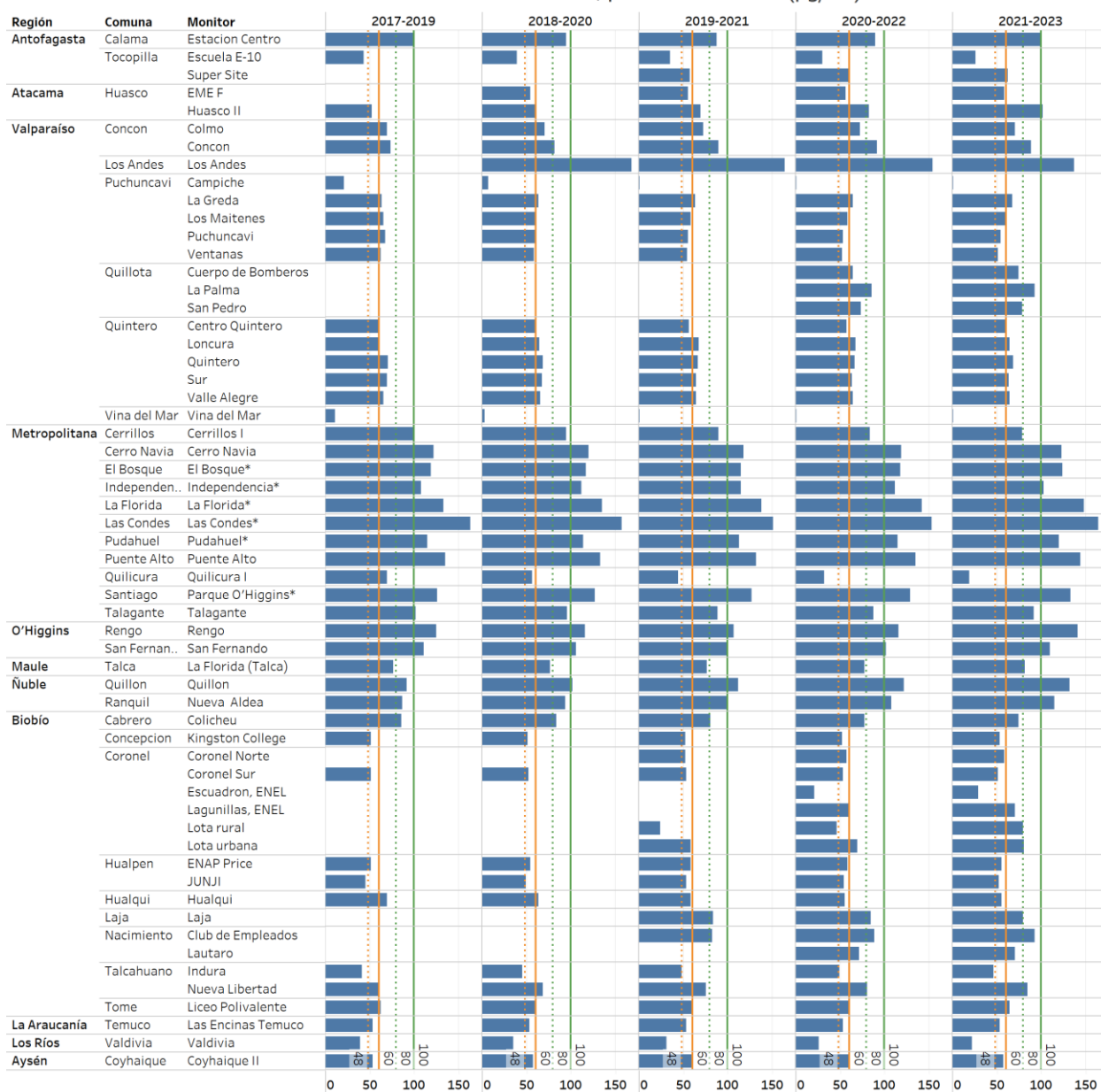
La Tabla 8-16 muestra un resumen de las zonas saturadas y de latencia para la propuesta 2 de norma de 8 horas para el O₃. Como esta propuesta es más exigente que la propuesta 1, todas las zonas de latencia en la tabla anterior pasarían a ser saturadas en este análisis, y además se agregan nuevas zonas. Se observan varias regiones donde todas las comunas que miden O₃ resultan zonas de interés en todo el periodo: Valparaíso (Los Andes, Concón, Quintero, Puchuncaví, Quillota); O'Higgins (Rengo, San Fernando); Maule (Talca), Ñuble (Quillón, Ranquil) y Biobío (Cabrero, Laja, Nacimiento, Talcahuano, Tomé). Además, destaca Calama como zona saturada durante todo el periodo de análisis.

Tabla 8-16 Resumen zonas saturadas y de latencia para propuesta 2 de norma O₃.

Región	Comuna	Año				
		2019	2020	2021	2022	2023
Antofagasta	Calama	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	Tocopilla			Latencia	Saturada	Saturada
Atacama	Huasco	Latencia	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
Valparaíso	Los Andes		Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	Quintero	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	Concón	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	Puchuncaví	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	Quillota				Saturada	Saturada
Metropolitana	Varias	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
O'Higgins	Rengo	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	San Fernando	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
Maule	Talca	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
Ñuble	Quillón	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	Ranquil	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
Biobío	Cabrero	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	Concepción	Latencia	Latencia	Latencia	Latencia	Latencia
	Coronel	Latencia	Latencia	Latencia	Saturada	Saturada
	Hualpén	Latencia	Latencia	Latencia	Latencia	Latencia
	Hualqui	Saturada	Saturada	Latencia	Latencia	Latencia
	Laja			Saturada	Saturada	Saturada
	Nacimiento			Saturada	Saturada	Saturada
	Talcahuano	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
	Tome	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada	Saturada
La Araucanía	Temuco	Latencia	Latencia	Latencia	Latencia	Latencia
Aysén	Coyhaique	Latencia	Latencia	Saturada	Saturada	Latencia

Fuente: Elaboración propia.

P.99 máximos diarios de concentraciones octohorarias de O₃, promedio trianual (µg/m³)



* Corresponde a una estación monitora con representatividad poblacional.

Figura 8-8 Análisis de cumplimiento de propuestas de norma octohoraria para O₃.

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

En la Tabla 8-17 se muestra la cantidad de episodios de emergencia ambiental por O₃ para el periodo 2019 a 2023, según los valores propuestos en la Tabla 8-2 que corresponden a la métrica de 8 horas. Para el escenario normativo 1, se obtuvieron episodios de alerta ambiental para las regiones de Antofagasta, Valparaíso, O'Higgins y Metropolitana, siendo esta última la que cuenta con más episodios y cubren todo el periodo analizado, mientras que en O'Higgins y Antofagasta

se dan durante los últimos años analizados. No se observan episodios de pre-emergencia o emergencia ambiental para este escenario normativo.

Respecto a la propuesta de norma 2, se observan episodios de alerta en todas las regiones que miden ozono, aunque no con la misma frecuencia. Las regiones que presentan alertas ambientales durante todo el periodo son Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins, Maule y Biobío, concentrándose la mayor cantidad en las primeras tres regiones mencionadas. Estas mismas tres regiones son las que presentarían también episodios de pre-emergencia ambiental. No se observan episodios de emergencia ambiental para este escenario normativo.

Tabla 8-17 Cantidad de episodios de emergencia ambiental para O₃ por región (2019-2023).

Escenario	Episodio	Región	Año				
			2019	2020	2021	2022	2023
Propuesta 1	Alerta	Antofagasta	0	0	0	0	3
		Atacama	0	0	0	0	0
		Valparaíso	49	50	8	0	4
		Metropolitana	22	16	19	8	129
		O'Higgins	0	0	0	1	36
		Maule	0	0	0	0	0
		Biobío	0	0	0	0	0
		Aysén	0	0	0	0	0
	Pre-emergencia	Antofagasta	0	0	0	0	0
		Atacama	0	0	0	0	0
		Valparaíso	0	0	0	0	0
		Metropolitana	0	0	0	0	0
		O'Higgins	0	0	0	0	0
		Maule	0	0	0	0	0
		Biobío	0	0	0	0	0
		Aysén	0	0	0	0	0
	Emergencia	Antofagasta	0	0	0	0	0
		Atacama	0	0	0	0	0
		Valparaíso	0	0	0	0	0
		Metropolitana	0	0	0	0	0
		O'Higgins	0	0	0	0	0
		Maule	0	0	0	0	0
		Biobío	0	0	0	0	0
		Aysén	0	0	0	0	0
Propuesta 2	Alerta	Antofagasta	54	19	0	12	154
		Atacama	0	0	0	1	0
		Valparaíso	221	274	202	158	170
		Metropolitana	807	926	795	781	806
		O'Higgins	31	32	42	134	174
		Maule	3	1	4	2	11
		Biobío	2	19	49	33	106
		Aysén	0	1	0	0	0
	Pre-emergencia	Antofagasta	0	0	0	0	0
		Atacama	0	0	0	0	0

		Valparaíso	5	7	1	0	0
		Metropolitana	2	0	0	0	33
		O'Higgins	0	0	0	0	12
		Maule	0	0	0	0	0
		Biobío	0	0	0	0	0
		Aysén	0	0	0	0	0
	Emergencia	Antofagasta	0	0	0	0	0
		Atacama	0	0	0	0	0
		Valparaíso	0	0	0	0	0
		Metropolitana	0	0	0	0	0
		O'Higgins	0	0	0	0	0
		Maule	0	0	0	0	0
		Biobío	0	0	0	0	0
		Aysén	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

8.3.5 Análisis en zonas de interés

A continuación, se muestra un análisis más detallado de los episodios de emergencia ambiental para los escenarios propuestos de normas en las zonas de interés. Con el fin de mostrar los resultados de manera más resumida, en las tablas solo se muestran los episodios de emergencia ambiental y zonas de interés en que se obtuvieron resultados, es decir, si no se observa alguna zona de interés de las mostradas en la Sección 5.3.5, es porque no presenta episodios durante el periodo analizado.

La Tabla 8-18 muestra la cantidad de episodios de emergencia ambiental para SO₂ en las zonas de interés para este contaminante en que se obtuvieron resultados. Se observa que la única zona de interés en que se encontraron episodios corresponde a la comuna de Catemu, y se registra en la estación Santa Margarita (EMRP). La mayor cantidad de episodios se da para la propuesta 2, para el nivel definido como Alerta.

Tabla 8-18 Cantidad de episodios de emergencia ambiental para SO₂ en zonas de interés.

Escenario	Episodio	Región	Comuna	Monitor	Año				
					2019	2020	2021	2022	2023
Propuesta 1	Alerta	Valparaíso	Catemu	Catemu	0	0	0	0	0
				Romeral	0	0	0	0	0
				Santa Margarita	0	0	4	1	1
	Pre-emergencia	Valparaíso	Catemu	Catemu	0	0	0	0	0
				Romeral	0	0	0	0	0
				Santa Margarita	0	0	0	0	1
Propuesta 2	Alerta	Valparaíso	Catemu	Catemu	0	0	0	0	0
				Romeral	0	0	0	0	0
				Santa Margarita	30	12	24	7	8
	Pre-emergencia	Valparaíso	Catemu	Catemu	0	0	0	0	0
				Romeral	0	0	0	0	0
				Santa Margarita	0	0	2	0	1

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

La Tabla 8-19 muestra la cantidad de episodios de emergencia ambiental para O_3 en las zonas de interés para este contaminante en que se obtuvieron resultados. Se observa que para la propuesta de escenario normativo 1, los resultados muestran episodios de alerta ambiental en la Región Metropolitana durante todo el periodo, en Los Andes para casi todos los años excepto 2022, y en O'Higgins solo se observa para los últimos dos años.

Respecto al escenario normativo 2, se registran alertas ambientales para todo el periodo analizado en Los Andes, Quillota, todas las zonas de interés en la Región Metropolitana y todas las de O'Higgins. Las comunas donde históricamente se registran más alertas, son Los Andes y La Florida (en la RM). Respecto a los episodios de pre-emergencia ambiental, en la comuna de Los Andes se observan en los primeros años analizados, mientras que para la Región Metropolitana y la de O'Higgins, se dan durante el 2023.

Tabla 8-19 Cantidad de episodios de emergencia ambiental para O₃ en zonas de interés.

Escenario	Episodio	Región	Comuna	Monitor	Año				
					2019	2020	2021	2022	2023
Propuesta 1	Alerta	Valparaíso	Los Andes	Los Andes	49	50	8	0	4
		Metropolitana	Cerro Navia	Cerro Navia	1	0	0	1	4
			El Bosque	El Bosque	0	0	1	0	9
			La Florida	La Florida	0	3	4	3	22
			Las Condes	Las Condes	17	10	11	2	57
			Pudahuel	Pudahuel	0	0	0	0	5
			Puente Alto	Puente Alto	2	2	1	1	17
			Santiago	Parque O'Higgins	1	1	2	1	15
		O'Higgins	Rengo	Rengo		0	0	1	26
			San Fernando	San Fernando	0	0	0	0	10
Propuesta 2	Alerta	Atacama	Huasco	EME F	0	0	0	1	0
		Valparaíso	Concón	Colmo	8	3	0	0	0
				Concón	4	57	57	9	0
			Los Andes	Los Andes	209	211	139	105	124
			Quillota	Cuerpo de Bomberos		0	0	4	5
				La Palma		2	2	39	27
				San Pedro		1	1	1	8
		Metropolitana	Cerro Navia	Cerro Navia	115	66	72	83	81
			El Bosque	El Bosque	53	82	57	74	103
			Independencia	Independencia	72	108	38		
			La Florida	La Florida	113	161	144	149	119
			Las Condes	Las Condes	143	176	151	153	157
			Pudahuel	Pudahuel	52	88	76	85	101
			Puente Alto	Puente Alto	134	114	131	128	154
			Santiago	Parque O'Higgins	108	130	126	109	91
			Talagante	Talagante	17	1			
		O'Higgins	Rengo	Rengo		1	30	89	90
			San Fernando	San Fernando	31	31	12	45	84
	Pre-emergencia	Valparaíso	Los Andes	Los Andes	5	7	1	0	0
		Metropolitana	Cerro Navia	Cerro Navia	0	0	0	0	1
			El Bosque	El Bosque	0	0	0	0	2
			La Florida	La Florida	0	0	0	0	7
			Las Condes	Las Condes	2	0	0	0	13
			Pudahuel	Pudahuel	0	0	0	0	2
			Puente Alto	Puente Alto	0	0	0	0	5
			Santiago	Parque O'Higgins	0	0	0	0	3
			Talagante	Talagante	0	0			
		O'Higgins	Rengo	Rengo		0	0	0	10
			San Fernando	San Fernando	0	0	0	0	2

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

8.4 Recomendación de método de monitoreo, frecuencia y zona de interés para cada contaminante

Para el monitoreo de los contaminantes gaseosos, la sección 4.3 hizo una revisión de las metodologías usadas en la actualidad y las emergentes. De ese análisis se pueden desprender las siguientes recomendaciones sobre los métodos y frecuencias:

- Las normas de calidad del aire exigen métricas basadas en concentraciones horarias para contaminantes gaseosos, por lo tanto, lo adecuado es el uso de técnicas continuas y no discontinuas.
- Para cada contaminante gaseoso regulado existe más de una tecnología de referencia aprobada, las cuales han alcanzado madurez, por lo que se trata de técnicas robustas. Sin embargo, requieren protocolos estrictos de calibración periódica utilizando gases patrones, así como cumplir con los requisitos estándar como la correcta ubicación de los sitios de muestreo y las condiciones de toma de muestras.
- Las tecnologías emergentes, como los sensores de bajo costo, electroquímicos y espectroscópicos avanzados, no están destinadas para el monitoreo de cumplimiento normativo. Estas tecnologías se enfocan más en aplicaciones de corto plazo, barridos exploratorios o detección de gases traza no regulados.

Dado lo anterior, para los contaminantes gaseosos se recomienda mantener las técnicas de monitoreo continuo de referencia ya aprobadas por agencias ambientales de EE.UU. y Europa, que son comercialmente accesibles y han sido utilizadas ampliamente en Chile.

Los sensores de bajo costo podrían emplearse de manera exploratoria para identificar áreas de alta concentración, donde luego se implementaría un monitoreo regulatorio con equipos continuos. Esto es lo que se recomienda para el monitoreo de la NSCA del SO₂ en ecosistemas que son de interés por su valor natural (ver sección 3.4.3), pero no existe información local sobre los niveles de este contaminante. Esto sucede porque directamente no hay monitores de calidad del aire en las comunas donde se localizan dichos ecosistemas, ya que en muchas ocasiones no existe población que podría estar expuesta. En otros casos, las estaciones de monitoreo se encuentran alejadas de los sitios prioritarios o áreas protegidas. Es así como se recomienda evaluar la realización de campañas de monitoreo en los sitios prioritarios o áreas protegidas de las comunas de Mejillones, Diego de Almagro, Arauco, Antofagasta y Atacama. Estas campañas servirían como primer paso para la evaluación de la posterior instalación de estaciones de monitoreo permanentes con medición continua, si se justifica. Con este enfoque se maximiza la cobertura del levantamiento de información para poder contar con una línea de base inicial en los ecosistemas nombrados previamente.

Sobre el monitoreo de Plomo, se propone mantener lo establecido en el D.S. 136/2001 en relación al método de medición gravimétrico de muestreador de bajo, medio o alto volumen equipado con cabezal de MP₁₀. Sin embargo, de acuerdo con el análisis presentado en la sección 7.2, se recomiendan incluir más técnicas de análisis para el cumplimiento normativo. Actualmente, la norma considera sólo el análisis por medio de espectrometría de absorción

atómica. Se sugiere incluir técnicas equivalentes a absorción atómica como la técnica de fluorescencia de rayos X (XRF) y las distintas variantes de Plasma de Acoplamiento Inductivo que ya han sido aplicadas en el país (ICP-OES, ICP-MS). También se podría agregar la técnica PIXE, dado que está disponible comercialmente (en el extranjero). Si bien tiene un alto valor comercial que dificulte su implementación en un laboratorio local, podría ser de todas formas considerada en la norma.

Respecto a las zonas de interés por contaminante, efectivamente hay ciertos lugares de especial atención donde mantener el monitoreo. Estas zonas de interés y la justificación de su elección se mostraron en la Sección 5.3.5 y la posterior Tabla 5-2. En el caso del CO, las concentraciones actuales no superan las normas vigentes, pero se incluye de todas formas el análisis de su comportamiento futuro y en los escenarios de normas propuestas.

Tabla 8-20 Comunas de zonas de interés

Contaminante	Región	Comuna
SO₂ primario y secundario	Antofagasta	Tocopilla
	Atacama	Copiapó
		Tierra Amarilla
	Valparaíso	Puchuncaví
		Catemu
		Quintero
	O'Higgins	Machalí
O₃	Biobío	Coronel
	Atacama	Huasco
	Valparaíso	Los Andes
		Quillota
		Concón
	Metropolitana	Todas
	O'Higgins	Rengo
		San Fernando
Pb	Antofagasta	Sierra Gorda

Fuente: Elaboración propia

8.5 Propuesta de protocolos de fiscalización de las normas

Para el protocolo de fiscalización de las nuevas normas se propone la mantención del sistema de fiscalización actualmente implementado en nuestro país, liderado por la SMA y basado en la operación de la Red SINCA. A continuación, se describe su funcionamiento y se presentan los argumentos que justifican su continuidad.

El marco legal que rige la fiscalización del cumplimiento de las normas de calidad del aire considera los siguientes instrumentos:

- Ley N° 20.417/2010, que crea la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) y define sus facultades y atribuciones en la fiscalización ambiental, incluyendo la capacidad de auditar las estaciones de monitoreo y sancionar incumplimientos a las normativas de calidad del aire.
- Decreto Supremo N° 61/2008 del Ministerio del Medio Ambiente, que establece los requisitos técnicos para las estaciones de monitoreo.
- Planes de Gestión de Episodios Críticos (GEC) incluidos en los Planes de Prevención y Descontaminación Atmosférica, los cuales son activados automáticamente en episodios de altas concentraciones y están regulados por la normativa local en zonas declaradas saturadas o latentes por contaminación y supervisado por la SMA.

Dicha normativa que regula el sistema de fiscalización actual considera las siguientes características clave:

- Monitoreo en tiempo real y validación de datos: La Red SINCA consta de estaciones que miden continuamente los niveles de los contaminantes de interés entre otros. Estas estaciones operan bajo los lineamientos del DS N° 61/2008 comentado previamente y sus resultados obtenidos son validados periódicamente por la SMA para asegurar su confiabilidad. Los monitoreos son publicados de forma continua y de acceso público en la página web del Ministerio de Medio Ambiente.
- Auditorías periódicas y mantenimiento de estaciones: La SMA tiene a su cargo la realización de auditorías técnicas a las estaciones de monitoreo para verificar el cumplimiento de los estándares operativos, asegurando que los equipos estén adecuadamente calibrados y ubicados. Este proceso busca garantizar que las estaciones proporcionen datos precisos.
- Fiscalización basada en reportes de excedencias: Cuando los datos recolectados por la red SINCA muestran niveles de contaminación por encima de los límites normativos, la SMA tiene la facultad de iniciar inspecciones y procesos de fiscalización. Estos incluyen la revisión de los permisos ambientales de las fuentes emisoras y la verificación de las medidas de mitigación implementadas.
- Planes de Gestión de Episodios Críticos (GEC): En situaciones en las que las concentraciones superan los límites establecidos en la norma, los GEC se activan de forma automática gatillando medidas de emergencia, como la restricción de actividades industriales, la limitación de vehículos y la prohibición del uso de calefacción a leña, trabajadas en los respectivos planes de descontaminación, todo bajo la supervisión de la SMA.
- Sanciones por incumplimiento: La SMA cuenta con un marco legal que le permite aplicar sanciones, como multas, suspensiones de operaciones e incluso clausura de instalaciones, cuando se detectan infracciones a las normas de calidad del aire. Este régimen sancionatorio es crucial para asegurar el cumplimiento normativo y fomentar la adopción de prácticas responsables por parte de las fuentes emisoras.

El protocolo de fiscalización actualmente implementado en Chile está bien estructurado y ya se encuentra implementado, lo que presenta ventajas a la hora de mantenerlo con la presente propuesta de actualización de norma. Son los siguientes elementos los que permiten llegar a dicha conclusión:

- Cobertura y monitoreo continuo de la red SINCA
- Facultad de la SMA de auditar y revisar el control de calidad de los datos de la red SINCA
- Respuesta ágil ante episodios críticos a través de la activación de los planes de GEC
- Facultades sancionatorias de la SMA
- Transparencia y acceso público a los datos de la red SINCA

9. Evaluación y cuantificación de los costos asociados a la aplicación y cumplimiento de la normativa y escenarios propuestos, el impacto en los valores de las normas primarias relacionadas, y los beneficios en salud y ambientales, a fin de ser utilizado en estudio de AGIES

9.1 Selección de criterios y enfoques utilizados para la evaluación del impacto económico y social

El impacto de una nueva norma se genera en aquellos lugares donde la concentración proyectada en un horizonte temporal es mayor que el valor de la norma propuesta. Debido a lo anterior, sólo ciertas zonas tendrán costos y beneficios asociados a la reducción de concentraciones. Por otro lado, las reducciones de emisiones que genera una nueva normativa se asumen que comienzan una vez que dicha normativa es publicada en el Diario Oficial.

Considerando los plazos de tramitación de una nueva norma, se considera la reducción de emisiones y sus costos desde el 2026 en adelante. Similarmente, para el caso de los beneficios, se estima la reducción de concentraciones de ese año en adelante. Los inventarios fueron proyectados al 2033 así que la evaluación considera hasta ese año.

En análisis siguiente considera la evaluación de las normas propuestas para el SO₂ y el O₃. Esto ya que las tecnologías existentes asociadas al control de emisiones de CO no reducen directamente este contaminante, sino que su acción es a través de la reducción del MP.

9.1.1 Alcance geográfico de la proyección de las emisiones

La proyección de emisiones se realiza de dos maneras según la condición de las zonas geográficas: zonas con mega fuentes y zonas sin mega fuentes. Las zonas con mega fuentes corresponden a aquellas que presentan fuentes pertenecientes al Plan de Retiro de Centrales Termoeléctricas a carbón (ver Tabla 9-1), por lo que se anticipan reducciones importantes de emisiones para estas zonas. Debido a lo anterior, se proyectaron las emisiones considerando dichas reducciones.

Por otro lado, se considera que las zonas sin mega fuentes no tendrán un cambio futuro significativo en sus emisiones, por lo que en estas zonas se proyectaron las emisiones a partir del registro histórico, asumiendo que la evolución refleja el cambio de la población, de la actividad industrial y del cambio en emisiones unitarias.

Para ambos tipos de zonas no se considera el surgimiento de nuevas mega fuentes (por ejemplo, una eventual nueva fundición), ya que éstas deben someterse al sistema de evaluación de impacto ambiental y se les exigirán medidas con el fin de cumplir la norma. En estricto rigor, una norma más restrictiva impondrá costos a los proyectos futuros en las zonas que pueden estar saturadas, pero el análisis de esas circunstancias va más allá del alcance de este proyecto.

Tabla 9-1 Termoeléctricas del Plan de Retiro de Centrales a Carbón.

Establecimiento	Comuna	Tipo de caldera	Combustible	Año retiro
Central Tarapacá	Iquique	Caldera de Generación Eléctrica	Carbón	2023 ⁽¹⁾
Central Termoeléctrica Angamos	Mejillones	Caldera de Generación Eléctrica	Carbón	2025
Central Termoeléctrica Campiche	Puchuncaví	Caldera de Generación Eléctrica	Carbón	2025
Central Termoeléctrica Nueva Ventanas	Puchuncaví	Caldera de Generación Eléctrica	Carbón	2025
Central Termoeléctrica Nueva Tocopilla	Tocopilla	Caldera de Generación Eléctrica	Carbón	2026
Central Térmica Tocopilla	Tocopilla	Caldera de Generación Eléctrica	Carbón	2023
Central Termoeléctrica Bocamina U1	Coronel	Caldera de Generación Eléctrica	Carbón	2023 ⁽²⁾
Central Termoeléctrica Ventanas Unidades 1 Y 2	Puchuncaví	Caldera de Generación Eléctrica	Carbón	2023
Central Térmica Mejillones	Mejillones	Caldera de Generación Eléctrica	Carbón	2025

(1): Realizó cierre anticipado en diciembre de 2019.

(2): Realizó cierre anticipado en diciembre de 2022.

Fuente: Larraín & Melej (2023)

9.1.2 Inventario maestro de emisiones para las zonas de interés

Para determinar qué fuentes podrían reducir sus emisiones dentro de las zonas de interés, se elaboró un inventario de emisiones para los contaminantes que las llevaron a considerarse “de interés” (ver Tabla 8-20), por medio de la recopilación de inventarios de emisiones de estudios anteriores. En el caso de las zonas de interés para el ozono, se recopilaron las emisiones de NO_x. En la Tabla 9-2 se muestran las fuentes de información recopiladas para cada zona de interés.

Tabla 9-2 Fuentes de información para las emisiones de zonas de interés.

Contaminante	Zona de interés	Comuna	Región	Origen
O₃	Huasco	Huasco	III	PPAHUASCO2 ⁽¹⁾ , RETC (solo difusas y móviles)
	Concón	Concón	V	RETC
	Los Andes	Los Andes	V	RETC
	Quillota	Quillota	V	VALPOIGA ⁽²⁾
	Rengo	Rengo	VI	RETC
	San Fernando	San Fernando	VI	RETC
	Santiago	Todas	M	INDRM ⁽³⁾ , TRANSRM ⁽⁴⁾ , RETC (solo difusas)
SO₂	Tocopilla	Tocopilla	II	RETC
	Copiapó	Copiapó	III	PDACOPAPÓ ⁽⁵⁾ , RETC (solo móviles)
	Copiapó	Tierra Amarilla	III	PDACOPAPÓ ⁽⁵⁾ , RETC (solo móviles)
	Catemu	Catemu	V	VALPOIGA ⁽²⁾
	Puchuncaví	Quintero	V	RETC
	Puchuncaví	Puchuncaví	V	RETC
	Machalí	Machalí	VI	RETC
	Coronel	Coronel	VIII	PDACONCE ⁽⁶⁾ , RETC (solo difusas y móviles)
Pb	Sierra Gorda	Sierra Gorda	II	RETC

(1): Proyecto GreenLab de “Estudio antecedentes para la revisión del plan de prevención de Huasco y revisión de la norma de calidad del aire para material particulado sedimentable en la cuenca del río Huasco”.

(2): Proyecto GreenLab de “Evaluación costo medidas efectivas para diseñar un instrumento de gestión ambiental en la zona interior de la Región de Valparaíso”.

(3): Proyecto GreenLab de “Inventario RMS Industria – Agroindustria”.

(4): Proyecto GreenLab de “Inventario de emisiones sector transporte en la Región Metropolitana”

(5): Proyecto GreenLab de “Antecedentes para elaborar el plan de descontaminación atmosférico de la zona de Copiapó y Tierra Amarilla”.

(6): Proyecto GreenLab de “Mejoramiento de la calidad de la información para la implementación del plan de prevención y descontaminación atmosférica (PPDA) del Concepción Metropolitano”.

Fuente: Elaboración propia

Para ciertas comunas, no se encontró detalle de las emisiones de fuentes móviles por lo que se estimaron a partir de una regla de tres simple, basada en la relación proporcional entre la población (CENSO 2017) y las emisiones totales registradas en una comuna cercana. Esta metodología permitió ajustar las emisiones de acuerdo con la población específica para las siguientes comunas:

- Tocopilla: se estimaron a partir de las emisiones móviles del RETC para Antofagasta
- Puchuncaví: se estimaron a partir de las emisiones móviles del RETC para Quintero
- Tierra Amarilla: se estimaron a partir de las emisiones móviles del RETC para Copiapó
- Huasco: se estimaron a partir de las emisiones móviles del RETC para Copiapó

A continuación, en la Tabla 9-3 se muestra la estructura del inventario maestro generado a partir de la recopilación de los inventarios mostrados en la Tabla 9-2.

Tabla 9-3 Descripción de campos de la base de datos de inventario maestro

Nombre campo	Descripción campo
Zona	Zona de interés
Código	Código de la fuente
Codcomuna	Código de la comuna dentro de la zona de interés
Año	Año de la emisión generada
Clase	Clase de emisión (puntuales, difusas y móviles)
Subclase	Subclase de la emisión (Caldera, Chimenea, Bus, Camión, Incendio forestal...)
Tipo	Detalle de la fuente emisora (Caldera Industrial, Caldera de calefacción...)
Subtipo	Información extra de la fuente emisora
Termoeléctrica	Campo binario (1 si es una termoeléctrica, 0 en caso contrario)
Fundición	Campo binario (1 si es una fundición, 0 en caso contrario)
Programación de emisiones	Campo binario (Definida si la fuente está en el plan de retiro de centrales termoeléctricas, Indefinida si sigue funcionando)
Contaminante	Contaminante emitido
Unidad	Unidad de la emisión generada
Valor	Valor de la emisión generada
Origen	Origen de la información

Fuente: Elaboración propia

De esta forma, se recopilaron las siguientes emisiones en el inventario. En la Tabla 9-4 y Tabla 9-5 se muestran las emisiones de SO₂ por clase, zona y año. En la Tabla 9-6 y Tabla 9-7 se muestran las emisiones de NO_x por clase, zona y año.

Tabla 9-4 Emisiones de SO₂ recopiladas por clase y año

Clase	2017	2018	2019	2020	2021
Difusas	20	12	14	19	15
Móviles	3	189	186	130	225
Puntuales	111.803	120.674	72.841	42.729	71.801
Total	111.826	120.875	73.041	42.878	72.041

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9-5 Emisiones de SO₂ recopiladas por zona y año

Zona	2017	2018	2019	2020	2021
Catemu	8.944	10.282	9.552	4.777	7.958
Copiapó	14.787	19.002	9.590	8.782	6.071
Coronel	4.478	5.221	4.466	3.652	4.221
Machalí	52.934	53.086	25.947	132	29.088
Puchuncaví	15.587	16.252	14.358	14.999	13.581
Tocopilla	5.287	7.869	2.061	1.929	2.609
Total	111.826	120.875	73.041	42.878	72.041

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9-6 Emisiones de NO_x recopiladas por clase y año

Clase	2017	2018	2019	2020	2021
Difusas	14.513	1.273	1.308	1.806	1.708
Puntuales	12.858	14.652	21.518	18.746	21.579
Móviles	28.153	20.189	25.797	19.614	27.811
Total	55.524	36.114	48.623	40.167	51.098

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9-7 Emisiones de NO_x recopiladas por zona y año

Zona	2017	2018	2019	2020	2021
Concón	1.880	2.132	1.764	1.961	2.421
Huasco	3.926	4.769	4.595	4.384	4.406
Los Andes	112	641	810	728	246
Quillota	1.884	1.616	1.724	980	639
Rengo	663	463	236	239	170
San Fernando	126	618	628	687	515
Santiago	46.590	25.875	38.866	31.189	42.701
Total	55.181	36.114	48.623	40.167	51.098

Fuente: Elaboración propia

9.1.3 Proyección de las emisiones

La proyección de las emisiones se realizó solo para fuentes puntuales debido a que las tecnologías de abatimiento recopiladas, y mostradas más adelante en la Sección 9.3, apuntan a este tipo de fuentes para reducir las emisiones. La proyección de emisiones en las zonas sin mega fuentes se realizó con una tasa de crecimiento/decrecimiento anual por zona y considerando como año base las emisiones del RETC 2019 disponible en la Sección 5.4.1

En el caso de la proyección de emisiones para las zonas con mega fuentes se realizó considerando el Plan de Retiro de Centrales Termoeléctricas a carbón, de manera de incorporar el cierre de fuentes emisoras relevantes. En la Tabla 9-1 se mostraron las comunas que participan del Plan. Además, en la Tabla 9-8 se muestra las emisiones para las comunas con mega fuentes. La metodología de proyección se detalla a continuación:

1. Se identificaron las mega fuentes sujetas a retiro futuro. Las emisiones de estas fuentes se proyectaron utilizando como año base el 2021, considerando el retiro de cada fuente de manera que para el periodo entre 2022 y el año de retiro de la mega fuente se estimó la proyección en base al registro histórico. Desde el año de cierre de la mega fuente en adelante, las emisiones se consideraron como cero, asumiendo que la central cerrará según lo estipulado en el Plan.
2. Las emisiones de las que no se consideran en el Plan se proyectaron en base al registro histórico, utilizando como año base el 2021.

3. Para ambos tipos de fuentes (mega fuentes y no mega fuentes), se utilizó como registro histórico de las emisiones de SO₂ el inventario maestro de la Sección 9.1.2.
4. Las emisiones totales para la comuna corresponden a la suma de las emisiones de ambos tipos de fuentes.

En la Tabla 9-8 y Tabla 9-9 se muestra la proyección de emisiones para SO₂ y NO_x respectivamente.

Tabla 9-8 Proyección de emisiones de SO₂ por zona.

Zona	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Catemu	79.773	88.805	97.837	106.869	115.901	124.934	133.966	142.999	152.031	161.064
Copiapó	14.202	15.520	16.838	18.156	19.474	20.798	22.123	23.447	24.771	26.095
Coronel	2.000	2.078	2.163	2.274	2.385	2.496	2.607	2.719	2.830	2.941
Machalí	126	136	146	156	166	176	186	196	206	216
Puchuncaví	14	15	16	18	19	20	22	23	25	26
Tocopilla	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Total	96.116	106.555	117.001	127.473	137.946	148.425	158.904	169.384	179.863	190.342

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9-9 Proyección de emisiones de NO_x para norma de O₃ por zona.

Zona	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Concón	1.965	2.117	2.269	2.421	2.573	2.731	2.890	3.050	3.177	3.118
Huasco	3.243	3.449	3.654	3.860	4.066	4.272	4.478	4.684	4.890	5.096
Los Andes	544	589	633	678	722	767	812	856	901	945
Quillota	699	668	165	159	154	150	147	144	140	137
Rengo	235	246	211	221	231	241	251	261	271	280
San Fernando	453	488	523	558	593	628	663	697	732	767
Santiago	23.749	23.893	21.288	21.302	21.454	21.605	21.757	21.909	22.069	22.251
Total	30.888	31.449	28.743	29.199	29.792	30.394	30.997	31.600	32.179	32.594

Fuente: Elaboración propia.

9.1.4 Reducción de emisiones requerida para cumplir con la norma propuesta

La reducción de emisiones requerida para cumplir con las normas propuestas se obtuvo a nivel de cada zona de interés a partir de la reducción de concentraciones que implica el cumplimiento de cada escenario. A continuación, se describe la metodología empleada.

El primer paso consistió en realizar una la proyección de las concentraciones, ajustando una regresión lineal para cada monitor, contaminante y métrica de la norma (máximo de 1 hora, máximo de 8 horas, media diaria, anual). Esta proyección cubre el horizonte de análisis del 2026 al 2033. Estas concentraciones fueron entonces contrastadas con los niveles de las normas para cada escenario, obteniendo las reducciones requeridas, en términos absolutos ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y en términos porcentuales. A modo de referencia, la Figura 9-1 muestra el comportamiento del monitor Escuadrón Enel ubicado en la comuna de Coronel para los años 2024 a 2033. En ella se distinguen los niveles actuales de las concentraciones de SO_2 , (concentraciones sin control) que superan la norma actual. Por tanto, el cumplimiento de la norma actual requiere de una disminución de concentraciones. Asimismo, los escenarios 1 y 2 requieren de disminuciones adicionales de las concentraciones.

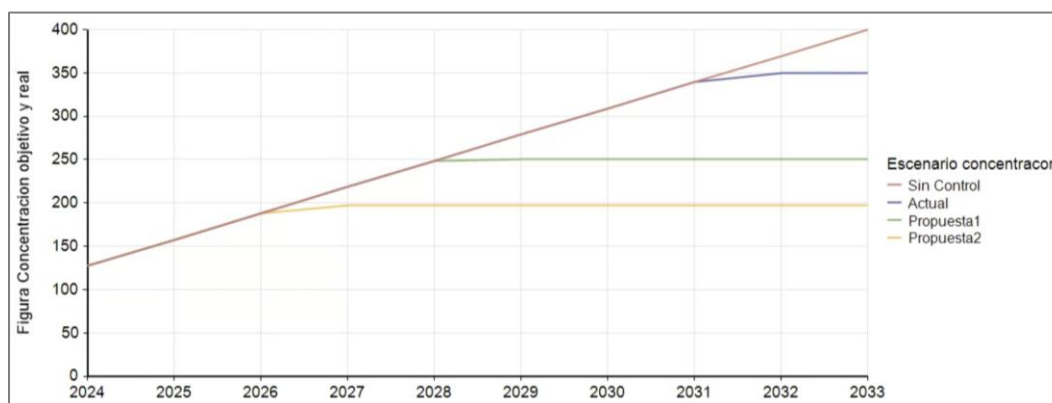


Figura 9-1 Análisis de cumplimiento de propuestas de norma octohoraria para O_3 .

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del SINCA.

La proyección de concentraciones se encuentra detallada para cada año, monitor, contaminante, métrica y escenario normativo, sin embargo, deben agregarse para cada zona para poder enlazarse con las emisiones. Este paso se realizó eligiendo el monitor y la métrica de la norma que fueran más exigentes, es decir, que tuvieran un mayor porcentaje de reducción²². De esta forma, en cada zona se obtiene sólo un porcentaje de reducción para cada año, contaminante y escenario. Si bien se tiene el detalle de las reducciones por escenario, a la hora de elegir las métricas y los monitores que generan dichas reducciones, no dependen del escenario y por tanto

²² Esta metodología supone que la distribución de la frecuencia diaria de concentraciones se mantiene año a año.

son los mismos para el actual, propuesta 1 y propuesta 2. La tabla siguiente muestra cuáles son las métricas consideradas en el análisis posterior realizado a nivel de zona:

Tabla 9-10 Métricas de norma que generan la mayor reducción de concentraciones, por contaminante y zona de interés.

Tipo de norma	Contaminante	Zona	Métrica norma
NPCA	SO ₂	Catemu	max1h
		Copiapó	max1h
		Coronel	media24h
		Machalí	media24h
		Puchuncaví	media24h
		Tocopilla	max1h
	O ₃	Coronel	max8h
		Puchuncaví	max8h
		Santiago	max8h
		Tocopilla	max8h
NSCA	SO ₂	Catemu	media24h
		Copiapó	media24h
		Coronel	media24h
		Machalí	media24h
		Puchuncaví	media24h
		Tocopilla	media24h

Fuente: Elaboración propia a partir de la proyección de concentraciones y los niveles de normas propuestos.

En el caso de la NPCA de SO₂, la métrica más exigente varía de acuerdo con la zona. En Catemu y Copiapó, la norma de 1 h es la más exigente, mientras que en Coronel, Machalí y Puchuncaví es la norma de 24 horas. Dado que dos tipos de métricas aparecen como las más exigentes en distintas zonas, se puede concluir que estas dos normas debieran ser aplicadas para un correcto control de la calidad del aire a nivel nacional.

Para el O₃, el estándar propuesto sólo se basa en el máximo de 8 horas, por lo que no existe comparación de métricas.

Para la NSCA de SO₂, la media de 24 horas es siempre la métrica que genera las mayores restricciones, por lo que sería la recomendable a utilizar en la normativa.

Finalmente, la reducción de emisiones se obtiene a partir de las emisiones base proyectadas y el porcentaje de reducción de concentración requerido en cada zona, tal y como muestra la Ecuación 7:

Ecuación 7 Reducción de emisiones requeridas para el cumplimiento de la norma

$$\Delta E_{n,c}^p = E_{n,c} * \Delta \% C_{n,c}^p$$

Donde $E_{n,c}$ representa las emisiones proyectadas en el año n , del contaminante c , $\Delta \% C_{n,c}^p$ es el porcentaje de reducción de concentraciones para la propuesta de norma p y $\Delta E_{n,c}^p$ son las reducciones de emisiones requeridas para cumplir las normas. Las emisiones proyectadas se encuentran en la Sección 9.1.3.

En la Tabla 9-11 y Tabla 9-12 muestran la reducción de toneladas anuales obtenidas por comuna requeridas para cumplir con cada propuesta de normas, en las zonas de interés. Cabe destacar que para el caso de la norma de O_3 , las emisiones a reducir requeridas se refieren al NO_x .

Tabla 9-11 Reducción requerida de emisiones SO₂ para cada escenario de norma por zona y año

Contaminante	Escenario Norma	Zona	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
SO ₂	Actual	Catemu	-	-	-	-	-	-	-	-
		Copiapó	-	-	-	-	-	-	-	-
		Coronel	-	-	-	-	-	-	-	-
		Machalí	-	-	-	-	-	-	-	-
		Puchuncaví	-	-	-	-	-	-	-	-
		Tocopilla	-	-	-	-	-	-	-	-
		Total reducción requerida Actual	-	-	-	-	-	-	-	-
	Propuesta 1	Catemu	20.455	21.849	23.153	24.367	25.487	26.513	27.442	28.273
		Copiapó	-	-	-	-	-	-	-	823
		Coronel	-	-	-	-	-	-	-	62
		Machalí	-	-	-	-	-	-	-	-
		Puchuncaví	-	-	-	-	-	-	-	-
		Tocopilla	-	-	-	-	-	-	-	-
		Total reducción requerida Propuesta 1	20.455	21.849	23.153	24.367	25.487	26.513	27.442	28.273
	Propuesta 2	Catemu	36.860	39.873	42.816	45.687	48.485	51.208	53.855	56.424
		Copiapó	-	-	-	-	-	2.910	8.389	19.095
		Coronel	810	1.039	1.233	1.410	1.575	1.729	1.877	2.020
		Machalí	-	-	-	-	-	-	-	-
		Puchuncaví	-	-	-	-	-	-	-	-
		Tocopilla	-	-	-	-	-	-	-	-
		Total reducción requerida Propuesta 2	37.670	40.912	44.049	47.097	50.059	52.937	55.732	58.444

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9-12 Reducción requerida de emisiones NO_x para cada escenario de norma de O₃ por zona y año

Contaminante	Escenario Norma	Zona	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
NO _x	Actual	Concón	-	-	-	-	-	-	2	87
		Huasco	784	1.065	1.335	1.596	1.851	2.100	2.343	2.583
		Los Andes	-	-	-	-	-	-	-	-
		Quillota	31	65	92	121	142	156	166	170
		Rengo	68	78	88	97	107	117	127	137
		San Fernando	-	-	-	-	-	-	-	-
		Santiago	6.824	6.994	7.503	8.002	8.493	8.977	9.456	9.937
	Total reducción requerida Actual		7.707	8.202	9.017	9.817	10.593	11.350	12.094	12.915
	Propuesta 1	Concón	33	106	183	266	352	443	537	634
		Huasco	1.262	1.531	1.790	2.042	2.289	2.530	2.768	3.002
		Los Andes	-	-	-	-	-	-	-	-
		Quillota	132	155	172	191	204	211	214	213
		Rengo	100	109	119	129	139	149	159	169
		San Fernando	55	62	69	76	83	91	99	107
		Santiago	9.693	9.865	10.341	10.810	11.272	11.728	12.182	12.640
	Total reducción requerida Propuesta 1		11.275	11.827	12.675	13.515	14.339	15.152	15.958	16.765
	Propuesta 2	Concón	927	1.032	1.139	1.252	1.367	1.485	1.606	1.728
		Huasco	2.219	2.463	2.701	2.934	3.165	3.392	3.617	3.840
		Los Andes	238	205	150	64	-	-	-	-
		Quillota	333	335	333	332	328	321	311	299
		Rengo	162	172	182	192	202	212	222	232
		San Fernando	242	260	278	297	315	333	352	371
		Santiago	15.431	15.606	16.019	16.427	16.830	17.230	17.633	18.046
	Total reducción requerida Propuesta 2		19.554	20.072	20.801	21.498	22.208	22.974	23.740	24.516

Fuente: Elaboración propia

9.2 Cuantificación del número de casos y valoración de los beneficios en la población más expuesta para los escenarios propuestos

La estimación de los beneficios en la población más expuesta se realizó estimando los impactos en salud por los cambios en la calidad del aire, dados por la siguiente ecuación:

Ecuación 8 Estructura general de impacto en la salud por un cambio en la calidad del aire

$$\text{Impacto } (\Delta \text{Efectos en salud}) = \Delta C * \beta * TIB * Pob$$

En este caso, el cambio en la calidad del aire corresponde al cambio en la concentración del contaminante de interés (ΔC). El coeficiente de riesgo unitario (β) es calculado por medio de la función C-R. La tasa de incidencia base (TIB) es el número de eventos de mortalidad o morbilidad, divididos por la población (Pob) con riesgo de sufrir este efecto. Por último, la población es simplemente la población de interés expuesta al cambio en la concentración. En las subsecciones siguientes se explica en detalle los componentes de dicha relación.

9.2.1 Coeficientes de riesgo

El coeficiente de riesgo unitario permite estimar el efecto en la salud (ΔE) derivado del cambio en la concentración del contaminante de interés (ΔC). Esta relación es relevante para efectos de estimar los beneficios derivados de la disminución de la concentración de contaminantes.

De acuerdo con la revisión de efectos en salud por la exposición a los contaminantes analizados presentada en el Capítulo 3, se estima que la mortalidad es el efecto más relevante a considerar en la evaluación de los beneficios, debido a que su valoración es mucho más alta que morbilidad. Es por esto que se consideraron los coeficientes de riesgo presentados en la Tabla 9-13. En el caso del Plomo, tal como se mencionó en la Sección 3.2.1.5, no existe evidencia respecto a un coeficiente de riesgo asociado a mortalidad por exposición a este contaminante.

Tabla 9-13 Coeficientes de riesgo utilizados.

Contaminante	Métrica exposición	Medida	Autor y año	Efecto	Tipo causa	Beta
SO ₂	24 h	Media	Orellano, Reinoso Y Quaranta (2021)	Mortalidad	Todas las causas	0.006
SO ₂	1 h	Max	Orellano, Reinoso Y Quaranta (2021)	Mortalidad	Todas las causas	0.002
O ₃	8 h	Max	Huangfu Y Atkinson (2020)	Mortalidad	Todas las causas	0.004
CO	24 h	Media	Lee KK, Spath N, Miller MR, Mills NL, Shah ASV.(2020)	Mortalidad	Cardiovascular	0.051

Fuente: Elaboración propia

9.2.2 Tasa de mortalidad basal

Las tasas de mortalidad corresponden al número de defunciones dividido por la cantidad de habitantes de la población expuesta.

Para este estudio se consideraron las defunciones totales y con la población por zona se construyen las tasas anuales por zona. Finalmente, se consideró el promedio de las tasas de mortalidad de los años 2010 a 2020. En la Tabla 9-14 se muestra la tasa de mortalidad promedio por zona.

Tabla 9-14 Tasa de mortalidad promedio por zona.

Zona	Tasa de mortalidad (casos cada 100 mil habitantes)
Catemu	535
Concón	465
Copiapó	437
Coronel	499
Huasco	524
Los Andes	595
Machalí	367
Puchuncaví	558
Quillota	659
Rengo	522
San Fernando	561
Santiago	505
Sierra Gorda	215
Tocopilla	652

Fuente: Elaboración propia

9.2.3 Impacto en salud por reducción de concentraciones y valoración de los beneficios en la población más expuesta para los escenarios propuestos

La reducción de emisiones presentada en la Sección 9.1.4 se traduce en reducción de concentraciones que, a su vez, usando la Ecuación 8, permite calcular las muertes evitadas por zona de interés, para cada contaminante y escenario normativos propuesto.

Como se mencionó anteriormente, en algunos casos ocurre que las medidas de abatimiento no son suficientes para alcanzar la reducción de emisiones requeridas y, por tanto, la norma no se alcanza. En el caso de la NPCA del SO₂, solo para los años 2024 y 2025 hay incumplimiento con la propuesta 1 en Catemu y para la propuesta 2 en Catemu y Copiapó. Sin embargo, desde el año 2026 en adelante, cuando se implementan las medidas de abatimiento, se alcanza un cumplimiento del 100% en todas las zonas, para todos los años. Cabe destacar que Puchuncaví y

Tocopilla aparecen con 100% de cumplimiento debido al cierre programado de las centrales termoeléctricas correspondientes. Machalí no presenta incumplimientos.

Tabla 9-15 Porcentaje de monitores que alcanzan la norma, a nivel de zona, para cada escenario normativo de NPCA de SO₂.

Cumplimiento norma	Zona	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Actual	Catemu	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Copiapo	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Coronel	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Machalí	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Puchuncavi	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Tocopilla	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Propuesta 1	Catemu	67%	67%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Copiapo	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Coronel	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Machalí	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Puchuncavi	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Tocopilla	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Propuesta 2	Catemu	67%	67%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Copiapo	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Coronel	86%	86%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Machalí	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Puchuncavi	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Tocopilla	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia.

Para la norma de O₃, Rengo y Santiago muestran que no es posible alcanzar la norma actual, y mantienen los niveles de incumplimiento para las propuestas 1 y 2. El resto de las zonas muestra un cumplimiento del 100%, aun cuando requieran reducciones adicionales de emisiones para los escenarios.

Tabla 9-16 Porcentaje de monitores que alcanzan la norma, a nivel de zona, para cada escenario normativo de NPCA de O₃.

Escenario norma	Zona	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Actual	Concon	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Huasco	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Los Andes	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Quillota	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Rengo	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	San Fernando	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Santiago	30%	30%	60%	60%	60%	60%	50%	50%	50%	50%

Propuesta 1	Concon	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Huasco	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Los Andes	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Quillota	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Rengo	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	San Fernando	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Santiago	30%	30%	60%	60%	60%	60%	50%	50%	50%	50%
Propuesta 2	Concon	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Huasco	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Los Andes	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Quillota	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Rengo	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	San Fernando	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Santiago	30%	30%	60%	60%	60%	60%	50%	50%	50%	50%

Fuente: Elaboración propia

Este porcentaje de cumplimiento está relacionado con los casos evitados. Para la NPCA de SO₂, en Coronel, Puchuncaví y Tocopilla aparecen casos evitados en el escenario de norma actual debido a que los niveles proyectados de concentraciones superan el estándar actual. Sin embargo, Puchuncaví y Tocopilla tienen fuentes emisoras de centrales termoeléctricas las cuales tienen un plan de retiro calendarizado el cual se ejecutará previo al 2026, por tanto, para las propuestas 1 y 2, ninguna de esas zonas presenta un aumento de esos casos evitados. Coronel es la única zona que presenta no solo beneficios asociados al cumplimiento actual sino también con los escenarios propuestos 1 (solo en el año 2033) y 2 (desde el año 2026). Catemu y Copiapó son zonas donde la norma actual se cumple, pero los escenarios 1 y 2 requieren reducción de emisiones adicionales que son alcanzadas, lo cual implica beneficios adicionales. En el caso de Machalí, si bien es una zona de interés para el SO₂, sus concentraciones no alcanzan a superar ninguno de los escenarios normativos, por lo que no se requieren reducción de emisiones, lo que a su vez implica que no existan beneficios asociados a nuevas normas.

Tabla 9-17 Casos evitados al año, para cada escenario normativo de SO₂.

Escenario norma	Zona	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Actual	Coronel	36	41	45	51	57	63	69	74	80	86
	Puchuncaví	87	91	95	99	103	107	111	114	118	122
	Tocopilla	27	26	26	26	29	31	33	35	37	39
Propuesta 1 con respecto a la norma actual	Catemu			7	7	7	8	8	8	8	8
	Copiapó										2
	Coronel										69
Propuesta 2 con respecto a la norma actual	Catemu			23	23	24	25	25	26	26	27
	Copiapó							84	91	98	104
	Coronel			43	47	50	54	58	61	65	69

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del O_3 , en Concón, Huasco, Quillota, Rengo y Santiago existen casos evitados en el escenario de norma actual, indicando que la norma actual estaría siendo superada por las concentraciones proyectadas y, por tanto, existe un beneficio asociado al avanzar en el cumplimiento del presente estándar. Al considerar la propuesta 1 de norma, hay un incremento de casos evitados sólo en las zonas de Concón y San Fernando. Para la propuesta de escenario más exigente, se suma Los Andes. En Huasco y Quillota las alternativas de mitigación empleadas para alcanzar la norma actual reducen a tal nivel las concentraciones, que no se necesitan reducciones adicionales para cumplir con las propuestas 1 y 2. De manera similar ocurre con San Fernando, ya que el cumplimiento de la propuesta 1 implica el cumplimiento de la propuesta 2. En el caso de Rengo y Santiago sucede lo opuesto, ya que las medidas de reducción de emisiones no permiten reducir las concentraciones y alcanzar los estándares propuestos, ni siquiera la norma actual. Debido a esto, no aparecen beneficios adicionales en los escenarios más exigentes, ya que no se estaría cumpliendo con esos estándares. Cabe recordar que los costos que se consideran corresponden a medidas de fuentes fijas y la principal fuente de emisiones de NO_x asociada a las concentraciones de O_3 corresponden a fuentes móviles.

Tabla 9-18 Casos evitados al año, para cada escenario normativo para el O₃.

Escenario norma	Zona	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Actual	Concon	0	0	0	0	0	0			1	8
	Huasco	22	24	26	28	29	31	33	35	37	39
	Quillota	260	283	305	327	348	368	388	407	424	441
	Rengo			43	43	44	44	45	45	46	46
	Santiago			2,639	2,802	2,949	3,094	3,236	3,377	3,516	3,649
Propuesta 1 con respecto a la norma actual	Concon			7	7	7	21	22	22	22	16
	San Fernando			10	11	11	11	11	12	12	12
Propuesta 2 con respecto a la norma actual	Concon			19	20	21	21	22	22	22	16
	Los Andes			31	28	25	22				
	San Fernando			10	11	11	11	11	12	12	12

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se hace necesario valorizar estos beneficios en salud de forma de poder compararlos con los costos asociados a la reducción de emisiones. Para ello se utiliza el Valor de la Vida Estadística (VVE) entregado por el Informe de Precios Sociales (MIDESO, 2024). Este índice alcanza un valor de UF 60 mil por cada muerte evitada. La Tabla 9-19 muestra los beneficios valorizados para todo el período, traídos a valor presente, y de forma incremental tomando como base el cumplimiento de la norma actual y lo que implicaría el avance en las propuestas 1 y 2 para cada zona. La lógica de porqué existen algunas zonas en algunos escenarios y en otros no, es la misma que se explicó previamente en los casos evitados.

Tabla 9-19 Beneficios en el período para la norma SO₂

Escenario norma	Zona	Beneficio
Actual	Coronel	25,4
	Puchuncaví	45,4
	Tocopilla	13,3
	Total escenario actual	84,1
Propuesta 1 con respecto a Norma Actual	Catemu	2,5
	Copiapó	0,1
	Coronel	2,3
	Total Propuesta 1	4,9
Propuesta 2 con respecto a Norma Actual	Catemu	8,2
	Copiapó	13,7
	Coronel	18,2
	Total Propuesta 2	40,0

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del SO₂, los principales beneficios están dados por el cumplimiento de la normativa actual. La zona de Puchuncaví es la que presenta mayores valores, seguida de Copiapó y Coronel. Avanzar hacia la propuesta 1 de la norma incrementa los beneficios levemente, pero con la propuesta 2 se obtienen mayores incrementos.

Tabla 9-20 Beneficios en el período para la norma O₃.

Escenario	Zona	Beneficio
Actual	Concón	0,3
	Huasco	13,0
	Quillota	152,5
	Rengo	14,7
	Santiago	1.032,6
	Total escenario actual	1.213,1
Propuesta 1 con respecto a Norma Actual	Concón	4,9
	San Fernando	3,7
	Total Propuesta 1	8,6
Propuesta 2 con respecto a Norma Actual	Concón	6,8
	San Fernando	3,7
	Los Andes	5,0
	Total Propuesta 2	15,5

Fuente: Elaboración propia.

Para el O₃, Santiago es la zona que presenta mayores beneficios en el escenario de cumplimiento del estándar actual. Las propuestas de norma presentan incrementos menores respectivamente en el caso 1 y 2, concentrados en Concón y San Fernando. Los Andes también se ve beneficiado, pero sólo con el estándar más estricto dado por la propuesta 2.

9.3 Identificación por fuente de potenciales tecnologías de abatimiento para la reducción de contaminantes en los escenarios regulados

A continuación, se explica la estimación de costos de cumplimiento para los escenarios normativos a través de la implementación de tecnologías de abatimiento para las fuentes fijas. Cabe mencionar que los costos se presentarán en UF, convirtiendo según la tasa de cambio de la valorización del año correspondiente.

Los costos de las tecnologías de abatimiento para el cumplimiento de la norma consideran costos de inversión, operación y mantención anualizados. Para el cálculo se utilizó la Documentación Cost²³ (USEPA, 2023) que presenta los costos de reducción por tonelada a reducir.

²³ <https://www.epa.gov/economic-and-cost-analysis-air-pollution-regulations/cost-analysis-modelstools-air-pollution>

Las tecnologías de abatimiento recopiladas para NO_x y SO₂ se encuentran en la Tabla 9-21 y Tabla 9-22 respectivamente junto con las eficiencias de las medidas. En la Tabla 9-23 se muestra el costo por default mínimo de cada tecnología para reducción de NO_x y en la Tabla 9-24 para la reducción de SO₂ según el tipo de fuente y estado de combustible en UF/ton.

Tabla 9-21 Eficiencia para tecnologías de abatimiento de NO_x

Tecnología de control	Eficiencia	Tecnología de Control	Eficiencia
Catalytic Combustion	98%	Adjust Air to Fuel Ratio and Ignition Retard	30%
SCR + DLN Combustion	94,60%	Low NO _x Coal-and-Air Nozzles with separated Overfire Air	47%
Extended Absorption	95%	Ignition Retard	25%
Non-Selective Catalytic Reduction	98%	Steam Injection	80%
Selective Catalytic Reduction and Steam Injection	95%	Oxygen Enriched Air Staging	65%
Non-Selective Catalytic Reduction or Low Emission Combustion	87,45%	Low NO _x Burner and Over Fire Air	72%
Low NO _x Burner	84%	Air to Fuel Ratio Controller	20%
Selective Catalytic Reduction and Water Injection	94,10%	Non-Selective Catalytic Reduction or Adjust Air Fuel Ratio and Ignition Retard	39%
Layered Combustion	97%	Water Injection	72%
Ultra Low NO _x Burner and Selective Non-Catalytic Reduction	69,50%	RACT to 25 tpy (Low NO _x Burner)	36%
Ultra Low NO _x Burner and Selective Catalytic Reduction	91%	RACT to 50 tpy (Low NO _x Burner)	36%
EMx and Dry Low NO _x Combustion	99%	Selective Non-Catalytic Reduction	60%
EMx	95%	Selective Catalytic Reduction	90%
Low NO _x Burner and Selective Non-Catalytic Reduction	80%	Selective Non-Catalytic Reduction - Ammonia	50%
EMx and Water Injection	99%	Low Emission Combustion	80%
Non-Selective Catalytic Reduction or Layered Combustion	95,95%	Low Excess Air	13%
Mid-Kiln Firing	41%	Ultra-Low NO _x Burner	53%
Excess O ₃ Control	37%	Natural Gas Reburn	50%
Dry Low NO _x Combustion	84%	Ultra Low NO _x Burner	75%
Adjust Air to Fuel Ratio	20%	Low Sulfur Fuel	10%
Low NO _x Burner and Flue Gas Recirculation	77%	Low NO _x Burner and Selective Catalytic Reduction	90%
Low NO _x Coal-and-Air Nozzles with cross-Coupled Overfire Air	42%	Cullet Preheat	5%
Thermal Reduction	81%	Flue Gas Recirculation	40%
Low NO _x Coal-and-Air Nozzles with Cross-Coupled and Separated Overfire Air	62%	Electric Boost	30%
Catalytic Ceramic Filter	80%	SCR-95%	84%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9-22 Eficiencia para tecnologías de abatimiento de SO₂

Tecnología de Control	Eficiencia
Packed Bed Scrubber	99%
Sulfur Recovery and/or Tail Gas Treatment	99,80%
Limestone Forced Oxidation	96%
Dry Scrubber	95,20%
Lime Spray Dryer	92%
Wet Scrubber	95,20%
Catalyst Additive	43%
Chemical Additives to Waste	75%
Fuel Switching	80%
Low Sulfur Fuel	10%
Increased Caustic Injection Rate for Existing Dry Injection Control	70%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9-23 Tecnologías y costos por tonelada para reducciones NO_x seleccionada por tipo de fuente EPA

Contaminante	Tipo fuente	Tecnología de control	Costo por tonelada (UF/ton-año)
NO _x	Amoniaco: reformadores	Low NO _x Burner and Flue Gas Recirculation	16,9
	Caldera de Generación Eléctrica	Selective Non-Catalytic Reduction	38,4
	Caldera ICI	Low NO _x Burner	18,9
	Caldera Industrial	Low NO _x Coal-and-Air Nozzles with cross-Coupled Overfire Air	8,5
	Calefacción residencial	Low Sulfur Fuel	-
	Calentador horno de recubrimiento	Low NO _x Burner	77,9
	Calentadores de proceso a gas para refinerías de petróleo	Excess O ₃ Control	1,5
	Calentadores espaciales	Low NO _x Burner and Flue Gas Recirculation	25,5
	Calentamiento por explosión	Low NO _x Burner and Flue Gas Recirculation	16,5
	Combustión de carbón industrial	RACT to 25 tpy (Low NO _x Burner)	58,4
	Combustión de petróleo industrial	RACT to 25 tpy (Low NO _x Burner)	51,1
	Combustión Industrial	RACT to 25 tpy (Low NO _x Burner)	33,3
	Eliminación de residuos solidos	Selective Non-Catalytic Reduction	48,9
	Equipo alimentado con combustible; Htrs del proceso; Gas profesional	Low NO _x Burner and Flue Gas Recirculation	106,9
	Fabricación de ácido adípico	Extended Absorption	3,9
	Fabricación de ácido nítrico	Extended Absorption	20,8
	Fabricación de almidón	Low NO _x Burner and Flue Gas Recirculation	106,9
	Fabricación de arcilla cerámica	Low NO _x Burner	77,9
	Fabricación de Cemento: húmedo	RACT to 25 tpy (Low NO _x Burner)	33,3
	Fabricación de Cemento: húmedo o seco	Mid-Kiln Firing	1,6
	Fabricación de Cemento: Seco	RACT to 25 tpy (Low NO _x Burner)	33,3
	Fabricación de Coque	Selective Non-Catalytic Reduction	71,0
	Fabricación de Vidrio	Low NO _x Burner	11,9
	Fbrglass Mfg; Fbr tipo texto; Recup Furn	Low NO _x Burner	73,2
	Fosas de recogido o reposo	Low NO _x Burner and Flue Gas Recirculation	32,5

Contaminante	Tipo fuente	Tecnología de control	Costo por tonelada (UF/ton-año)
	Hierro y acero	Selective Catalytic Reduction	102,2
	Horno	Low NOx Burner	24,7
	Horno de cal	Low NOx Burner	24,2
	Horno de cemento	RACT to 25 tpy (Low NOx Burner)	33,3
	Horno de cemento y cal	Selective Catalytic Reduction	71,6
	Horno de Coque	Low NOx Burner	77,9
	Horno de fundición/reverbero	Low NOx Burner	24,7
	Horno de tratamiento térmico	Low NOx Burner	24,7
	Horno Reverbero	Low NOx Burner and Flue Gas Recirculation	32,5
	ICE	Selective Catalytic Reduction	289,6
	Incineradores de desechos médicos	Selective Non-Catalytic Reduction	48,9
	Incineradores industriales	Selective Non-Catalytic Reduction	195,2
	Industrial NG ICE	Selective Non-Catalytic Reduction	48,9
	Lean Burn ICE-NG	Non-Selective Catalytic Reduction or Low Emission Combustion	13,1
	Motores de combustión interna	Air to Fuel Ratio Controller	27,1
	Motores IC	Low NOx Burner and Flue Gas Recirculation	16,5
	Motores IC alternativos	Ignition Retard	21,2
	Plantas siderúrgicas	RACT to 25 tpy (Low NOx Burner)	33,3
	Plantas siderúrgicas: recalentamiento	Ignition Retard	21,2
	Procesamiento de mineral de hierro taconita	Low NOx Burner	13,0
	Producto de amoniaco	Selective Catalytic Reduction	177,9
	Productos de plástico específicos	Low NOx Burner and Flue Gas Recirculation	25,5
	Recubrimiento Conv de Prod; Bano de limpieza con acido	Low NOx Burner and Flue Gas Recirculation	106,9
	Secador	Low NOx Burner	77,9
	Secador Rotatorio	Low NOx Burner	8,2
	Turbinas de gas	Low NOx Burner	77,9
	Unidades de craqueo Cat fluido; Unidad de craqueo	Low NOx Burner	4,3
	Uso de combustible en proceso	Low NOx Burner and Flue Gas Recirculation	106,9
	Uso de combustible en proceso generación	Selective Catalytic Reduction	167,3

Fuente: Elaboración propia en base a USEPA (2023).

Tabla 9-24 Tecnologías y costos por tonelada para reducciones SO₂ seleccionada por tipo de fuente EPA

Contaminante	Tipo fuente	Control technology	Costo por tonelada (UF/ton-año)
SO ₂	Caldera ICI	Dry Scrubber	25,6
	Caldera Industrial	Limestone Forced Oxidation	14,6
	Calefacción residencial	Low Sulfur Fuel	96,7
	Combustión de combustible de fuente estacionaria	Fuel Switching Total	79,4
	Fuente no puntual residencial	Chemical Additives to Waste Total	96,7
	No EGU	Packed Bed Scrubber Total	8,5
	Plantas de Recuperación de Azufre	Sulfur Recovery and/or Tail Gas Treatment Total	27,8
	Unidades de craqueo térmico y catalítico de refinería de petróleo	Catalyst Additive Total	52,6

Fuente: Elaboración propia en base a USEPA (2023).

Cada zona tiene distintos tipos de fuentes emisoras. Se realizó un análisis de los tipos de fuentes emisoras y las respectivas emisiones a reducir cada una. En la Tabla 9-25 y Tabla 9-26 se muestra el tipo de fuente predominante por zona de interés y la medida seleccionada considerando aquellos más costos eficientes según los costos de la Tabla 9-23 y Tabla 9-24.

Tabla 9-25 Tipo de fuente predominante por zona de interés y medida seleccionada para SO₂

Zona	Tipo Fuente	Medida seleccionada de min costo
Catemu	Horno de Fusión	Dry Scrubber
	Convertidor Pierce Smith (CPS)	Dry Scrubber
Copiapó	Convertidor Teniente (CT)	Dry Scrubber
	Horno Reverbero	Dry Scrubber
Coronel	Caldera de generación eléctrica	Limestone Forced Oxidation
Puchuncaví	Convertidor Teniente (CT)	Dry Scrubber
	Caldera Industrial	Limestone Forced Oxidation
Tocopilla	Caldera de Generación eléctrica	Limestone Forced Oxidation

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9-26 Tipo de fuente predominante por zona de interés y medida seleccionada para NO_x

Zona	Tipo Fuente	Medida seleccionada de min costo
Concón	Caldera	Low NO _x Burner
	Horno	Low NO _x Burner
Huasco	Caldera	Low NO _x Burner
Los Andes	Caldera	Low NO _x Burner
	Horno	Low NO _x Burner
Rengo	Caldera	Low NO _x Burner
San Fernando	Caldera	Low NO _x Burner
	Horno	Low NO _x Burner
Santiago	Horno	Low NO _x Burner
	Caldera	Low NO _x Burner
	Turbina de Gas	Low NO _x Burner

Fuente: Elaboración propia

Los costos anualizados por tipo de fuente y escenario normativo se presentan en la Tabla 9-27 y Tabla 9-28 para los contaminantes. Los costos se anualizaron a una tasa de descuento social del 6%. La proporción de costos se concentran en tecnologías para abatir emisiones de Hornos de Fusión, Hornos de Proceso, Convertidor Pierce Smith (CPS) y Calderas Industriales principalmente.

Tabla 9-27 Costo anual de abatimiento por escenario normativo para SO₂

Tipo Fuente/Escenario	Actual	Propuesta 1	Propuesta 2
Horno de Fusión	-	-	11.721
Convertidor Pierce Smith (CPS)	-	5.282	5.313
Convertidor Teniente (CT)	-	-	3.261
Caldera de Generación eléctrica	-	18	153
Horno Basculante	-	-	42
Caldera Industrial	-	0,014	0,014
Caldera calefacción	-	0,001	0,001
Caldera de Fluido Térmico	-	0,001	0,001
Costo Total [valor presente miles UF/año]	0	5.300	20.490

Tabla 9-28 Costo anual de abatimiento por escenario normativo para O₃

Tipo Fuente/Escenario	Actual	Propuesta 1	Propuesta 2
Horno Rotatorio	296.42	296.42	296.93
Horno de Fusión	66.34	66.34	66.34
Horno Proceso	0	35.03	55.78
Caldera calefacción	40.62	41.25	48.93
Turbina de Gas	31.7	32.18	32.18
Horno	29.92	29.92	29.92
Horno de Panadería	22.16	22.18	22.2
Caldera Industrial	14.32	21.84	21.86
Caldera de Generación Eléctrica	20.3	20.3	20.3
Horno Palanquillas	2	2	2
Horno de Cocción	1.01	1.01	1.01
Horno Secador	0.41	0.41	0.41
Horno Planta Regeneradora de Ácido Sulfúrico	0	0.2	0.31
Caldera de Fluido Térmico	0.12	0.15	0.25
Horno Rotatorio Secador	0.24	0.24	0.24
Horno Tostación	0.1	0.1	0.1
Caldera Agua Caliente	0	0	0
Horno de Refino	0.02	0.02	0.02
Calefactor Residencial	0	0	0
Horno Basculante	0	0	0
Costo Total [valor presente miles UF/año]	525	569	598

9.4 Descripción de potenciales medidas de abatimiento

Las potenciales medidas de abatimiento seleccionadas en la Sección 9.3 corresponden a: Lavadores en Seco (Dry Scrubber), Limestone Forced Oxidation, Low Nox Burner, Low Nox Coal-and Air Nozzles with cross Coupled Overfire Air, Low Sulfur Fuel, Selective Non-Catalytic Reduction. En la Tabla 9-29 se muestra una descripción por tipo de tecnología, en base a la recopilación de descripciones de USEPA (2023).

Tabla 9-29 Resumen de Tecnologías de control seleccionadas.

Tecnología de control	Cont	Grupo fuente	Descripción	Referencia
Dry Scrubber (Lavador en seco)	SO ₂	Industrial, Commercial and Institutional (ICI) Boilers	En los lavadores en seco (también llamados absorbedores de secador por pulverización), los gases de combustión se introducen en una torre de absorción (secador) donde los gases entran en contacto con una lechada alcalina finamente atomizada. Los gases ácidos son absorbidos por la mezcla de lodo y reaccionan para formar sales sólidas. El calor de los gases de combustión se utiliza para evaporar todas las gotas de agua, dejando un gas de combustión no saturado (es decir, seco) que sale de la torre de absorción. El efecto de enfriar y humidificar la corriente de gas caliente aumenta la eficacia de la recogida con respecto a la simple inyección seca. Dado que los absorbedores de los secadores por pulverización sólo eliminan gases, siempre es necesario un dispositivo independiente para eliminar partículas. Los dispositivos de control de partículas suelen ser filtros textiles o precipitadores electrostáticos (ESP).	Costs developed using Air Pollution Control Cost Estimation Spreadsheet For Wet and Dry Scrubbers for Acid Gas Control (May 2021).
Lime Spray Dryer (Secador por pulverización de cal)	SO ₂	Utility Boiler	Este control consiste en la aplicación de un secador por pulverización de cal a Utility Boilers para reducir las emisiones de SO₂.	Clean Air Markets Division. “Documentation for Base Case v.5.13: Emission Control Technologies Using the Integrated Planning Model” ²⁴ (EPA, 2013)
Low Sulfur Fuel	SO ₂	Residential Heating	Esta medida consiste en cambiar el gasóleo de calefacción de alto contenido en azufre (2.500 ppm de azufre) por el de bajo contenido en azufre (500 ppm) para los usuarios residenciales. This measure is a switch from high-sulfur (2,500 ppm sulfur content) to low-sulfur (500 ppm) home heating oil for residential users.	Low Sulfur Heating Oil in the Northeast States: An Overview of Benefits, Costs, and Implementation Issues. NESCAUM, Boston, MA. December 2005.

²⁴ . <https://www.epa.gov/airmarkets/documentation-base-case-v513-emission-control-technologies>

Tecnología de control	Cont	Grupo fuente	Descripción	Referencia
Low Nox Burner (Quemador de bajo NOx)	NOx	-	Consiste en el uso de la tecnología de quemadores de bajo NOx (LNB) para reducir las emisiones de NOx. Los LNB reducen la cantidad de NOx creada a partir de la reacción entre el nitrógeno del combustible y el oxígeno al bajar la temperatura de una zona de combustión y reducir la cantidad de oxígeno disponible en otra. Los LNB están diseñados para «escalonar» la combustión de forma que se creen dos zonas de combustión, una rica en combustible y otra a menor temperatura. Los LNB suelen utilizar técnicas de escalonamiento para suministrar aire en exceso con el fin de enfriar el proceso de combustión o reducir el oxígeno disponible en la zona de la llama. Los LNB de aire por etapas crean una zona de combustión primaria reductora rica en combustible y una zona de combustión secundaria pobre en combustible. Los LNB de combustible por etapas crean una zona de combustión pobre que está relativamente fría debido a la presencia de un exceso de aire, que actúa como disipador de calor para reducir las temperaturas de combustión (EPA 2002b). Estas tecnologías prevalecen en la industria de la energía eléctrica, así como en las calderas industriales, comerciales e institucionales (ICI) en la actualidad y cada vez son más utilizadas por las ICI, incluso en tamaños pequeños, es decir, de menos de 10 MMBtu/hora.	(US-EPA, 2002)
Low NOx Coal-and-Air Nozzles with Cross-Coupled and Separated Overfire Air	NOx	Utility Boiler	Consiste en el uso de la tecnología de quemadores de bajo NOx (LNB) para reducir las emisiones de NOx. Los LNB reducen la cantidad de NOx creada a partir de la reacción entre el nitrógeno del combustible y el oxígeno al bajar la temperatura de una zona de combustión y reducir la cantidad de oxígeno disponible en otra. Los LNB están diseñados para «escalonar» la combustión de forma que se creen dos zonas de combustión, una rica en combustible y otra a menor temperatura. Los LNB suelen utilizar técnicas de escalonamiento para suministrar aire en exceso a fin de enfriar el proceso de combustión o reducir el oxígeno disponible en la zona de la llama. Los LNB de aire por etapas crean una zona de combustión primaria reductora rica en combustible y una zona de combustión secundaria pobre en combustible. Los LNB de combustible por etapas crean una zona de combustión pobre que es relativamente fría debido a la presencia de un exceso de aire, que actúa como disipador de calor para reducir las temperaturas de combustión (EPA 2002b).	(US-EPA, 2002)

Tecnología de control	Cont	Grupo fuente	Descripción	Referencia
Selective Non-Catalytic Reduction	SO ₂	Utility Boiler ICI Boiler	Los SNCR (Selective Non-Catalytic Reduction o reducción selectiva no catalítica) son equipos utilizados en calderas industriales, generadores eléctricos e incineradores para reducir las emisiones de NOx. Este equipo se puede aplicar de formar única o complementaria a otras tecnologías de abatimiento. Su eficiencia de remoción de NOx en la aplicación va desde 30% a 50%, y en general a mayor potencia del equipo menor es la eficiencia de remoción (US-EPA, 2002). La tecnología de los SNCR se basa principalmente en la reducción de los óxidos de nitrógeno a nitrógeno gaseoso y vapor de agua. Se le inyecta un agente reductor, como amonio o urea, a la corriente gaseosa para que reaccione químicamente, sin utilizar un catalizador. Como agente reductor puede reaccionar con otras sustancias, se debe mantener la reacción dentro de un rango de temperatura y con presencia de oxígeno, por lo que se considera una reacción selectiva. Estos rangos dependen del agente reductor a utilizar (US-EPA, 2002).	(US-EPA, 2002)

Fuente: USEPA (2023)

9.5 Estimación de los costos de implementación y cumplimiento de las normas para cada escenario propuesto

Los costos de implementación y cumplimiento de las normas para cada escenario propuesto se calculan en base a las tecnologías de abatimiento, comenzando de aquellos más costos eficientes a menos costo eficientes, minimizando así el impacto económico de cada normativa. Se usan los costos anualizados descritos en la Tabla 9-23 y Tabla 9-24 y la proyección de reducción de emisiones que es requerida para cada zona de interés de la Sección 9.1.4.

En primer lugar, se ordenaron de forma ascendente las tecnologías de abatimiento por tipo de fuente para cada contaminante según costos medios de reducción, así cada tipo de fuente emisora quedo asociada a una tecnología de abatimiento que permita el mínimo costo de reducción. A su vez, se incluye en el análisis la eficiencia de las tecnologías y reducción máxima de emisiones, cumpliéndose que la reducción necesaria no sea mayor que la reducción máxima de la tecnología y con la eficiencia se logre reducir las emisiones necesarias por fuente y zona. Luego, se calcula la reducción acumulada por tipo de fuente y zona. Para obtener el costo total acumulado se realiza la selección de la tecnología por fuente y zona.

En la Tabla 9-30 y Tabla 9-31 se muestran los costos anualizados de abatimiento por contaminante. Para obtener los costos anualizados se considera una tasa de descuento social del 6%.

Tabla 9-30 Costo anual de abatimiento por escenario normativo para SO₂

Escenario	Actual	Propuesta 1	Propuesta 2
Costo [valor presente miles UF/año]	0	5.300	20.490

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9-31 Costo anual de abatimiento por escenario normativo para O₃

Escenario	Actual	Propuesta 1	Propuesta 2
Costo [valor presente miles UF/año]	520	46	75

Fuente: Elaboración propia

9.6 Comparación de costos y beneficios derivados de la norma a través de una razón beneficio costo

En la Tabla 9-32 y Tabla 9-33 se muestran las razones beneficio-costo por escenario normativo propuesto para SO₂ y O₃. Para ello se calcula una razón beneficio-costo utilizando los valores anuales para el año base en valor presente, dividiendo los beneficios totales en los costos totales, incluyendo costos. Es posible observar que en los escenarios propuestos esta razón alcanza un valor menor a 1, lo que significa que los costos superan los beneficios.

En el caso del SO₂, Catemu es la zona que presenta los valores más elevados, alcanzando costos de UF 5.300 miles para la propuesta 1. Este valor se triplica cuando se considera el estándar más elevado de la propuesta 2. Copiapó y Coronel le siguen, pero con costos definitivamente menores. Esto se debe a que en ambos lugares se mantienen fuentes de emisión como la Fundición Chagres y el Complejo Termoeléctrico Santa María por el período analizado. Si bien en Machalí también se mantiene la Fundición Caletones, las concentraciones que se proyectan en esta zona no superan los escenarios propuestos (ver sección 9.1.4). En Puchuncaví y Tocopilla existen beneficios con el cumplimiento de la norma actual, pero no costos, ya que los beneficios se asocian con el cierre de centrales termoeléctricas de esas zonas, lo cual ya está contemplado de acuerdo al Plan de Retiro de Centrales y por ende no son costos adicionales de mitigación de emisiones.

Respecto a la relación beneficio/costo, valores sobre 1 indican un beneficio mayor que el costo. Sin embargo, el valor más alto se presenta en Coronel, en ambas propuestas con valores de 0,1 en el escenario 1 y 2 respectivamente. En el resto de las zonas, los beneficios son muy menores en relación a los costos, por tanto, esta razón se va a cero.

Tabla 9-32 Beneficio, Costo y Razón beneficio costo [miles UF en valor presente] para SO₂ por escenario

Escenario	Zona	Beneficio [miles UF valor presente]	Costo [miles UF valor presente]	Beneficio /Costo
Actual	Catemu	0	0	-
	Copiapó	0	0	-
	Coronel	25,4	0	-
	Machalí	0	0	-
	Puchuncaví	45,4	0	-
	Tocopilla	13,3	0	-
	Total	84,1	0	-
Propuesta 1 con respecto a Norma Actual	Catemu	2,5	5.271,2	0,00
	Copiapó	0,1	11,3	0,00
	Coronel	2,3	17,1	0,13
	Machalí	0	0	-
	Puchuncaví	0	0	-
	Tocopilla	0	0	0,00
	Total	4,9	5.299,6	0,00
Propuesta 2 con respecto a Norma Actual	Catemu	8,2	17.034,1	0,00
	Copiapó	13,7	3.306,4	0,00
	Coronel	18,1	149,3	0,12
	Machalí	0	0	-
	Puchuncaví	0	0	-
	Tocopilla	0	0	-
	Total	40,0	20.489,8	0,00

Fuente: Elaboración propia

Para la norma de O₃, Concón presenta los costos más altos, con UF 44 miles y UF 66 miles para los escenarios 1 y 2. Sin embargo, los beneficios no son de la misma magnitud, arrojando relaciones de beneficio/costo del orden de 0.10. San Fernando sí presenta indicadores de 1,63, indicando una superación de los beneficios por sobre los costos, en las propuestas 1 y 2. Ambas cifras son iguales porque las medidas de mitigación son limitadas y, por tanto, no se alcanza el cumplimiento de la propuesta 2, como se explicó en las secciones previas (ver 9.2.3).

Tabla 9-33 Beneficio, Costo y Razón beneficio costo [miles UF en valor presente] para O₃ por escenario

Escenario	Zona	Beneficio	Costo	Beneficio /Costo
Actual	Concón	0,3	1,2	-
	Huasco	13,0	0,0	0,25
	Los Andes	0,0	0,0	-
	Quillota	152,5	0,0	-
	Rengo	14,7	3,9	3,79
	San Fernando	0,0	0,0	-
	Santiago	1.032,6	514,8	2,01
	Total	1.213,2	519,8	2,33
Propuesta 1 con respecto a Norma Actual	Concón	4,9	44,0	0,11
	Huasco	0,0	0,0	-
	Los Andes	0,0	0,0	-
	Quillota	0,0	0,0	-
	Rengo	0,0	0,0	-
	San Fernando	3,7	2,3	1,63
	Santiago	0,0	0,0	-
	Total	8,6	46,3	0,19
Propuesta 2 con respecto a Norma Actual	Concón	6,8	65,8	0,10
	Huasco	0,0	0,0	-
	Los Andes	5,0	7,4	0,67
	Quillota	0,0	0,0	-
	Rengo	0,0	0,0	-
	San Fernando	3,7	2,3	1,63
	Santiago	0,0	0,0	-
	Total	15,5	75,5	0,21

Fuente: Elaboración propia

10. Presentación de los resultados finales del estudio

10.1 Reuniones de avance del estudio

Durante la realización del estudio se realizaron reuniones para presentar los avances a la contraparte técnica y a su vez coordinar temas de interés del estudio. En estas reuniones el jefe del estudio participa al menos en una reunión mensual con la contraparte técnica. Las reuniones de avance son con la contraparte técnica e invitados que se estimen pertinentes, en donde se presentaron resultados parciales del estudio. Las reuniones fueron realizadas mediante videoconferencia a través de Teams. Además de reuniones de avances parciales, se apoyó en el Comité Operativo de cada contaminante de estudio. En la Tabla 10-1 se muestran las reuniones realizadas y sus respectivas fechas de realización.

Tabla 10-1 Fechas reuniones de avance de estudio

Hito	Fecha
Reunión de Inicio	24/11/2023
Reunión diseño Campaña de Plomo: Estudio Gases y Plomo	04/01/2024
Presentación Informe de Avance 1	22/01/2024
Reunión Campaña de monitoreo plomo	25/01/2024
Reunión Codelco – Campaña de medición plomo	26/01/2024
Reunión de coordinación Avance Informe 2	04/03/2024
Reunión Presentación previa Informe Avance 2	08/05/2024
Reunión Presentación observaciones Informe de Avance 2	10/05/2024
Reunión de Inventario con RETC	16/05/2024
Presentación Informe Avance 2 preliminar junto a SEREMIS	23/05/2024
Reunión de Coordinación Estudio Gases y Plomo	25/06/2024
Reunión Comité Operativo O ₃ y CO	25/06/2024
Reunión Comité Operativo SO ₂	27/06/2024
Reunión con Departamento de Economía Ambiental Estudio Gases y Plomo	04/07/2024
Reunión Preparatoria para Informe Final Estudio Gases y Plomo	29/07/2024
Reunión Observaciones Informe Final Estudio Gases y Plomo	09/09/2024
Reunión Coordinación para resolución de observaciones del Informe Final Estudio Gases y Plomo	26/09/2024
Reunión Coordinación Informe Final Estudio Gases y Plomo	01/10/2024
Comité operativo de Pb	22/10/2024
Comité operativo Ampliado Pb	29/10/2024

Fuente: Elaboración propia

10.2 Presentación de informes y presentación final

Para cada entrega de informe, una vez subsanadas las observaciones, se acompaña con una presentación de resultados a la contraparte técnica y sus respectivos invitados. En esta instancia, el jefe del proyecto y los especialistas realizan una presentación con los resultados de los objetivos desarrollados en cada informe. Estas presentaciones se realizaron vía remota a través

de Teams. En la Tabla 10-2 se muestran las fechas de entregas de informe y las reuniones de presentación de resultados.

Tabla 10-2 Fechas de entrega de informes y reuniones de presentación de resultados

Hito	Fecha
Entrega Informe de Avance 1	21/12/2023
Presentación de Informe de Avance 1	22/01/2024
Presentación de Informe de Avance 2 preliminar junto a SEREMIS	23/05/2024
Entrega Informe de Avance 2	06/06/2024
Entrega Informe Final	18/10/2024

Fuente: Elaboración propia

11. Conclusiones

El presente estudio busca proporcionar antecedentes relevantes para la revisión de las normas de calidad del aire de SO_2 , O_3 , Pb y CO, obteniendo información relevante que permite fortalecer y justificar la fundamentación de la revisión de las normas. A raíz de esto, se observa la posibilidad y pertinencia de seguir avanzando e ir actualizando de manera gradual los valores límites para los contaminantes SO_2 , O_3 y CO. La OMS, UE y EPA sirven de referencia para establecer límites más estrictos para estos contaminantes.

En particular para el SO_2 , se observa la posibilidad de reducir el estándar actual chileno para las tres métricas vigentes en la norma primaria: 1 hora a $197 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como la norma de Estados Unidos; 24 horas a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como la recomendación de la OMS; anual a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como la reciente revisión de la Unión Europea. Para la norma secundaria de SO_2 se observa la posibilidad de reducir el estándar anual vigente, que en comparación a lo recomendado por la OMS ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) es tres veces superior. La nueva evidencia de efectos adversos a la salud sigue respaldando los efectos que se conocen, principalmente centrados en el sistema respiratorio, y se añade nueva evidencia relacionada al sistema cardiovascular y nervioso. Sin embargo, solamente existen pruebas sólidas de una relación causal respecto a efectos respiratorios por exposición de corto plazo. Por otro lado, la revisión de efectos adversos en el medio ambiente se centró principalmente en efectos a la vegetación, debido que a la evidencia es más escasa sobre efectos en fauna, por lo que se profundizó en una revisión de sitios prioritarios y áreas protegidas que serían de relevancia al momento de actualizar la norma secundaria de SO_2 .

Respecto al O_3 , la nueva evidencia científica ha documentado impactos a la salud en otros sistemas aparte del respiratorio, que era lo más conocido cuando se elaboró la norma vigente, tales como el cardiovascular, nervioso y reproductor. Considerando esto, y la revisión de los estándares internacionales para este contaminante, la evidencia recopilada respalda la posibilidad y pertinencia de seguir avanzando en la reducción del valor límite de manera gradual hasta alcanzar la recomendación de la OMS, que corresponde a $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las máximas diarias de las medias móviles octohorarias.

La normativa vigente de calidad del aire para el CO se encuentra alineada con los estándares internacionales, aunque sería pertinente evaluar la factibilidad de implementar un nuevo estándar con una métrica de 24 horas para seguir en consonancia con las recomendaciones de la OMS, que establece un valor guía para esta métrica de $4 \text{ mg}/\text{m}^3$. La evidencia científica reciente aporta nuevos hallazgos con respecto al SNC y con la mortalidad, aunque la evidencia es menos concluyente para efectos a largo plazo.

En el caso del Pb, la evidencia reciente indica que existen efectos adversos frente a cualquier nivel de exposición de plomo, especialmente en niños. Los efectos negativos provienen del plomo acumulado en la sangre y, por tanto, las concentraciones ambientales, si bien aumentan estos niveles, no genera una acción directa en la salud de las personas por sí mismas. Junto con lo

anterior, la OMS propone como estándar el mismo valor que la normativa actual chilena, lo que permite deducir que el estándar actual es adecuado y efectivo. Por lo tanto, no se recomienda avanzar en este estándar sino más bien continuar con el monitoreo ambiental y el estudio de otras fuentes potenciales de exposición al plomo. Además, la implementación de biomonitoreo en la Encuesta Nacional de Salud podría fortalecer aún más la capacidad del país para gestionar y responder a los riesgos asociados con la exposición al plomo.

En base a la revisión internacional de programas de medidas para la gestión de episodios de emergencia ambiental, se observó que los planes presentan medidas y procesos similares a lo establecido en Chile. Sin embargo, se destacan ciertos elementos a los cuales se podría evaluar su factibilidad de implementación en la gestión de episodios críticos en el país. Uno de ellos corresponde a la posibilidad de incorporar el uso de la métrica de 8 horas para establecer episodios críticos de O_3 aparte de la que ya existe de 1 hora. Lo mismo para el caso del SO_2 , de manera que considere también la métrica de 24 horas para establecer los niveles de emergencia. Además, se podría evaluar la posibilidad de rebajar los valores límites que establecen las fases de emergencia para SO_2 y O_3 , de manera que se encuentren a la par que otras ciudades como Madrid, Bogotá y Monterrey. Entre los demás elementos que se proponen evaluar, está la incorporación de verificadores explícitos para establecer los episodios críticos de contaminación, implementación del índice de Calidad del Aire con el fin de informar a la población y que puedan tomar acciones personales que protejan su salud, entre otros. Para el caso particular del plomo, la gestión de la exposición a este contaminante se enfoca en la prevención y el manejo a largo plazo de la exposición crónica, en lugar de la gestión de episodios críticos agudos.

En el análisis de la relación de las concentraciones con las fuentes emisoras por medio del inventario de emisiones recopilado para el año 2019, se observó que las regiones con mayores niveles de los contaminantes a lo largo del país tienen en común una gran cantidad de fuentes emisoras relacionadas al sector industrial, energético y minero, aunque para las emisiones de CO toma gran relevancia la combustión de leña residencial. De manera general, el 96% de las emisiones de SO_2 y el 57% de las emisiones de NO_x durante el 2019 provienen de fuentes puntuales, mientras que el 89,9% de las emisiones de CO para ese mismo año se atribuyen a las fuentes difusas. Para el SO_2 se observa que en los últimos años las emisiones se concentran en las regiones de Antofagasta, O'Higgins, Valparaíso y Atacama. Para el NO_x se observa que las emisiones se concentran en las regiones del Biobío, Metropolitana, Antofagasta y Valparaíso, mientras que para el CO los focos están en la Araucanía, Biobío y Los Lagos. Al proyectar las emisiones del inventario recopilado, se evidenció una tendencia global a la baja para los contaminantes SO_2 y NO_x hasta el año 2027, para luego incrementar levemente las emisiones hasta el 2032. En la proyección de emisiones de fuentes móviles se observa una tendencia a la baja para el SO_2 , NO_x y CO.

Del análisis de establecimientos afectos al Sistema de Impuesto Verde, quedó en evidencia que el área de generación eléctrica corresponde al rubro que más participación tiene en las emisiones de SO_2 y NO_x a nivel nacional. Sobre las fuentes móviles, éstas se concentran en la región Metropolitana principalmente, seguida por Valparaíso y Biobío. Se observó que la contribución

mayoritaria de emisiones de SO_2 , NO_x y CO corresponde a los vehículos particulares, con un 45%, 34% y 60%. Los vehículos comerciales van en segundo lugar con aportes del 23%, 23% y 20% respectivamente. Sobre las emisiones difusas se logró determinar que los incendios forestales contribuyen en gran medida a las emisiones de SO_2 . Para los NO_x aportan principalmente los incendios forestales y la combustión de leña residencial. Por último, para el CO contribuye significativamente la combustión de leña residencial (82%), del cual el 56% corresponde a residencial urbana, aunque hay excepciones como lo sucedido el 2017 en la zona centro y sur del país donde se generaron una gran cantidad de focos incendiarios. Las emisiones difusas de SO_2 y NO_x se concentran en la Región de la Araucanía, mientras que para el CO las emisiones se concentran entre la Región del Biobío y Los Lagos.

El análisis de cumplimiento normativo dio cuenta de que los niveles de plomo en Chile se encuentran muy debajo de la norma, solo en la estación Sierra Gorda (Antofagasta) se han observado niveles más elevados, pero que aun así se mantienen por debajo del estándar actual. Respecto al SO_2 , los niveles en general son buenos a lo largo del país, pero se observó que los niveles más altos se encuentran en la Región de Valparaíso, destacando las comunas de Catemu y Puchuncaví. No se observa incumplimiento de la norma primaria horaria ni anual, pero la norma de 24 horas fue superada 1 vez desde su entrada en vigencia durante el año 2023 en la estación Campiche (Puchuncaví). Sin embargo, no se trata de una estación con representatividad poblacional. Por otro lado, no se observa incumplimiento de la norma secundaria en el periodo analizado. Para el CO no se encontraron zonas con concentraciones elevadas, por lo que en ningún caso se supera la norma nacional. Sin embargo, para la métrica de 8 horas destacan los niveles de concentración de la zona centro y sur del país. Para la norma de O_3 , la Región Metropolitana presentó los niveles más elevados, incumpliendo cada año del periodo analizado el estándar nacional. Otras comunas en que se observó incumplimiento de la norma desde el 2020 han sido Rengo (Región de O'Higgins), Quillón (Región de Ñuble) y Los Andes (Región de Valparaíso).

Con el diagnóstico de la calidad del aire se encontraron zonas de interés para los contaminantes. Para el O_3 , las zonas identificadas abarcan comunas pertenecientes a la región de Atacama, Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins, mientras que para el SO_2 se encontraron zonas de interés dentro de las regiones de Antofagasta, Atacama, Valparaíso, O'Higgins y Biobío. Por otro lado, para el caso del Pb se definió solamente la comuna de Sierra Gorda en Antofagasta, mientras que para el CO no se definieron zonas de interés en base a los niveles de concentración.

En paralelo, se revisaron las técnicas de medición de plomo. Actualmente, existen técnicas maduras de medición discontinua de gases que se basan en el uso de tubos pasivos y permiten medir varios sitios a un costo menor que los medidores discontinuos. Sin embargo, solo es posible utilizar este sistema para evaluación de cumplimiento de norma anual. Por ende, las técnicas de monitoreo para contaminantes gaseosos se centran en métodos continuos ya que las normas de calidad del aire incluyen mediciones basadas en valores horarios de las concentraciones ambientales, por lo que en este contexto no se justifica el uso de técnicas discontinuas. Además, no se considera pertinente incluir nuevas metodologías de medición para los contaminantes

regulados, ya que éstas no están diseñadas para el monitoreo del cumplimiento normativo. De esta manera, se recomienda seguir utilizando las técnicas de monitoreo continuo que han sido ampliamente utilizadas en el país y se encuentran aprobadas por las agencias ambientales de EE. UU. y Europa.

A partir de la revisión de técnicas de análisis de muestras para el monitoreo discontinuo de plomo, se destacan las técnicas FAA, GFAA, ICP/OES e ICP/MS que permiten determinar un solo elemento a la vez. Entre ellas, FAA representa la menor inversión, pero menor rendimiento, mientras que ICP/MS es más costosa y con mayor rendimiento. Considerando la realidad chilena de corto y mediano plazo, sería pertinente agregar otras técnicas de medición de plomo en la normativa ambiental como XRF y las distintas variantes de ICP que ya han sido aplicadas en el país (ICP-OES, ICP-MS), teniendo en cuenta lo que establece el estándar europeo y la EPA. Por otro lado, también se podría incorporar la técnica PIXE dentro de la normativa, dado que está disponible comercialmente, pero teniendo en consideración la alta inversión requerida para instalar un acelerador de partículas que permita implementar el análisis PIXE.

Respecto a las campañas de monitoreo de Plomo realizadas mediante mediciones de MP_{10} en Calama, Santiago, Rancagua y Talcahuano, se obtuvo que en todos los días analizados se cumple con la normativa diaria de MP_{10} . La concentración más alta en la campaña de verano se presentó en la estación Nueva Libertad el día 17 de febrero de 2024, registrando $91 \text{ } (\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N})$, mientras que la más alta en la campaña de otoño corresponde a la estación Rancagua I el día 10 de mayo de 2024, registrando $121 \text{ } (\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N})$. En todos los filtros analizados, el análisis químico indica que el plomo se encuentra bajo el límite de detección, que es $0,003 \text{ mg/filtro}$. En general, las concentraciones de MP_{10} registradas por DICTUC son similares a las de las estaciones de monitoreo SINCA, excepto en Rancagua para la campaña de otoño, donde las concentraciones medidas en filtros fueron un 50% superiores a las mediciones SINCA. A pesar de lo anterior, en todas las mediciones realizadas se estaría cumpliendo con la normativa vigente de plomo.

Volviendo al análisis normativo, se proponen dos escenarios de revisión para las normas, considerando como referencia los valores establecidos por la Unión Europea, la EPA y la OMS, de manera que se sugieren valores inferiores a los establecidos en las normas nacionales, con excepción de la norma de 8 horas de CO y 1 hora de la norma secundaria de SO_2 , debido a que no se encontró evidencia que lo justificara. Además, se propone incorporar una norma de 24 horas para el CO, tal como establece la OMS. De acuerdo con el análisis realizado, la evidencia actual sugiere que la normativa de plomo es adecuada y efectiva en minimizar los riesgos para la salud pública. Sin embargo, se recomienda continuar con el monitoreo ambiental y el estudio de otras fuentes potenciales de exposición al plomo. Además, la implementación de biomonitoreo en la Encuesta Nacional de Salud fortalecerá aún más la capacidad del país para gestionar y responder a los riesgos asociados con la exposición al plomo.

Con el diagnóstico de cumplimiento de los escenarios normativos, para el SO_2 se destaca el hallazgo de las comunas de Catemu y Puchuncaví, que además de ser zonas de interés para este contaminante, resultaron ser zonas saturadas durante todo el periodo 2019-2023 para las

propuestas de escenario normativo 1 (1 hora) y escenario normativo 2 (24 horas, anual primaria y secundaria), mientras que para el escenario de norma secundaria 24 horas la comuna de Puchuncaví destaca durante todo el periodo analizado. Se observó que todos los episodios de emergencia ambiental para cualquiera de los escenarios normativos se dan en la comuna de Catemu, en la estación Santa Margarita que posee representatividad poblacional (EMRP). Respecto al O_3 , se obtuvo una gran cantidad de comunas saturadas y de latencia. Para la propuesta 1, las zonas de interés Rengo, San Fernando, Los Andes y la Región Metropolitana son zonas saturadas en el periodo, siendo esta última quien cuenta con las únicas EMRP. Para la propuesta 2, son zonas saturadas durante todo el periodo la comuna de Calama, y varias comunas en la región de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins, Maule, Ñuble y Biobío. Las regiones de la zona centro (Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins) son las que concentran significativamente los episodios de emergencia ambiental para ambas propuestas. En relación al CO, solo se evidencian zonas de latencia para la propuesta 2 de escenario normativo de 24 horas: las comunas de Cerro Navia (RM) y Coyhaique (Aysén) durante todo el periodo 2019-2023, y Coronel (Biobío) entre 2020-2021. No se obtuvieron episodios de emergencia para ninguno de los escenarios normativos.

La estimación de costos y beneficios se enfocó en las zonas de interés debido a que las reducciones de emisiones asociadas a los cumplimientos normativos se darán en las fuentes presentes en estas zonas. La obtención de las reducciones de emisiones requeridas para cumplir la normativa se obtuvo a través de las reducciones de concentraciones que implican cada uno de los escenarios.

La reducción de concentraciones permite estimar los beneficios asociados a las muertes evitadas por contaminante usando los coeficientes de riesgo de cada contaminante presentes en la evidencia científica para el SO_2 y O_3 . Respecto al plomo, no existe evidencia respecto a un coeficiente de riesgo asociado a mortalidad por exposición a este contaminante, por lo que no se pudo incluir en el análisis. Para el SO_2 no se pudo estimar los beneficios para la norma anual dado que solo se cuenta con betas de salud a corto plazo, principalmente debido a la escasa evidencia de los efectos adversos a largo plazo para el SO_2 . El análisis no se considera la evaluación de las normas propuestas para el CO dado que las tecnologías existentes asociadas al control de emisiones de CO no reducen directamente este contaminante, sino que su acción es a través de la reducción del MP. Además, de que en el diagnóstico de cumplimiento normativo y en el diagnóstico de cumplimiento de los escenarios propuestos, no se identificaron zonas saturadas.

Usando el porcentaje de reducción de concentraciones anual, se estimó la reducción de emisiones requerida para poder cumplir con las propuestas. Cabe destacar que la reducción potencial de emisiones, dadas las fuentes por zonas y las tecnologías de abatimiento existentes, pueden no ser suficientes para poder alcanzar lo requerido por la norma. Esto es especialmente relevante en el caso del análisis de O_3 . En Huasco y Quillota las alternativas de mitigación empleadas para alcanzar la norma actual reducen a tal nivel las concentraciones, que no se necesitan reducciones adicionales para cumplir con las propuestas 1 y 2. De manera similar

ocurre con San Fernando, ya que el cumplimiento de la propuesta 1 implica el cumplimiento de la propuesta 2. En el caso de Rengo y Santiago sucede lo opuesto, ya que las medidas de reducción de emisiones no permiten reducir las concentraciones y alcanzar los estándares propuestos, ni siquiera la norma actual. Debido a esto, no aparecen beneficios adicionales en los escenarios más exigentes, ya que no se estaría cumpliendo con esos estándares. Cabe recordar que los costos que se consideran corresponden a medidas de fuentes fijas y la principal fuente de emisiones de NO_x asociada a las concentraciones de O_3 corresponden a fuentes móviles. Las principales fuentes que reducen emisiones, y que por tanto generan mayores costos, son los Hornos de Fusión, Hornos de Proceso, Convertidor Pierce Smith (CPS) y Calderas Industriales.

Del análisis costo beneficio se desprende que en el caso del SO_2 , Catemu es la zona que presenta los valores más elevados, alcanzando costos de UF 5.228 miles para la propuesta 1. Este valor se triplica cuando se considera el estándar más elevado de la propuesta 2. Coronel le sigue, pero con valores definitivamente menores. Esto se debe a que en ambos lugares se mantienen fuentes de emisión como la Fundición Chagres y el Complejo Termoeléctrico Santa María por el período analizado. Si bien en Machalí también se mantiene la Fundición Caletones, las concentraciones que se proyectan en esta zona no superan los escenarios propuestos. Para la norma de O_3 , Concón presenta los costos más altos, con UF 44 miles y UF 66 miles para los escenarios 1 y 2. Sin embargo, los beneficios no son de la misma magnitud, arrojando relaciones de beneficio/costo del orden de 0.10. San Fernando sí presenta indicadores de 1,63, indicando una superación de los beneficios por sobre los costos, en ambos escenarios.

12. Bibliografía

- 40 CFR Part 50: Secondary National Ambient Air Quality Standards for Oxides of Nitrogen and Sulfur (2012). <https://www.federalregister.gov/documents/2012/04/03/2012-7679/secondary-national-ambient-air-quality-standards-for-oxides-of-nitrogen-and-sulfur>
- AcademiaLab. (n.d.). *Espectroscopia de anillo de cavidad*. Retrieved February 20, 2024, from <https://academia-lab.com/enciclopedia/espectroscopia-de-anillo-de-cavidad/>
- Alberti, K., Eckel, R., Grundy, S., Zimmet, P., Cleeman, J., Donato, K., Fruchart, J., James, W., Loria, C., & Smith, S. (2009). Harmonizing the metabolic syndrome: A joint interim statement of the International Diabetes Federation Task Force on Epidemiology and Prevention; National Heart, Lung, and Blood Institute; American Heart Association; World Heart Federation; International Atherosclerosis Society; and International Association for the Study of Obesity. In *Circulation* (Vol. 120, pp. 1640–1645). <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.109.192644>
- ATSDR. (2007). *Resumen de Salud Pública Plomo*. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs13.pdf
- ATSDR. (2020). *Toxicological Profile for Lead*.
- AyT Grupo. (n.d.). *Monitor Ambiental de Multi-Metales XACT 625i*. Ambiente y Tecnología Ltda. Retrieved October 10, 2024, from <https://www.ayt.cl/catalogo-de-productos/monitores-continuos-de-metales/metales-en-aire-ambiente/monitor-ambiental-de-multi-metales-xact-625i/>
- Balchum, O., Dybicki, J., & Meneely, G. (1959). Absorption and distribution of S35O2 inhaled through the nose and mouth by dogs. In *Am J Physiol* (Vol. 197, pp. 1317–1321).
- Balchum, O., Dybicki, J., & Meneely, G. (1960). The dynamics of sulfur dioxide inhalation: Absorption, distribution, and retention. In *AMA Arch Ind Health* (Vol. 21, pp. 564–569).
- Baran, M., Baran, A., & Aktepe, N. (2022). Effects of chronic exposure to lead on some organs. *Int Target Med J* 2022;1(1), 18–22.
- Beck, J. P., Krzyzanowski, M., Koffi, B., European Commission., & European Environment Agency. (1999). *Tropospheric ozone in the European Union: the consolidated report*. Office for Official Publications of the European Communities.
- Beijing Municipality. (2018). *Heavy Air Pollution Contingency Plan*. https://english.beijing.gov.cn/latest/lawsandpolicies/202007/t20200723_1957677.html
- Bell, M., Davis, D. L., & Fletcher, T. (2004). A retrospective assessment of mortality from the London smog episode of 1952: The role of influenza and pollution. *Environmental Health Perspectives*, 112(1), 6–8. <https://doi.org/10.1289/ehp.6539>
- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2002). *Transport Phenomena* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc. [https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/AdvancedMaterialsThermodynamics/Books/R.%20Byron%20Bird,%20Warren%20E.%20Stewart,%20Edwin%20N.%20Lightfoot%20-%20Transport%20Phenomena,%202nd%20Edition-Wiley%20\(2001\).pdf](https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/AdvancedMaterialsThermodynamics/Books/R.%20Byron%20Bird,%20Warren%20E.%20Stewart,%20Edwin%20N.%20Lightfoot%20-%20Transport%20Phenomena,%202nd%20Edition-Wiley%20(2001).pdf)
- Briet, M., Collin, C., Laurent, S., Tan, A., Azizi, M., Agharazii, M., Jeunemaitre, X., Alhenc-Gelas, F., & Boutouyrie, P. (2007). Endothelial function and chronic exposure to air pollution in normal

- male subjects . *Hypertension*, 50(5), 970–976.
<https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.107.095844>
- BRYDGES, T., & WILSON, R. (1990). *LLUVIA ÁCIDA DESDE 1985 - LOS TIEMPOS ESTÁN CAMBIANDO*.
- Cai, J., Zhao, A., Zhao, J., Chen, R., Wang, W., Ha, S., Xu, X., & Kan, H. (2014). Acute effects of air pollution on asthma hospitalization in Shanghai, China. *Environmental Pollution*, 191, 139–144. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.04.028>
- CDC, Starr, T. M., Jones, T. F., Boulton, M. L., Caine, V. A., Daniel, K. L., Fielding, J. E., Fleming, D. W., Halperin, W. E., Holmes, K. K., Ikeda, R., Khabbaz, R. F., Meadows, P., Mullen, J., Niederdeppe, J., Quinlisk, P., Remington, P. L., Roig, C., Roper, W. L., & Schaffner, W. (2017). Childhood Blood Lead Levels in Children Aged <5 Years — United States, 2009–2014. In *Summ* (Vol. 66, Issue 3). <https://www.cdc.gov/mmwr/volumes/66/ss/pdfs/ss6603.pdf>
- CENMA. (2012). *Evaluación de riesgos a la salud de la población por la presencia de Polimetales en la matriz suelo, en la ciudad de Arica*.
- CENMA. (2015). *Determinación de la calidad del aire y evaluación de riesgo en la comuna de Arica por la presencia de Polimetales en la matriz suelo*.
- Chuang, K., Coull, B., Zanobetti, A., Suh, H., Schwartz, J., Stone, P., Litonjua, A., Speizer, F., & Gold, D. (2008). Particulate air pollution as a risk factor for ST-segment depression in patients with coronary artery disease . *Circulation*, 118(13), 1314–1320.
<https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.108.765669>
- CMN. (n.d.). *AGUADA LA CHIMBA*. Retrieved June 10, 2024, from <https://www.monumentos.gob.cl/monumentos/santuarios-de-la-naturaleza/aguada-chimba>
- CODELCO. (n.d.). *División el Teniente*. Retrieved October 5, 2024, from <https://www.codelco.com/division-el-teniente>
- CONAF. (n.d.-a). *Parque Nacional Llullaillaco*. Conaf.Cl. Retrieved September 24, 2024, from https://www.conaf.cl/parque_nacionales/parque-nacional-llullaillaco/#:~:text=Se%20localiza%20en%20la%20cordillera,de%20diciembre%20del%20mismo%20a%C3%B1o
- CONAF. (n.d.-b). *Parque Nacional Nevado de Tres Cruces*. Retrieved June 10, 2024, from https://www.conaf.cl/parque_nacionales/parque-nacional-nevado-de-tres-cruces/
- CONAF. (n.d.-c). *Reserva Nacional Río de Los Cipreses*. Retrieved October 5, 2024, from https://www.conaf.cl/parque_nacionales/reserva-nacional-rio-de-los-cipreses/
- CONAMA. (2006). *Diagnóstico y monitoreo de la calidad del aire en las comunas de Arica e Iquique*.
- CONAMA. (2009). *Diagnóstico y seguimiento calidad del aire para Arica – Iquique – Alto Hospicio*.
- CONAMA, & PNUD. (2005). *Estrategia y plan de acción para la conservación de la diversidad biológica, Región de Valparaíso*. https://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-48841_EstrategiaRegionalBiodiversidadPDA_5.pdf
- Coogan, P., White, L., Yu, J., Brook, R., Burnett, R., Marshall, J., Bethea, T., Rosenberg, L., & Jerrett, M. (2017). Long-term exposure to NO₂ and ozone and hypertension incidence in the black women’s health study . *American Journal of Hypertension*, 30(4), 367–372.
<https://doi.org/10.1093/ajh/hpw168>

- Crouse, D., Peters, P., Hystad, P., Brook, J., van Donkelaar, A., Martin, R., Villeneuve, P., Jerrett, M., Goldberg, M., Pope, C., Brauer, M., Brook, R., Robichaud, A., Menard, R., & Burnett, R. (2015). Ambient PM 2.5, O₃, and NO₂ exposures and associations with mortality over 16 years of follow-up in the Canadian Census Health and Environment Cohort (CanCHEC). *Environmental Health Perspectives*, 123(11), 1180–1186. <https://doi.org/10.1289/ehp.1409276>
- CS Analytical. (2022). *Comparison of atomic spectroscopy techniques and the advantages of ICP-MS vs AA & ICP-OES*. <https://csanalytical.com/comparison-atomic-spectroscopy-techniques-advantages-icp-ms-vs-aa-icp-oes/>
- Decreto 7 DECLARA SANTUARIO DE LA NATURALEZA DESEMBOCADURA RÍO LOA, Pub. L. No. Decreto 7 (2024). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1205701>
- Decreto 14 | DECLARA SANTUARIO DE LA NATURALEZA AGUADA LA CHIMBA, Pub. L. No. Decreto 14 (2021). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1163572>
- Decreto 31 DECLARA SANTUARIO DE LA NATURALEZA HUMEDAL ARAUCO - DESEMBOCADURA RÍO CARAMPANGUE (2022). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1176013>
- Decreto 43 | DECLARA SANTUARIO DE LA NATURALEZA ITATA - GUALAGUALA, Pub. L. No. Decreto 43 (2022). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1180014>
- Decreto 52 DECLARA SANTUARIO DE LA NATURALEZA HUMEDAL TUBUL-RAQUI, Pub. L. No. DECRETO 52 (2024). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1206122>
- Degner, M., Damaschke, N., Ewald, H., O’Keeffe, S., & Lewis, E. (2009). UV LED-based fiber coupled optical sensor for detection of ozone in the ppm and ppb range. *Proceedings of IEEE Sensors*, 95–99. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2009.5398230>
- Den Hond, E., Nawrot, T., & Staessen, J. A. (2002). The relationship between blood pressure and blood lead in NHANES III. *Journal of Human Hypertension*, 16(8), 563–568. <https://doi.org/10.1038/sj.jhh.1001452>
- Desye, B., Tesfaye, A. H., Berihun, G., Ademas, A., & Sewunet, B. (2023). A systematic review of the health effects of lead exposure from electronic waste in children. In *Frontiers in Public Health* (Vol. 11). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1113561>
- Di, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., Choirat, C., Dominici, F., & Schwartz, J. D. (2017). Air Pollution and Mortality in the Medicare Population. *New England Journal of Medicine*, 376(26), 2513–2522. <https://doi.org/10.1056/nejmoa1702747>
- EcuRed. (n.d.). *Partículas en suspensión*. Retrieved June 6, 2024, from https://www.ecured.cu/Part%C3%ADculas_en_suspensi%C3%B3n#Part.C3.ADculas_en_suspensi.C3.B3n
- EPA. (2014). *Integrated science assessment for lead. Contains errata sheet created 5/12/2014*. U.S. Environmental Protection Agency. EPA600R10075F.
- Eurofins. (2024, July 11). *Medida de calidad del aire mediante captadores pasivos difusivos*. Eurofins Enviroment Testing Spain. <https://www.eurofins-environment.es/es/captadores-pasivos-medida-de-calidad-del-aire/>
- European Environment Agency. (2023, January 26). *World Health Organization (WHO) air quality guidelines (AQGs) and estimated reference levels (RLs)*. <https://www.eea.europa.eu/publications/status-of-air-quality-in-Europe-2022/europes-air-quality-status-2022/world-health-organization-who-air>

- Figueroa Aldunce, E. (2014). *INCIDENCIA DE LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS EN EL IMPACTO DE LAS EMISIONES DE DIÓXIDO DE AZUFRE: APOORTE A LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA COMUNA DE MACHALÍ*. <https://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Figueroa%20Elvira.pdf>
- Gallardo, L., Olivares, G., Langner, J., & Aarhus, B. (2002). *Coastal lows and sulfur air pollution in Central Chile*. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00285-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00285-6)
- Gameli, P. S., Fleming, G., Walton, M., & Gluodenis, T. (2022). Human Health Effects from Exposure to Lead: A Review of the Current Literature. *American Journal of Biomedical and Life Sciences*, 10(5), 135–145. <https://doi.org/10.11648/j.ajbls.20221005.12>
- García-Huidobro, T., Marshall, F. M., & Bell, J. N. B. (2001). A risk assessment of potential agricultural losses due to ambient SO₂ in the central regions of Chile. In *Atmospheric Environment* (Vol. 35).
- GEF Humedales Costeros del Centro Sur de Chile. (n.d.). *Humedal de Mantagua*. Retrieved September 24, 2024, from <https://gefhumedales.mma.gob.cl/pilotos/humedal-de-mantagua/#:~:text=El%20Humedal%20de%20Mantagua%20fue,la%20Conservaci%C3%B3n%20de%20los%20Murci%C3%A9lagos>
- GreenLab Dictuc. (2022). *ACTUALIZACIÓN DE COEFICIENTES DE RIESGO PARA EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA SALUD*.
- Guo, H., & Chen, M. (2018). Short-term effect of air pollution on asthma patient visits in Shanghai area and assessment of economic costs. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 161, 184–189. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.05.089>
- Hewitt, C. N., Lucas, P., Wellburn, A. R., & Fall, R. (1990). *Chemistry of ozone damage to plants* (Vol. 15). Chemical Industries.
- HJ 633—2012: Technical Regulation on Ambient Air Quality Index (2012).
- Huangfu, P., & Atkinson, R. (2020). Long-term exposure to NO₂ and O₃ and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. In *Environment International* (Vol. 144). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105998>
- IARC. (2006). *IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Volume 87. Inorganic and organic lead compounds*. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer. International Agency for Research on Cancer. <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol87/mono87.pdf>. May 4, 2017.
- Ibald-Mulli, A., Stieber, J., Wichmann, H., Koenig, W., & Peters, A. (2001). Effects of air pollution on blood pressure: A population-based approach. *American Journal of Public Health*, 91(4), 571–577.
- IBM-Micromedex. (2023). *LEAD POISINDEX® System (electronic version)*. IBM Watson Health, Greenwood Village, Colorado, USA. Available at: <https://www.micromedexsolutions.com/> (cited: 019/12/2023).
- IRIS. (2004). *Lead and compounds (inorganic) (CASRN 7439-92-1) | IRIS | US EPA*. <http://www.cdc.gov/nceh/lead/spotLights/changeBLL.htm>
- Ito, K., Thurston, G. D., & Silverman, R. A. (2007). Characterization of PM_{2.5}, gaseous pollutants, and meteorological interactions in the context of time-series health effects models. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 17(S2), S45–S60. <https://doi.org/10.1038/sj.jes.7500627>

- Jerrett, M., Brook, R., White, L., Burnett, R., Yu, J., Su, J., Seto, E., Marshall, J., Palmer, J., Rosenberg, L., & Coogan, P. (2017). Ambient ozone and incident diabetes: A prospective analysis in a large cohort of African American women . *Environment International*, 102, 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.011>
- Jerrett, M., Burnett, R., Pope, C. I., Ito, K., Thurston, G., Krewski, D., Shi, Y., Calle, E., & Thun, M. (2009). Long-term ozone exposure and mortality. *New England Journal of Medicine*, 360(11), 1085–1095. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa0803894>
- Kavouras, I. G., Koutrakis, P., Cereceda-Balic, F., & Oyola, P. (2001). Source Apportionment of PM 10 and PM 2.5 in Five Chilean Cities Using Factor Analysis. In *Journal of the Air & Waste Management Association* (Vol. 51). <https://doi.org/10.1080/10473289.2001.10464273>
- Kim, J., & Hong, Y. (2012). GSTM1, GSTT1, and GSTP1 polymorphisms and associations between air pollutants and markers of insulin resistance in elderly Koreans . *Environmental Health Perspectives*, 120(10), 1378–1384. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104406>
- Ko, F. W. S., Tam, W., Wong, T. W., Lai, C. K. W., Wong, G. W. K., Leung, T. -F., Ng, S. S. S., & Hui, D. S. C. (2007). Effects of air pollution on asthma hospitalization rates in different age groups in Hong Kong. *Clinical & Experimental Allergy*, 37(9), 1312–1319. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.2007.02791.x>
- LADCO. (n.d.). *High concentrations of ground-level ozone are a problem in and near urban areas and along the Lake Michigan shoreline*. Retrieved June 4, 2024, from <https://www.ladco.org/public-issues/ozone/>
- Lanphear, B. P., Rauch, S., Auinger, P., Allen, R. W., & Hornung, R. W. (2018). Low-level lead exposure and mortality in US adults: a population-based cohort study. *The Lancet Public Health*, 3(4), e177–e184. [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(18\)30025-2](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(18)30025-2)
- Larrain, S., & Melej, G. (2023). *Retiro del Carbón al 2030: Avances y tareas pendientes en el cronograma de descarbonización en Chile*.
- Lee, J.-T., Son, J.-Y., Kim, H., & Kim, S.-Y. (2006). Effect of Air Pollution on Asthma-Related Hospital Admissions for Children by Socioeconomic Status Associated With Area of Residence. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 61(3), 123–130. <https://doi.org/10.3200/AEOH.61.3.123-130>
- Lee, K. K., Spath, N., Miller, M. R., Mills, N. L., & Shah, A. S. V. (2020). Short-term exposure to carbon monoxide and myocardial infarction: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105901>
- Ley 21600 Crea El Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas y El Sistema Nacional de Áreas Protegidas, Pub. L. No. Ley 21600 (2023). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1195666>
- López Martínez, J. L., & Mandujano Mejía, C. (2005). Sistema de Absorción Óptica Diferenciada del Espectro (DOAS) para evaluar la calidad del aire. In *Revista CENIC Ciencias Químicas* (Vol. 36). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181620511024>
- Mark Baldigowski. (2011, September 1). *The pros and cons of electrochemical sensors*. Safety+Health . <https://www.safetyandhealthmagazine.com/articles/the-pros-and-cons-of-electrochemical-sensors-2>
- MIDESO. (2024). *PRECIOS SOCIALES REPORTE ANUAL 2024*. https://sni.gob.cl/storage/docs/Informe_precios_sociales_2024_SNI-Chile.pdf

- Miller, D., Ghio, A., Karoly, E., Bell, L., Snow, S., Madden, M., Soukup, J., Cascio, W., Gilmour, M., & Kodavanti, U. (2016). Ozone exposure increases circulating stress hormones and lipid metabolites in humans. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 193(12), 1382–1391. <https://doi.org/10.1164/rccm.201508-1599OC>
- MMA. (2015). *Estrategia regional y plan de acción para la biodiversidad, Región del Biobío*. https://biodiversidad.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/05/articles-48847_EstrategiaRegionalBiodiversidadPDA_8.pdf
- MMA. (2021, August 4). *Aguada La Chimba es reconocida oficialmente como el primer humedal urbano de la región de Antofagasta*. <https://mma.gob.cl/aguada-la-chimba-es-reconocida-oficialmente-como-el-primer-humedal-urbano-de-la-region-de-antofagasta/>
- Municipalidad de Puchuncaví. (2018). *PLAN MUNICIPAL DE CULTURA DE PUCHUNCAVÍ 2018-2022*. <https://www.cultura.gob.cl/redcultura/wp-content/uploads/sites/69/2023/06/pmc-Puchuncaví-2018-2022.pdf>
- NAS. (2013). *Potential Health Risks to DOD Firing-Range Personnel from Recurrent Lead Exposure*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/18249>
- Nieboer, E., Richardson, D., Puckett, K., & Tomassini, F. (1976). The phytotoxicity of sulphur dioxide in relation to measurable responses in lichens. In T. A. Mansfield (Ed.), *Society for Experimental Biology, Seminar Series: Volume 1, Effects of Air Pollutants on Plants* (Vol. 1). Cambridge University Press.
- Nishimura, K., Galanter, J., Roth, L., Oh, S., Thakur, N., Nguyen, E., Thyne, S., Farber, H., Serebrisky, D., Kumar, R., Brigino-Buenaventura, E., Davis, A., Lenoir, M., Meade, K., Rodriguez-Cintrón, W., Avila, P., Borrell, L., Bibbins-Domingo, K., Rodriguez-Santana, J., ... Burchard, E. (2013). Early-life air pollution and asthma risk in minority children: the GALA II and SAGE II studies. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 188(3), 309–318. <https://doi.org/10.1164/rccm.201302-0264OC>
- NORTHERN SIERRA AIR QUALITY MANAGEMENT DISTRICT. (2020). *Ozone Emergency Episode Plan*.
- NTP. (2021). *Lead and lead compounds, CAS No. 7439-92-1 (lead). Report on carcinogens. Research Triangle Park, NC: National Toxicology Program. Report on Carcinogens, Fifteenth Edition*. <http://ntp.niehs.nih.gov/go/roc>
- NYS DEC. (n.d.). *Air Pollution Episode: Alert Criteria effective December 2018*. New York State Department of Environmental Conservation. Retrieved May 19, 2024, from <https://dec.ny.gov/environmental-protection/air-quality/state-implementation-plans-and-state-plans/air-pollution-episode>
- OMS. (2021). *WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>
- Orellano, P., Reynoso, J., & Quaranta, N. (2021). Short-term exposure to sulphur dioxide (SO2) and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 150, 106434. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106434>
- Orellano, P., Reynoso, J., Quaranta, N., Bardach, A., & Ciapponi, A. (2020). Short-term exposure to particulate matter (PM10 and PM2.5), nitrogen dioxide (NO2), and ozone (O3) and all-

- cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis. In *Environment International* (Vol. 142). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105876>
- Ospina Montoya, A., & Garrido Tamayo, M. Á. (2013). Técnicas de medición de ozono: Métodos tradicionales frente al método de cámara de absorción con led ultravioleta como fuente de luz. *Gestión y Ambiente*, 16(2), 95–104. <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169428420008.pdf>
- Peters, A., Dockery, D., Muller, J., & Mittleman, M. (2001). Increased particulate air pollution and the triggering of myocardial infarction. *Circulation*, 103(23), 2810–2815. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.103.23.2810>
- Picarro. (n.d.). *Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS)*. Retrieved February 20, 2024, from <https://www.picarro.com/company/technology/crds#:~:text=Picarro%20analyzers%20use%20a%20three,fills%20with%20circulating%20laser%20light.>
- Public Health England. (2015). *Sulphur Dioxide Incident Management*. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7486c740f0b616bcb17318/sulphur_dioxide_incident_management.pdf
- Raub, J., & Benignus, V. (2002). Carbon monoxide and the nervous system. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 26(8), 925–940. [https://doi.org/10.1016/S0149-7634\(03\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S0149-7634(03)00002-2)
- Raw Materials. (2023). *What are the advantages and disadvantages of using x-ray fluorescence (XRF) for raw material analysis?* <https://www.linkedin.com/advice/0/what-advantages-disadvantages-using-x-ray-fluorescence#:~:text=One%20of%20the%20main%20disadvantages,calibration%20standards%2C%20and%20instrument%20performance>
- Renzi, M., Cerza, F., Gariazzo, C., Agabiti, N., Cascini, S., Di Domenicantonio, R., Davoli, M., Forastiere, F., & Cesaroni, G. (2017). Air pollution and occurrence of type 2 diabetes in a large cohort study. *Environment International*, 112, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.12.007>
- Rojas, L., & Garibay, V. (2003). Las partículas suspendidas, aeropartículas o aerosoles: ¿hacen daño a la salud?; ¿podemos hacer algo? *Gaceta Ecológica*, 69, 29–44. <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906902.pdf>
- RONDON.I, RAMÍREZ.W, BARATO.P, & ESLAVA.P. (2007). *Importancia del ciclo biogeoquímico del aluminio (Al) con relación con la acidez de los suelos en la producción piscícola y la salud pública ¿cuál sería el caso de la Orinoquia?* <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=89611209>
- Samoli, E., Nastos, P. T., Paliatsos, A. G., Katsouyanni, K., & Priftis, K. N. (2011). Acute effects of air pollution on pediatric asthma exacerbation: Evidence of association and effect modification. *Environmental Research*, 111(3), 418–424. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2011.01.014>
- Sanders, G. E., Skarby, L., Ashmore, M. R., & Fuhrer, J. (1995). *ESTABLISHING CRITICAL LEVELS FOR THE EFFECTS OF AIR POLLUTION ON VEGETATION*.
- Secondary National Ambient Air Standards for Oxides of Nitrogen and Sulfur (2012). www.regulations.gov
- Serey, I., Smith-Ramirez, C., De la barrera, F., Moraga, S., Ricci, M., Lobos, P., & Gonzalez, T. (2007). *Sitios Prioritarios de la Región de O'Higgins*.

- Sha, C., Wang, T., & Lu, J. (2010). Relative sensitivity of wetland plants to SO₂ pollution. *Wetlands*, 30(6), 1023–1030. <https://doi.org/10.1007/s13157-010-0095-x>
- SIMBIO. (n.d.-a). *Búsqueda en Áreas Protegidas*. SISTEMA DE INFORMACIÓN Y MONITOREO DE BIODIVERSIDAD. Retrieved September 24, 2024, from <https://simbio.mma.gob.cl/CbaAP>
- SIMBIO. (n.d.-b). *Búsqueda en Sitios Prioritarios*. SISTEMA DE INFORMACIÓN Y MONITOREO DE BIODIVERSIDAD. Retrieved September 24, 2024, from <https://simbio.mma.gob.cl/CbaSP>
- SIMBIO. (n.d.-c). *Parque Nacional “Desierto Florido.”* Retrieved September 9, 2024, from <https://simbio.mma.gob.cl/CbaAP/Details/2080>
- SIMBIO. (n.d.-d). *Sitio Prioritario (Ley 19.300 art. 11, letra d) “Cordillera El Melón.”* Retrieved September 24, 2024, from <https://simbio.mma.gob.cl/CbaSP/Details/1385>
- SIMBIO. (n.d.-e). *Sitio Prioritario (Ley 19.300 art. 11, letra d) “Desembocadura Río Loa.”* Retrieved September 24, 2024, from <https://simbio.mma.gob.cl/CbaSP/Details/1369>
- SIMBIO. (n.d.-f). *Sitio Prioritario (Ley 19.300 art. 11, letra d) “Península de Mejillones.”* Retrieved August 22, 2024, from <https://simbio.mma.gob.cl/CbaSP/Details/1368#recursos>
- SIMBIO. (n.d.-g). *Sitio Prioritario (Ley 19.300 art. 11, letra d) “Salar de Pedernales y sus alrededores.”* Retrieved August 22, 2024, from <https://simbio.mma.gob.cl/CbaSP/Details/1423>
- SIMBIO. (n.d.-h). *Sitio Prioritario (Ley 19.300 art. 11, letra d) “Zona Desierto Florido.”* Retrieved August 22, 2024, from <https://simbio.mma.gob.cl/CbaSP/Details/1420#general>
- SMA. (2023a). *INFORME TÉCNICO CUMPLIMIENTO DE NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE POR MP2.5, MP10, PLOMO Y SO₂: REDES DE CALIDAD DEL AIRE PUCHUNCAVÍ, QUINTERO Y CONCÓN.* <https://snifa.sma.gob.cl/Fiscalizacion/Ficha/1059171>
- SMA. (2023b). *INFORME TÉCNICO CUMPLIMIENTO DE NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE POR MP10, PLOMO, MPS, NO₂ Y SO₂: REDES DE CALIDAD DEL AIRE DE HUASCO, REGIÓN DE ATACAMA.* <https://snifa.sma.gob.cl/Fiscalizacion/Ficha/1061441>
- SMA. (2023c). *INFORME TÉCNICO CUMPLIMIENTO DE NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE POR MP10, PLOMO Y SO₂: RED DE CALIDAD DEL AIRE DE COPIAPÓ Y TIERRA AMARILLA.* <https://snifa.sma.gob.cl/Fiscalizacion/Ficha/1061812>
- Standard Method for the Measurement of Pb, Cd, As and Ni in the PM₁₀ Fraction of Suspended Particulate Matter (2005). <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/374ad39c-7a3c-4eb4-9421-5ff2bec3f12e/en-14902-2005>
- Tiwari, S., Prasad, I., Mahatma, T., Chitrakoot, G., Vishwavidyalaya, G., Tiwari, H., Tripathi, I. P., & Tiwari, H. L. (2013). Effects of Lead on Environment. In *International Journal of Emerging Research in Management & Technology* (Issue 2). <https://www.researchgate.net/publication/274721823>
- Trost, B. (2016). *Standard Operating Procedures Ozone (O₃) Monitoring in Ambient Air by Ultraviolet Absorption Spectrophotometry.* <https://dec.alaska.gov/media/10556/sop-ozone-uv-sop-2016.pdf>
- Turner, M., Jerrett, M., Pope, A. I., Krewski, D., Gapstur, S., Diver, W., Beckerman, B., Marshall, J., Su, J., Crouse, D., & Burnett, R. (2016). Long-term ozone exposure and mortality in a large prospective study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 193(10), 1134–1142. <https://doi.org/10.1164/rccm.201508-1633OC>

- U.S. EPA. (1999a). *Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-11/documents/iocompen.pdf>
- U.S. EPA. (1999b). *DETERMINATION OF METALS IN AMBIENT PARTICULATE MATTER USING ATOMIC ABSORPTION (AA) SPECTROSCOPY*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-11/documents/mthd-3-2.pdf>
- U.S. EPA. (1999c). *DETERMINATION OF METALS IN AMBIENT PARTICULATE MATTER USING INDUCTIVELY COUPLED PLASMA (ICP) SPECTROSCOPY*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-11/documents/mthd-3-4.pdf>
- U.S. EPA. (1999d). *DETERMINATION OF METALS IN AMBIENT PARTICULATE MATTER USING INDUCTIVELY COUPLED PLASMA/ MASS SPECTROMETRY (ICP/MS)*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-11/documents/mthd-3-5.pdf>
- U.S. EPA. (1999e). *DETERMINATION OF METALS IN AMBIENT PARTICULATE MATTER USING PROTON INDUCED X-RAY EMISSION (PIXE) SPECTROSCOPY*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-11/documents/mthd-3-6.pdf>
- U.S. EPA. (1999f). *DETERMINATION OF METALS IN AMBIENT PARTICULATE MATTER USING X-RAY FLUORESCENCE (XRF) SPECTROSCOPY*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-11/documents/mthd-3-3.pdf>
- U.S. EPA. (2006). *Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants: Vol. I* (E. P. Agency, Ed.). U.S. Environmental Protection Agency. <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recorddisplay.cfm?deid=149923>
- U.S. EPA. (2010). *Integrated Science Assessment for Carbon Monoxide*. <https://www.epa.gov/isa/integrated-science-assessment-isa-carbon-monoxide>
- U.S. EPA. (2013). *Integrated Science Assessment for Ozone and Related Photochemical Oxidants*. <https://www.epa.gov/isa/integrated-science-assessment-isa-ozone-and-related-photochemical-oxidants>
- U.S. EPA. (2016a). *Air Quality Guide for Ozone*. www.airnow.gov
- U.S. EPA. (2016). *FACT SHEET: Final Method for the Determination of Lead in Total Suspended Particulate Matter*. <http://www.regulations.gov>
- U.S. EPA. (2016b). *LIST OF DESIGNATED REFERENCE AND EQUIVALENT METHODS*. <https://www3.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/criteria/AMTIC%20List%20Dec%202016-2.pdf>
- U.S. EPA. (2018). *Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI)*. *Office of Air Quality Planning and Standards*. <https://www.airnow.gov/sites/default/files/2020-05/aqi-technical-assistance-document-sept2018.pdf>
- U.S. EPA. (2020a). *Integrated Science Assessment for Oxides of Nitrogen, Oxides of Sulfur, and Particulate Matter - Ecological Criteria*. https://ordspub.epa.gov/ords/eims/eimscomm.getfile?p_download_id=541298
- U.S. EPA. (2020b). *Integrated Science Assessment for Ozone and Related Photochemical Oxidants*. <https://www.epa.gov/isa/integrated-science-assessment-isa-ozone-and-related-photochemical-oxidants>
- U.S. EPA. (2022). *Overview of Lead (Pb) Air Quality in the United States*. https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-08/Pb_2021_0.pdf

- U.S. EPA. (2023a). *Overview of Carbon Monoxide (CO) Air Quality in the United States*. https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-08/CO_2021.pdf
- U.S. EPA. (2023b). *Overview of Ozone (O3) Air Quality in the United States*. https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-08/O3_2021_0.pdf
- U.S. EPA. (2023c). *Overview of Sulfur Dioxide (SO2) Air Quality in the United States*. https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-08/SO2_2021.pdf
- U.S. EPA. (2023d, June 29). *Frequent Questions About Air Sensors*. <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/frequent-questions-about-air-sensors>
- U.S. EPA. (2024a). *Integrated Science Assessment for Lead Appendix 2: Exposure, Toxicokinetics, and Biomarkers*. <https://assessments.epa.gov/>
- U.S. EPA. (2024b). *Integrated Science Assessment (ISA) for Lead*. <https://assessments.epa.gov/isa/document/&deid=359536>
- U.S. EPA. (2024c). *List of Designated Reference and Equivalent Method*. www.epa.gov/ttn/amtic/criteria.html
- U.S. EPA. (2024d, April 3). *Asthma Action Plan*. <https://www.epa.gov/asthma/asthma-action-plan>
- US-EPA. (2008). *Integrated Science Assessment for Sulfur Oxides - Health Criteria*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/isa/integrated-science-assessment-isa-sulfur-oxides-health-criteria>
- US-EPA. (2017). *Integrated science assessment for sulfur oxides - Health criteria. December*. <https://www.epa.gov/isa/integrated-science-assessment-isa-sulfur-oxides-health-criteria>
- US-EPA. (2019). *Integrated Science Assessment for Particulate Matter. December 2019*. <https://www.epa.gov/isa/integrated-science-assessment-isa-particulate-matter>
- USEPA. (2023). *Control Strategy Tool (CoST) Cost Equations Documentation*.
- Vicedo-Cabrera, A. M., Sera, F., Liu, C., Armstrong, B., Milojevic, A., Guo, Y., Tong, S., Lavigne, E., Kyselý, J., Urban, A., Orru, H., Indermitte, E., Pascal, M., Huber, V., Schneider, A., Katsouyanni, K., Samoli, E., Stafoggia, M., Scortichini, M., ... Gasparrini, A. (2020). Short term association between ozone and mortality: global two stage time series study in 406 locations in 20 countries. *The BMJ*, 368. <https://doi.org/10.1136/bmj.m108>
- WHO. (2000). *Air Quality Guidelines for Europe*. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107335>
- WHO. (2006). *Air Quality Guidelines: Global update 2005*. <https://doi.org/10.1007/BF02986808>
- 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>
- Xing, W., Yang, H., Ippolito, J. A., Zhao, Q., Zhang, Y., Scheckel, K. G., & Li, L. (2020). Atmospheric deposition of arsenic, cadmium, copper, lead, and zinc near an operating and an abandoned lead smelter. *Journal of Environmental Quality*, 49(6), 1667–1678. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20151>
- Yang, B., Qian, Z., Li, S., Fan, S., Chen, G., Syberg, K., Xian, H., Wang, S., Ma, H., Chen, D., Yang, M., Liu, K., Zeng, X., Hu, L., Guo, Y., & Dong, G. (2018). Long-term exposure to ambient air pollution (including PM1) and metabolic syndrome: The 33 Communities Chinese Health

- Study (33CCHS) . *Environmental Research*, 164, 204–211.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.02.029>
- Zanobetti, A., Canner, M., Stone, P., Schwartz, J., Sher, D., Eagan-Bengston, E., Gates, K., Hartley, L., Suh, H., & Gold, D. (2004). Ambient pollution and blood pressure in cardiac rehabilitation patients. *Circulation*, 110(15), 2184–2189.
<https://doi.org/10.1161/01.cir.0000143831.33243.d8>
- Zanobetti, A., & Schwartz, J. (2011). Ozone and survival in four cohorts with potentially predisposing diseases . *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 184, 836–841. <https://doi.org/10.1164/rccm.201102-0227OC>
- Zeng, X., Huo, X., Xu, X., Liu, D., & Wu, W. (2020). E-waste lead exposure and children’s health in China. *Science of The Total Environment*, 734, 139286.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.139286>
- Zheng, X. yan, Orellano, P., Lin, H. liang, Jiang, M., & Guan, W. jie. (2021). Short-term exposure to ozone, nitrogen dioxide, and sulphur dioxide and emergency department visits and hospital admissions due to asthma: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 150, 106435. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106435>
- Ziegler, I. (1973). The effect of air-polluting gases on plant metabolism . In F. Coulston & F. Korte (Eds.), *Environmental Quality and Safety: Global Aspects of Chemistry, Toxicology and Technology as Applied to the Environment* (Vol. 2, pp. 182–208). Thieme, Academic Press .