

DEPARTAMENTO DE ECONOMÍA AMBIENTAL – MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE

ANÁLISIS GENERAL DE IMPACTO ECONÓMICO Y SOCIAL DEL
ANTEPROYECTO DE LA REVISIÓN DE LA NORMA DE EMISIÓN PARA
FUNDICIONES DE COBRE Y FUENTES EMISORAS DE ARSÉNICO

Noviembre de 2024

Presentación

El Ministerio del Medio Ambiente (MMA) es el encargado de coordinar el diseño y establecimiento de normas de calidad y de emisión, así como planes de descontaminación y/o prevención ambiental. De acuerdo con lo establecido en la ley N°19.300 sobre bases generales del medio ambiente y en el reglamento para la dictación de normas de calidad ambiental y de emisión (D.S. N°38/2012, del Ministerio del Medio Ambiente), se requiere de un Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) de la propuesta regulatoria, que sirva como apoyo a la Participación Ciudadana (PAC) y a la toma de decisiones enfocada principalmente en el Consejo de Ministros para la Sustentabilidad (CMS). Esta tarea recae en el Departamento de Economía Ambiental (DEA) del MMA.

El proceso de elaboración de una norma de emisión, desde el desarrollo del anteproyecto hasta su aprobación, contempla la elaboración de dos documentos:

- AGIES del anteproyecto (A-AP), para apoyar el proceso de participación ciudadana, y
- Actualización de costos y beneficios para el proyecto definitivo (A-PD), que corresponde a una actualización de los valores del AGIES del anteproyecto, según los cambios establecidos después del proceso de participación ciudadana para apoyar al CMS en la toma de decisión.

Es importante señalar que estos documentos son un apoyo a la toma de decisión de la autoridad y sirven para nutrir los procesos de PAC, el Consejo Consultivo (CC) y el CMS, por lo cual no debe ser considerado como el único o definitivo instrumento de evaluación. Tanto el AGIES del anteproyecto como la actualización de costos y beneficios para el proyecto definitivo corresponden a uno de los múltiples antecedentes para la toma de decisión. Otros antecedentes corresponden a, por ejemplo, antecedentes geográficos y demográficos, datos históricos, situación política y la percepción pública respecto a la contaminación, entre otros.

El presente documento corresponde a una evaluación de costos y beneficios para el anteproyecto A-AP (en rojo, Figura 1) de la revisión de la norma de emisión fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico, la que tiene por objetivo establecer nuevos límites regulatorio a las emisiones al aire de *dióxido de azufre* (SO₂), *Arsénico* (As) y *Material Particulado* (MP).

Figura 1: Etapas de evaluación de un instrumento de gestión ambiental.



Fuente: Elaboración propia.

Este análisis evalúa el impacto en la calidad del aire de la presente norma y estima los beneficios valorizables producto de la reducción de casos de mortalidad y morbilidad en la población. También se estiman los costos asociados al cumplimiento la norma propuesta.

Los resultados presentados corresponden a la norma definida a la fecha de cierre de este informe, las que podrían sufrir modificaciones en etapas posteriores, tales como PAC, CC o CMS.

Resumen

El presente AGIES corresponde a la evaluación del anteproyecto de la revisión del D.S N° 28 de 2013 que establece la norma de emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico, y tiene como objetivo, evaluar los beneficios y costos asociados a los límites regulatorios propuestos por el anteproyecto para *Dióxido de azufre* (SO₂), *Arsénico* (As), *Material Particulado*¹ (MP) y *Mercurio* (Hg). Considerando un límite de emisión para cada una de las fundiciones respecto de su emisión total (Artículo N°3), límites en la emisión de la concentración de salida de gases para chimeneas (Artículo N°6) y se establece un porcentaje de abatimiento a cumplir para cada una de las fundiciones (Artículo N° 4).

La metodología empleada en la elaboración del AGIES corresponde a un análisis costo-beneficio (ACB), en el que se llevan a términos monetarios los efectos (costos y beneficios) de la normativa en análisis. El ACB consideró la comparación de dos escenarios: situación de línea base o situación actual y situación con normativa. Los costos considerados corresponden a costos incrementales asociados al cumplimiento de los nuevos valores normativos, correspondiendo a aquellos de inversión, operación y mantenimiento (O&M) de medidas de abatimiento². Por su parte, los beneficios se consideran como los ahorros monetarios por reducciones de casos de morbilidad y mortalidad de la población debido a una mejora en las condiciones ambientales.

Los resultados del AGIES indican que:

- Para efecto de este AGIES se evaluaron las emisiones de las fundiciones: Chuquicamata, Altonorte, Potrerillos, Chagres, Caletones y Planta Tostación Ministro Hales. Cabe destacar que las fundiciones Ventanas y Hernan Videla Lira no fueron evaluada debido al cese de operaciones definidas a la fecha de evaluación.
- Del análisis del cumplimiento de los límites normativos, se desprende que existirán superaciones de los límites de emisión total (Artículo N°3), porcentaje de captura total (Artículo N°4) y los límites de algunas chimeneas (Artículo N°6), la Figura A presenta un resumen de estos resultados.
- Los costos para dar cumplimiento a los límites propuestos corresponden a 61 millones de USD por año y corresponden a la implementación de medidas de captura y abatimiento, en Tabla A se presentan los valores por fundición evaluada.
- Por su parte los beneficios asociados a la reducción de efectos de morbilidad y mortalidad prematura en la población corresponden a 1,5 millones de USD por año (Tabla B). los cuales se generarán en 9 localidades del país³.

¹ Solo aplicable a algunas chimeneas dentro del proceso de la fundición.

² No se consideran costos de Fiscalización, dado que estos ya fueron considerados en el D.S N° 28 de 2013.

³ Las localidades corresponden a las localidades de; Calama, Chiu Chiu, La Negra, Antofagasta, El Salvador, Catemu, Panquehue, Llay-Llay y Coya.

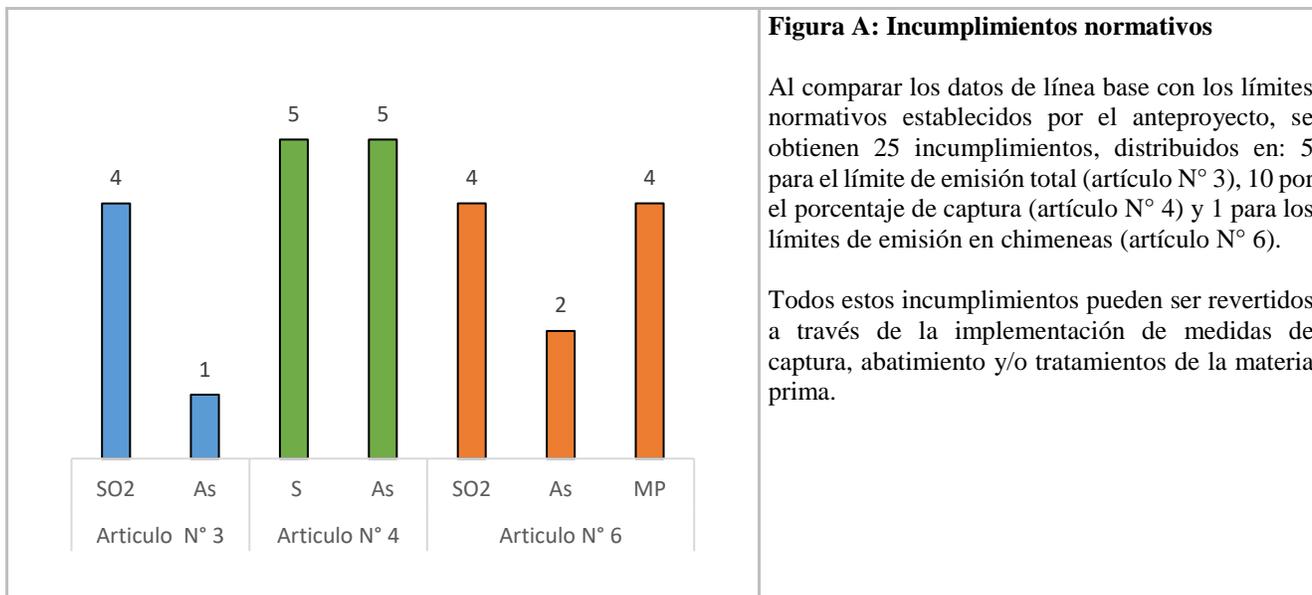


Figura A: Incumplimientos normativos

Al comparar los datos de línea base con los límites normativos establecidos por el anteproyecto, se obtienen 25 incumplimientos, distribuidos en: 5 para el límite de emisión total (artículo N° 3), 10 por el porcentaje de captura (artículo N° 4) y 1 para los límites de emisión en chimeneas (artículo N° 6).

Todos estos incumplimientos pueden ser revertidos a través de la implementación de medidas de captura, abatimiento y/o tratamientos de la materia prima.

Fundición ⁴	Inversión	O&M	Gestión de la operación	Total
AL	4,1	0,3	0,1	4,5
CAL	18,9	1,5	0,2	20,6
CHA	6,5	2,6	0,0	9,2
CHU	10,9	0,8	0,2	11,9
POT	13,6	1,0	0,2	14,8
Total	54,0	6,3	0,7	61,0

Tabla A: Costos de la normativa por contaminantes en MM USD/año

La tabla A presenta los costos por fundición de inversión para el cumplimiento de los límites regulatorios establecidos, considerando costos de detención para la instalación de las tecnologías y costos de gestión de la, cuando las medidas de abatimiento no son suficientes.

Se considera un costo total de USD 61 millones anuales.

⁴ AL= Altonorte, CAL=Caletones, CHA= Chagres, CHU= Chuquicamata y POT= Potrerillos

Efecto	Casos Evitados	Beneficios [USD/Año]
Mortalidad > 30 años+	19,3	1.514.381
Cáncer Respiratorio	0,001	80
AH -Cardiovascular < 64 años	2,7	1.209
AH -Cardiovascular > 65 años	3,9	1.399
AH -Efectos Respiratorios agudos	14,5	392
AH - Efectos Respiratorios Crónicos	0,17	8,4
AH -Asma	0,15	6,3
VSE- Asma 0-99 años	638,5	6.242
Días de Productividad perdidos	202,9	467
Total	-	1.524.204

Tabla B: N° de casos evitados y beneficios económicos.

La reducción de casos más importante corresponde a la reducción de mortalidad en mayores de 30 años, cuyo beneficio corresponde al 99,6% de los beneficios cuantificados por la evaluación, si bien existen otros efectos cuantificados que se ven reducidos, estos son menores en comparación con el primero.

Se estimó en 1,5 millones de USD los beneficios anualizados los cuales corresponden a las comunas de Calama, Chiu Chiu, Antofagasta, Antofagasta, El Salvador, Catemu, Panquehue, Llay-Llay y Coya.

AH= Admisiones Hospitalarias, VSE= Visita a la Sala de Emergencias

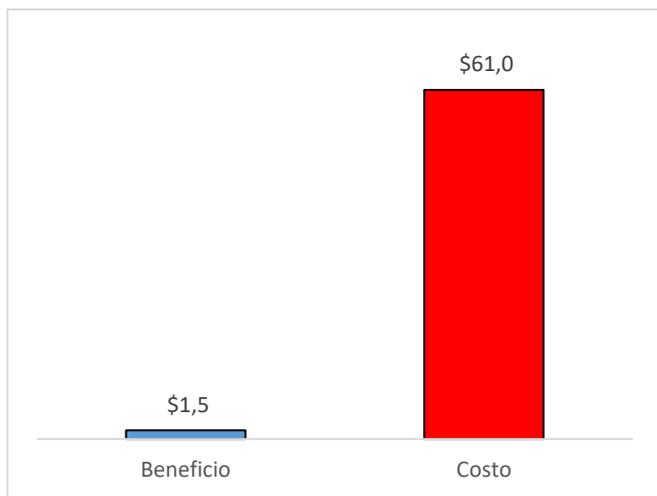


Figura B: Razón Beneficio Costo.

Al comparar los beneficios (1,5 MM USD) y los costos (61 MM USD) de la regulación, se obtiene una relación de 0,025 veces los beneficios versus los costos.

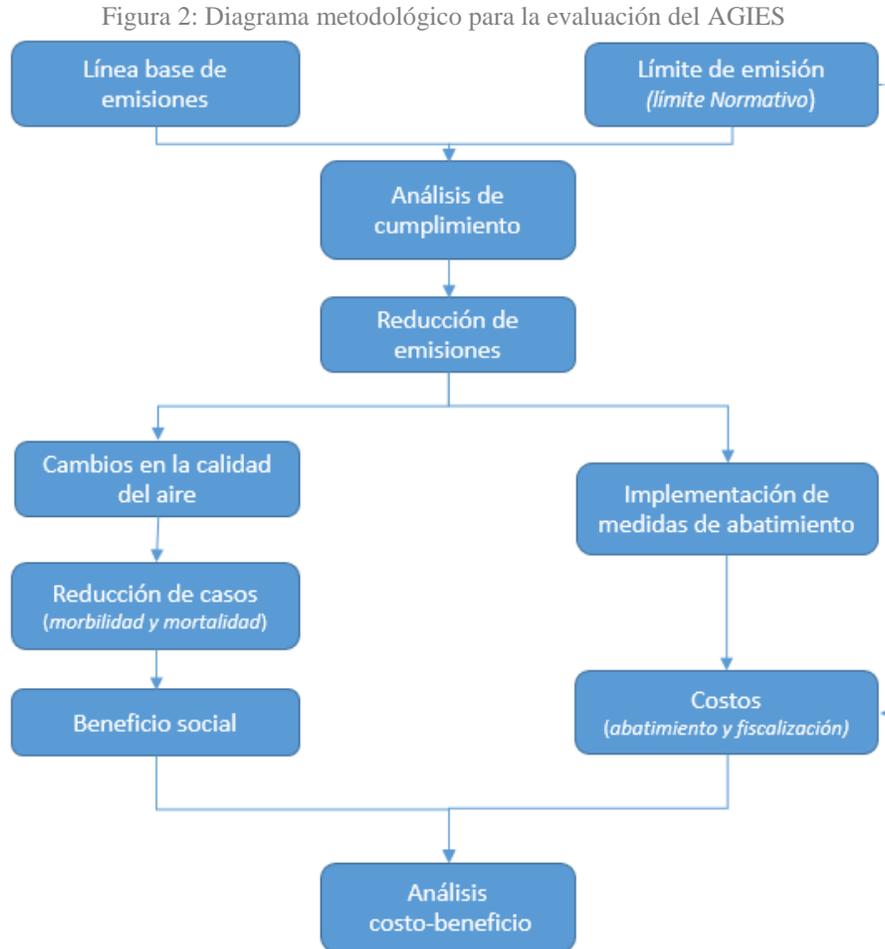
ÍNDICE

RESUMEN	3
1. METODOLOGÍA GENERAL DEL AGIES	7
1.1 FUENTES EVALUADAS.....	10
1.2 LIMITES REGULATORIOS EVALUADOS.....	10
1.3 EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES.....	11
1.3.1 Línea base para la norma total de emisiones.....	11
1.3.2 Línea base de porcentaje de captura de Azufre y Arsénico.....	13
1.3.3 Línea base de concentración de salida para chimeneas.....	13
1.4 ANÁLISIS DE CUMPLIMIENTO.....	15
1.4.1 Metodología de cumplimiento norma total de emisiones.....	15
1.4.2 Metodología de cumplimiento de norma de porcentaje de captura para Azufre y Arsénico.....	15
1.4.3 Metodología cumplimiento norma concentraciones de salida para chimeneas.....	16
1.5 REDUCCIÓN DE EMISIONES.....	16
1.6 BENEFICIOS Y COSTOS.....	17
2. RESULTADOS	19
2.1 ANÁLISIS DE CUMPLIMIENTO NORMATIVO.....	19
2.1.1 Cumplimiento norma de concentración de salida para chimeneas.....	19
2.1.2 Cumplimiento norma porcentaje de captura Azufre y Arsénico.....	20
2.1.3 Cumplimiento norma total de emisiones.....	21
2.2 REDUCCIÓN DE EMISIONES.....	22
2.3 COSTOS.....	24
2.3.1 Costos por reducción de la emisión.....	24
2.4 BENEFICIOS.....	25
2.5 ANÁLISIS COSTO BENEFICIO.....	27
3. CONCLUSIONES	27
4. BIBLIOGRAFÍA	28
5. ANEXOS	29
5.1 METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE COSTOS.....	29
5.2 METODOLOGÍA DE BENEFICIOS EN SALUD.....	31
5.2.1 Coeficientes de Dosis-Respuesta.....	32
5.3 RELACIÓN FUNDICIÓN COMUNA.....	33
5.4 MEDIDAS SELECCIONADAS POR FUNDICIÓN.....	33

1. Metodología general del AGIES

La metodología empleada en la elaboración del AGIES es el análisis de costos y beneficios (ACB), donde se generan diferentes indicadores que dan respuesta a los efectos de la implementación de una política pública, aportando antecedentes para el proceso normativo y la toma de decisión.

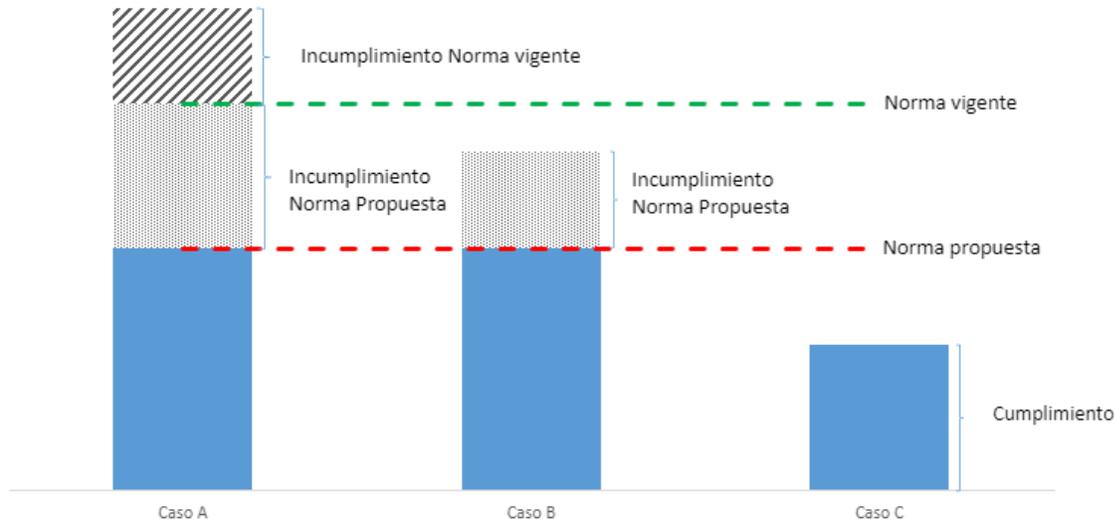
Los indicadores son elaborados utilizando una serie de análisis o modelos que permiten relacionar cambios en las emisiones al aire producto de un escenario de norma, con los beneficios y costos percibidos por los diferentes agentes impactados de la regulación. Por ello, el análisis integra (i) una sección de generación de línea base de la emisión de los contaminantes normados para cada una de las fuentes, cuya proyección se realiza entre los años 2035 al año 2044, (ii) un modelo que compara la línea base con los límites normativos para evaluar potenciales superaciones de la norma (análisis de cumplimiento), (iii) el cálculo de la reducción de la emisión necesaria para el cumplimiento de la normativa (iv) un modelo de emisión-concentración que alimenta al modelo de dosis-respuesta en efectos en salud basado en estudios toxicológicos y epidemiológicos y (v) un modelo de cuantificación y valorización de beneficios. Con respecto a los costos, se integra (vi) la valoración de la reducción de emisiones a través de la implementación de medidas de abatimiento y los costos de fiscalización de la norma (cuando corresponden), los cuales son independientes del análisis de cumplimiento. En la Figura 3 se muestra el diagrama que representa la metodología utilizada para la evaluación (MMA, 2013).



Fuente: Elaboración propia basado en MMA (2013).

De la Figura 2, se desprende entonces que el primer análisis que se debe elaborar es el “análisis de cumplimiento”, el cual establece los cumplimientos y superaciones que se generan al comparar la línea base (calidad actual) versus los límites normativos propuestos. Para ilustrar esto, la Figura 1Figura 3 presenta los posibles escenarios que se pueden dar en el análisis de cumplimiento.

Figura 3: Evaluación de cumplimiento normativo



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Figura 3 al ser una revisión de norma, existen tres potenciales escenarios. El primer escenario “Caso A” es en el cual las emisiones superan la normativa ya vigente. En este caso, la metodología del AGIES considera los costos y beneficios de disminuir las emisiones desde el cumplimiento de la norma vigente al cumplimiento de la norma propuesta, ya que el AGIES evalúa el cambio de normativa (área achurada bajo la recta verde). El segundo caso, “Caso B”, es en el cual las concentraciones sobrepasan el límite impuesto por la nueva norma de emisión, pero cumplen con la norma vigente. En este caso, la metodología del AGIES considerará que se deberán evaluar las potenciales reducciones en emisiones por parte de las unidades emisoras para alcanzar los niveles de emisión requeridos, generando con esto costos y beneficios. El tercer escenario, “Caso C”, establece que las concentraciones actuales cumplen con los límites establecidos por la norma. Por ende, no existirán costos ni beneficios asociados a la reducción de emisiones, y solo se considerarán los potenciales costos de monitoreo y fiscalización de la norma y los beneficios cualitativos que esta pueda generar.

Una vez determinados los potenciales escenarios de incumplimiento, se estima el delta de emisión, el cual corresponde a la diferencia entre el valor emitido por una unidad y el valor de norma, representando el área puntuada en el caso “Caso A” y “Caso B” de la Figura 3.

El cumplimiento de la normativa se realizará a través de la reducción de la emisión mediante la implementación de tecnologías de abatimiento para el caso de las fuentes puntuales y difusas, para estos e aplicaran medidas acordes al delta de emisión necesario para dar cumplimiento de la normativa, lo que se busca identificar es el efecto específico de la normativa evaluada. La aplicación de estas medidas considera el principio de la costo-efectividad⁵. La reducción en las emisiones genera un cambio o una mejora en la calidad del aire (a menor emisión, menor

⁵ Principio básico en el análisis de los AGIES, en donde se busca lograr las mayores reducciones de emisiones al menor costo.

concentración de contaminantes), esto contribuirá en la disminución del riesgo asociado a padecer enfermedades o mortalidad prematura para la población, lo cual se cuantificará como beneficio de la normativa.

Es importante recalcar que los resultados del AGIES intentan orientar a los tomadores de decisión mediante el uso de la metodología aquí planteada, sin embargo, esta no debe ser considerada como el único criterio para la aprobación de una política pública (Fisher, 1991; Arrow, Cropper et al., 1996), ya que se debe tener una visión integral que incorpore otras variables, tales como el riesgo de la población expuesta, consideraciones culturales de la zona regulada, aspectos sociales, aspectos geográficos, entre otras⁶.

1.1 Fuentes evaluadas

A nivel nacional existen 7 fundiciones de cobre y una planta de tostación, estas fuentes son las principales emisoras de arsénico en el territorio (MMA, 2024), por lo que la evaluación se centrará en estas fuentes.

Específicamente se evaluarán:

- Altonorte
- Caletones
- Chagres
- Chuquicamata
- Potrerillos

Cabe destacar que la Planta de tostación Ministro Hales, cuenta con eficiencias que le permiten el cumplimiento de todos los límites evaluados, por lo que no se considera a lo largo de la evaluación. Por otra parte, la fundición Ventanas se encuentra fuera del proceso de evaluación por el cierre de sus procesos antes del período de implementación de esta norma. Finalmente, la fundición Hernán Videla Lira se encuentra en proceso de renovación y se espera que esta cumpliría con la nueva normativa, por lo que no se considera en la evaluación.

1.2 Límites regulatorios evaluados

El Anteproyecto que actualiza el DS 28 de 2013, fija los límites de emisión de las fuentes fundiciones de cobre y otras fuentes emisoras de arsénico, establece 3 formas de establecer límites a la emisión, los cuales no son excluyentes entre sí, estos límites corresponden a:

- a) Se establecen “Límites máximos de emisión para fuentes emisoras existentes” específico para SO₂ y As, y para cada una de las fuentes (Tabla 1). Estos límites deberán cumplirse al noveno año de entrada en vigor de esta normativa⁷. Este límite regulatorio corresponde al Artículo N°3 (MMA, 2024) del documento de Anteproyecto.

⁶ D.S. 38 y 39/2012 del MMA incorporan, entre otras cosas, la generación de comités, la PAC y el CMS, los cuales también intentan incorporar los aspectos mencionados.

⁷ La entrada en vigencia de la normativa corresponde a la fecha de publicación del decreto en el diario oficial. Para efectos del AGIES corresponderá al año 2025.

Tabla 1: Límites regulatorios por contaminante y por fuente

Fuente Emisora	SO ₂ (ton/año)	As (ton/año)
Altornorte	15.500	120
Caletones	18.500	70
Chagres	8.000	18
Chuquicamata	15.750	275
Potrerosillos	9.500	68

Fuente: Elaboración propia

- b) Se establece que “Las fuentes emisoras existentes deberán cumplir con los siguientes porcentajes de captura y fijación”. Esto es un porcentaje de captura de azufre (S) igual o superior al 98% y un porcentaje de captura de arsénico (As) igual o superior al 98%, el cuál debe cumplirse al quinto año de entrada en vigor la normativa. Este porcentaje de captura corresponde al Artículo N°4 del documento de Anteproyecto.
- c) Se establece en el Artículo N°5 que las fuentes emisoras de gases secundarios deben instalar sistemas de captación de gases luego de 9 años.
- d) Se establecen en el Artículo N°6 “Límites de emisión en chimenea para fuentes emisoras existentes”. Esto es un límite la emisión en concentración mensual, de las siguientes chimeneas pertenecientes a las fundiciones. Los cumplimientos de los límites regulatorios descritos en la Tabla 2 se establecerán en un período de 9 años.

Tabla 2: límites regulatorios por proceso y contaminante.

Proceso	MP [mg/m ³ N]	As [mg/m ³ N]	SO ₂ [ppm]	Hg [mg/m ³ N]
Sistema de tratamiento de gases	-	0,8	400	0,08
Secadores	30	-	-	-
Hornos de limpieza de escoria	30	0,8	-	-
Hornos de refinó	20	0,8	-	-

Fuente: Elaboración Propia

1.3 Evaluación de las Emisiones

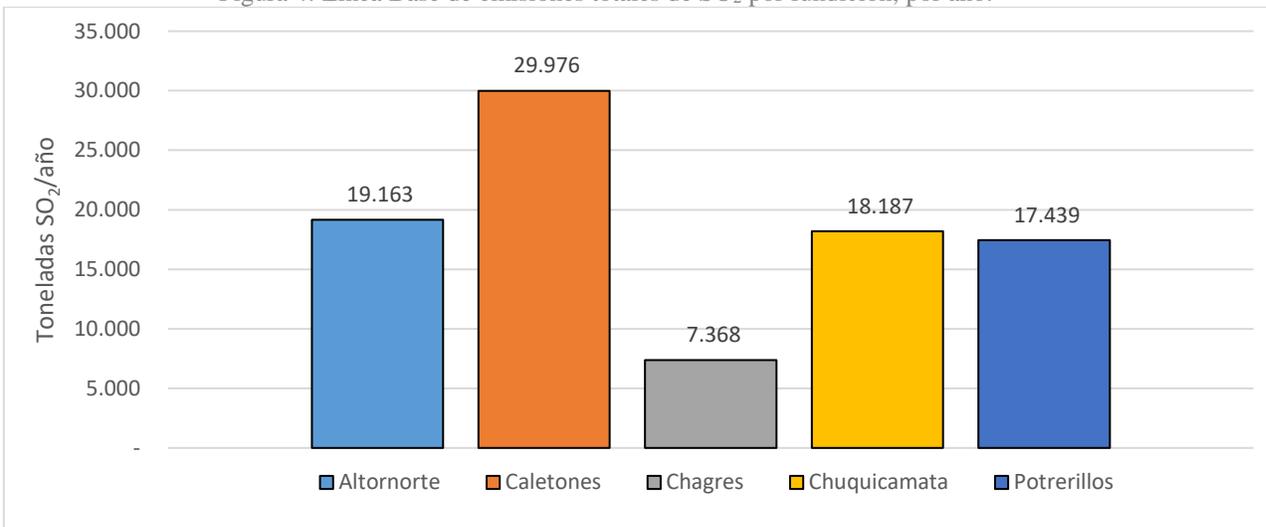
Según datos de (COCHILCO, 2024) la producción de fundiciones chilenas se ha mantenido estable en el tiempo, y no existen antecedentes de algún cambio futuro, por estas razones se considerará que la producción de cobre de fundiciones chilenas se mantendrá, de este modo las emisiones debiesen ser constante hasta el año 2045, considerando que el AGIES realiza una evaluación a 10 años (2035-2044).

1.3.1 Línea base para la norma total de emisiones.

Para construir la línea base de emisiones, considerando que la producción de cobre en refinерías se mantendrá constante en el tiempo, se utilizó el promedio de producción de cobre de los últimos 4 años⁸. También se utilizó el porcentaje de captura del último año base (2022). De este modo se construye una línea base que es constante en el tiempo.

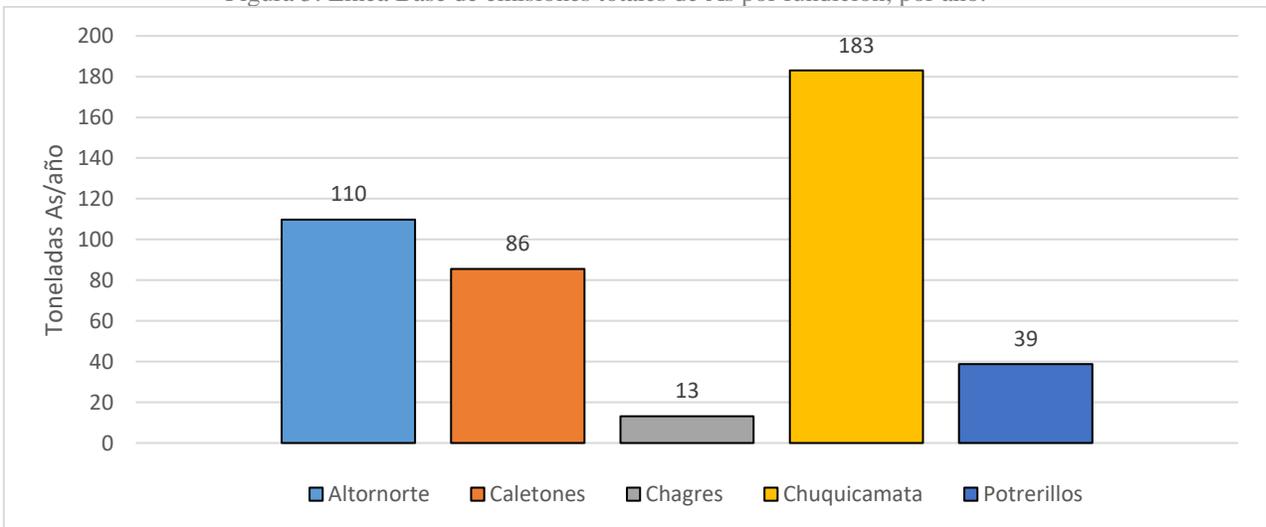
Para el caso de la evaluación de la norma de emisión por fundición (ver Tabla 1), el AGIES evalúa los datos de emisiones totales de los contaminantes especificados por la norma del anteproyecto, estos son; *dióxido de azufre* (SO₂), y *Arsénico* (AS). A continuación, se muestra la línea base de emisiones por fundición y años; para ambos contaminantes.

Figura 4: Línea Base de emisiones totales de SO₂ por fundición, por año.



Fuente: Elaboración propia en base a MMA, 2022

Figura 5: Línea Base de emisiones totales de As por fundición, por año.



Fuente: Elaboración propia en base a MMA, 2022

⁸ Para esto se consideró como un año, aquellos que poseen datos de emisión para los 12 meses.

Es importante recordar que esta evaluación no considera a la fundición Hernán Videla Lira debido a que su renovación cambiará en gran parte la fundición y esta debiese cumplir con los nuevos límites.

1.3.2 Línea base de porcentaje de captura de Azufre y Arsénico

La captura de arsénico y azufre se define como la razón entre la línea base de emisiones y la entrada total de arsénico y azufre a la fundición:

$$\% \text{ Captura} = \frac{\text{Emisiones As o S [ton/año]}}{\text{Entrada As o S [ton/año]}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Para considerar la línea base de captura se utilizó el porcentaje de captura reportado en el año 2022. De este modo las eficiencias de captura de la línea base consideradas corresponden a las presentadas en la Tabla 3.

Tabla 3: Eficiencias porcentuales de captura de la línea base

Fundición	S	As
Altonorte	96,99%	97,75%
Caletones	96,13%	96,75%
Chagres	97,53%	97,42%
Chuquicamata	95,99%	97,16%
Potrerrillos	95,11%	97,21%

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA, 2022

1.3.3 Línea base de concentración de salida para chimeneas.

Se utilizó la información proveniente del Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA) (SMA, 2024) para la evaluación de las concentraciones de salida. SNIFA provee información actualizada al año 2022 para distintas chimeneas fiscalizables indicadas en la Tabla 4. Se debe considerar que SNIFA no cuenta con información para los hornos de refino, por lo que estas unidades no pueden ser evaluadas.

La Tabla 4 presenta las emisiones en concentración de salida en mg/m³ de las unidades fiscalizadas por la SMA, estos valores consideran el valor del percentil 95 horario para SO₂, el valor máximo mensual para As y MP, según lo establecido en el artículo N°6 del decreto de la norma. Cabe destacar que no se tiene antecedentes de los hornos de refino por lo que el límite normativo de estos no fue evaluado.

Tabla 4: Línea base de concentraciones mg/m³ de salida de unidades fiscalizables.

Fundición	Unidad Fiscalizable	As	SO₂ [PPM]	MP	Hg
Altonorte	Planta de Ácido 1	0,0914	332		0,0343
Altonorte	Planta de Ácido 3	0,1119	479		0,0067
Altonorte	Secador			15,33	
Caletones	Planta de tratamiento de gases 1	0,17	464		0,0005
Caletones	Planta de tratamiento de gases 2	0,14	451		0,0003
Caletones	Secador 1			23,2	
Caletones	Secador 2			34,18	
Caletones	Secador 3			45,3	
Chagres	Horno de Limpieza de Escoria	1,03		10,4	
Chagres	Planta de ácido	0,59	358		0,0339
Chagres	Secador			18,4	
Chuquicamata	Planta de Ácido 3	0,56	179		
Chuquicamata	Planta de Ácido 4	0,59	162		
Chuquicamata	Secador 6			46,9	
Potrerillos	Planta de ácido	1,61	575		0,0024
Potrerillos	Secador			123,1	

Fuente: Elaboración Propia.

1.4 Análisis de Cumplimiento

Se evalúan los límites de emisión establecidos por la regulación respecto de su línea base. Esto, con el fin de identificar aquellos incumplimientos que deberán incurrir en la reducción de sus emisiones.

A continuación, se presenta el análisis para los distintos límites propuestos por la normativa.

1.4.1 Metodología de cumplimiento norma total de emisiones.

La norma de total de emisiones de AS y SO₂ se evalúa de manera anual, para esta evaluación se ha considerado que el límite normativo entraría en vigor el año 2035.

Para realizar esta evaluación se utiliza la siguiente ecuación:

$$\Delta Emi_{i,j} = Emi_{LBi,j} - Emi_{norma,j} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,

$\Delta Emi_{i,j}$: Reducción de la emisión del contaminante j en toneladas requerida en la fuente i , para cumplir con la normativa.

$Emi_{LBi,j}$: Emisión total de línea base del contaminante j en toneladas para la fundición i

$Emi_{Norma,j}$: Límite de emisión del contaminante j establecido por la Norma en toneladas.

Si $\Delta Emi_{i,j} \leq 0$, entonces se considera que la central está en cumplimiento tal como lo señala el “Escenario C” del Figura 1. Por el contrario, si $\Delta Emi_{i,j} > 0$, se considera que existe un incumplimiento normativo, y por ende esa fuente deberá reducir su emisión hasta el límite normado.

1.4.2 Metodología de cumplimiento de norma de porcentaje de captura para Azufre y Arsénico

La evaluación de cumplimiento del porcentaje de captura se realiza a partir del año 2035, año en donde entrarían en vigor todos los demás límites regulatorios y con ellos potenciales medidas de captura y fijación que permitirán aumentar la eficiencia de cada una de las fundiciones. Para calcular el porcentaje de captura se utiliza la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Captura} = \frac{\text{Proyección Emisiones As o S [ton/año]}}{\text{Proyección Entrada As o S [ton/año]}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Si $\% \text{ Captura} \geq 98\%$ entonces se considera que la central está en cumplimiento. Por el contrario, si él $\% \text{ Captura} < 98\%$ se considera que existe un incumplimiento normativo, y por ende esa fuente deberá reducir aumentar su porcentaje de captura. Cabe destacar que la norma

de emisiones totales y de captura están relacionadas, si se emite más entonces la captura es menor y viceversa.

1.4.3 Metodología cumplimiento norma concentraciones de salida para chimeneas

Tal como se señala en el capítulo 1.1 del presente documento, específicamente en la Tabla 2 se proponen límites normativos para lo contaminantes AS, SO₂, MP y Hg.

Para el caso de los contaminantes MP y As su evaluación se realiza mensualmente. De modo que, para evaluar el cumplimiento de esta norma, se consideraron las concentraciones máximas mensuales reportadas el año 2022. Por otra parte, en el caso del SO₂ se considerará el percentil 95 de los datos horarios, en este caso también se realizó la comparación con datos del 2022.

El análisis de cumplimiento se realiza considerando la siguiente ecuación:

$$\Delta Conc_{i,j} = Conc_{LBi,j} - Conc_{norma,j} \tag{Ecuación 4}$$

Donde,

$\Delta Conc_{i,j}$: Reducción de la concentración de salida del contaminante j en mg/Nm³ o ppm requerida en la unidad fiscalizable i , para cumplir con la normativa.

$C_{LBi,j}$: Concentración línea base del contaminante j en mg/Nm³ o ppm para la unidad fiscalizable i .

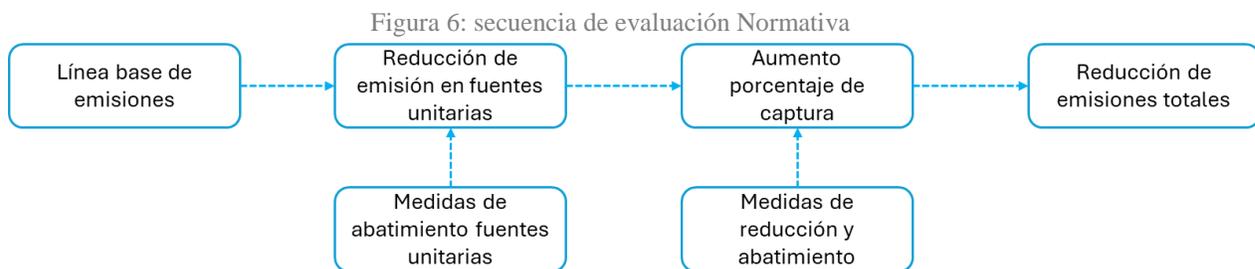
$C_{Norma,j}$: Límite de concentración del contaminante j establecido por la Norma en mg/Nm³ o ppm.

Luego si $\Delta Conc_{i,j} > 0$, entonces se considera que la central está en incumplimiento. Por el contrario, si $\Delta Conc_{i,j} \leq 0$, se considera que existe un cumplimiento normativo. Reducción de emisiones

1.5 Reducción de emisiones

Las fundiciones que incumplan con los límites propuestos deberán implementar medidas para reducir sus emisiones de modo de cumplir con esta.

Este análisis se realizó siguiendo una secuencia lógica, descrita en la siguiente figura:



Fuente: Elaboración Propia

En primer lugar, se utiliza la línea base, luego se evalúan todas aquellas chimeneas que requerirán de la implementación de una medida de abatimiento, ya sea para MP, As, SO₂ y/o Hg, posteriormente se consideran todas aquellas medidas de captura y abatimiento que permitirán aumentar el % de captura, para finalmente con este conjunto de medidas evaluar medidas necesarias para reducir la emisión total de la fundición. En el caso de la norma propuesta el límite de captura (Artículo N°6) sería más exigente que la norma de emisión total (Artículo N°3), por lo que al cumplir con la primera de estas se cumple con la otra.

La reducción tanto de la norma de chimeneas (concentraciones) como la Norma total de emisiones, se calculó de la siguiente manera:

$$Red\ Emi_{i,j,f} = \sum Emi_{LB\ i,j,f} \times (1 - Efi_{i,j,f,m}) \quad \text{Ecuación 5}$$

En donde:

$Red\ Emi_{i,j,f}$: Es la reducción del contaminante i en la fundición j en la fuente f.

$Emi_{LB\ i,j,f}$: Es la emisión de línea base de i en la fundición j en la fuente f.

$Efi_{i,j,f,m}$: Es la eficiencia de reducción de del contaminante i en la fundición j en la fuente f de la medida m.

De este modo la reducción total de contaminantes en una fundición es la sumatoria de todas las reducciones de contaminante. Las medidas de reducción consideradas se presentan en Anexo 5.4.

Cabe destacar que medidas basadas en buenas prácticas operacionales, no fueron evaluadas debido a la arbitrariedad de su correcta implementación y la dificultad de estimar los costos de estas. Estas en su mayoría apuntan a emisiones fugitivas y se estima que podrían resultar en un 10% de las emisiones (GreenLab DICTUC, 2022).

1.6 Beneficios y Costos

En el caso de existir superaciones del límite máximo de emisión de los contaminantes regulados, la metodología para la estimación de beneficios considera la valorización económica de la reducción de casos asociados a los efectos de morbilidad y mortalidad basados en la salud de la población expuesta dada las mejoras en las condiciones de calidad del aire. Estos efectos pueden ser de carácter agudos o crónicos dependiendo de cada contaminante.

De este modo, y tal como se especifica en la Figura 2, se relacionan los niveles de emisión de contaminantes con la reducción de la concentración del contaminante, mejorando así la calidad del aire, lo que se traduce en una disminución del número de efectos (casos) en la salud de la población expuesta. A través de funciones dosis-respuesta (asumiendo una relación lineal entre ambas variables) se puede conocer esta disminución en el riesgo relativo. Luego, estas reducciones de casos pueden ser valorizados en unidades monetarias, los cuales se obtienen multiplicando el número de casos por la valoración unitaria (valor por cada caso) asociada a padecer los efectos. Por consiguiente, el cálculo de beneficios considera los ahorros generados al Estado y a las personas por la disminución de enfermedades, y son valorizados en USD/año. Los detalles de cálculo de beneficios se pueden encontrar en la sección 5.2 de anexos. Un

beneficio que no fue considerado fue, la disminución de castigo a los concentrados de cobre con ley alta de arsénico al instalar una planta de tostación, esto debido a falta de antecedentes para su correcta evaluación.

Con respecto a los costos, estos se calculan teniendo en cuenta las reducciones en emisiones que deben lograrse para el cumplimiento normativo, que implican la implementación de medidas de abatimiento o medidas de gestión de la producción, la implementación de estas medidas responderá al criterio de costo-efectividad, esto quiere decir que se escogerá la tecnología o el conjunto de ellas que posea un menor costo por cantidad de contaminante reducido. En el caso del presente AGIES, para cumplir con la normativa se consideraron los costos de inversión, operación y mantención; detención de la producción durante instalación y en casos específicos se estima el costo de gestionar la producción de cobre para lograr el cumplimiento de los límites propuestos. Los costos para este AGIES han sido calculados en USD/año. El detalle de la estimación de los costos se puede observar en el Anexo 5.1 del presente documento.

Tanto los costos como los beneficios fueron anualizados utilizando la siguiente ecuación, de acuerdo con la guía de la EPA (EPA, 2010):

$$VA = VP \cdot \frac{r \cdot (1+r)^n}{(1+r)^{n+1} - 1} \quad \text{Ecuación 6}$$

En donde

VA: Es el valor anualizado del beneficio o costo.

VP: Es el valor presente del beneficio o costo.

r: Es la tasa de descuento utilizada, la cual es la tasa de descuento social (MIDESO, 2024) de 5,5%.

n: Es la vida útil de las tecnologías de abatimiento en el caso de los costos y el periodo de evaluación en el caso de los beneficios.

2. Resultados

2.1 Análisis de Cumplimiento Normativo

En base a las metodologías anteriormente definidas en la sección 1.3 y siguiendo la secuencia lógica de evaluación presentada en la sección 1.4, se presentan los resultados obtenidos de la evaluación, considerando los contaminantes As, SO₂ y MP. Cabe destacar que la fundición de Altonorte cumpliría con todos los artículos sin implementar medidas de abatimiento.

2.1.1 Cumplimiento norma de concentración de salida para chimeneas

En la tabla Tabla 5 se presentan los incumplimientos de la normativa de concentración de salida de las unidades fiscalizables de acuerdo con los datos reportados por las fuentes. En donde un 1 denota un incumplimiento (según Ecuación 5), es decir que la emisión total es mayor al límite máximo permitido por la norma.

Tabla 5: Incumplimiento de concentración de salida por contaminante y unidad fiscalizable.

Fundición	Unidad Fiscalizable	As	SO ₂	MP	Hg
Altonorte	Planta de Ácido 1				
Altonorte	Planta de Ácido 3		1		
Altonorte	Secador				
Caletones	Planta de Tratamiento de Gases 1		1		
Caletones	Planta de Tratamiento de Gases 2		1		
Caletones	Secador 1				
Caletones	Secador 2			1	
Caletones	Secador 3			1	
Chagres	Horno de Limpieza de Escoria	1			
Chagres	Planta de ácido				
Chagres	Secador				
Chuquicamata	Planta de Ácido 3				
Chuquicamata	Planta de Ácido 4				
Chuquicamata	Secador 6			1	
Potrerillos	Planta de ácido	1	1		
Potrerillos	Secador			1	

Fuente: Elaboración propia. Un 1 denota que la norma propuesta implicaría un incumplimiento.

Al comparar la línea base con los valores normados se generarán 10 incumplimientos, 2 en la norma de As, 4 en la norma de SO₂, 4 en la norma de MP y 0 en la norma de Hg. Los hornos de refino no fueron evaluados debido a que la revisión de la norma cambia de ser una norma de opacidad a norma de concentración de salida por lo que no existen datos históricos.

La Tabla 6 presenta el delta de emisión a reducir para cada una de las unidades fiscalizables, estos valores corresponden al valor en mg/m^3 que deberán reducir las chimeneas, a través de la implementación de medidas de abatimiento.

Tabla 6: delta de concentración mg/m^3 requerido para el cumplimiento del límite de emisión en concentración por chimenea.

Fundición	Unidad Fiscalizable	As [mg/m^3]	SO ₂ [PPM]	MP [mg/m^3]	Hg [mg/m^3]
Altonorte	Planta de Ácido 1				
Altonorte	Planta de Ácido 3		78,8		
Altonorte	Secador				
Caletones	Planta de Tratamiento de Gases 1		64		
Caletones	Planta de Tratamiento de Gases 2		51		
Caletones	Secador 1				
Caletones	Secador 2			4,18	
Caletones	Secador 3			15,3	
Chagres	Horno de Limpieza de Escoria	0,23			
Chagres	Planta de ácido				
Chagres	Secador				
Chuquicamata	Planta de Ácido 3				
Chuquicamata	Planta de Ácido 4				
Chuquicamata	Secador 6			16,9	
Potreriillos	Planta de ácido	0,81	175		
Potreriillos	Secador			93,1	

Fuente: Elaboración propia.

2.1.2 Cumplimiento norma porcentaje de captura Azufre y Arsénico

A continuación, se presenta el análisis de cumplimiento del porcentaje de captura, para esto se asume que se mantiene constante la captura del año base, de acuerdo con los datos reportados por las fuentes.

Tabla 7: Incumplimiento captura

Fundición	S	As
Altornorte	1	1
Caletones	1	1
Chagres	1	1
Chuquicamata	1	1
Potrerrillos	1	1

Fuente: Elaboración propia. Un 1 denota que la norma propuesta implicaría un incumplimiento.

Como muestra la Tabla 7 ninguna fundición cumpliría actualmente con la norma de captura de *Arsénico* y *Azufre*. A continuación, se muestra el aumento del % de captura necesario para que las fundiciones cumplan con la norma.

Tabla 8: Incumplimiento captura

Fundición	S	As
Altornorte	1,0%	0,2%
Caletones	1,9%	1,3%
Chagres	0,5%	0,6%
Chuquicamata	2,0%	0,8%
Potrerrillos	2,9%	0,8%

Fuente: Elaboración propia.

2.1.3 Cumplimiento norma total de emisiones.

Una vez conocida la reducción que generará por chimenea y que aportará a la reducción de la emisión total. Se evalúa el cumplimiento de la norma total de emisiones (ver Tabla 1) la cuál considera la entrada en vigor al año 2035, los resultados arrojan lo presentado en la Tabla 9.

Tabla 9 Incumplimiento de la norma total de emisiones

Fundición	S	As
Altornorte	1	0
Caletones	1	1
Chagres	0	0
Chuquicamata	1	0
Potrerrillos	1	0

Fuente: Elaboración propia.

4 fundiciones (Altonorte, Caletones, Chuquicamata y Potrerillos) no cumplen los límites de emisión para el total de la fundición para SO₂, siendo Caletones la única en incumplir el límite

para As. Al comparar la línea base (ver Anexos 5.3) con los límites regulatorios, se obtienen los deltas de emisión que deberán reducir, los cuales se presentan a continuación:

Tabla 10: Delta de emisión necesario para cumplir la norma total de emisiones

Fundición	SO ₂ [Ton]	As [Ton]
Altornorte	3.663	-
Caletones	11.476	15,6
Chagres	-	-
Chuquicamata	2.437	-
Potrerrillos	7.939	-

Fuente: Elaboración propia.

2.2 Reducción de emisiones

Para el cálculo de las reducciones de las emisiones se utiliza la metodología resumida en la Figura 6: secuencia de evaluación Normativa, de este modo primero se establece la implementación de las medidas para chimenea, luego se evalúan las medidas para cumplir con el porcentaje de captura y finalmente se evalúa la norma de emisión máxima. En el caso de las chimeneas se consideran Filtros de Manga para la reducción de MP y As y Scrubber para la reducción de SO₂. El delta de concentración de salida por chimenea se presenta en la Tabla 6.

Una vez implementadas las medidas para chimeneas se implementarán medidas que aportarán con el cumplimiento de la norma de captura (Artículo N°6), estas medidas consideran: Planta tostación, captura y tratamiento gases secundarios CPS, flotación de escorias, PTGC, captura y tratamiento sangrado reactor, captura y tratamiento hornos escoria, captura secundaria en boca del reactor, alimentación carga fría CPS, captura techo y filtro de manga reactor, captura techo en reactor, captura terciaria en CPS, ESP húmedo en horno anódico, ESP húmedo en sistemas de capturas actuales y reducción de la producción. Estas fueron seleccionadas según la metodología presentada en el anexo 5.4.

A continuación, se presentan la reducción de emisiones anual para los años 2035-2044, para SO₂ cuando se estima que las medidas de captura y abatimiento han sido implementadas. Cabe notar que al se consideran las emisiones de línea base y eficiencias de abatimiento constantes en el tiempo, por lo que las emisiones con la norma ya implementada serían constantes también.

Tabla 11 Toneladas reducidas al año de **SO₂ (ton)** por fundición y razón de la reducción.

Fundiciones	Abatimiento Artículo 4	Abatimiento Artículo 6	Total
Altornorte	6.007	659	6.667
Caletones	13.128	1.650	14.779
Chagres	2.802	-	2.802
Chuquicamata	9.321	-	9.321
Potrerillos	9.452	685	10137

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan las emisiones de As al año, para el período 2035-2044. Cabe mencionar que debido a que las emisiones de línea base y los porcentajes de abatimiento se mantienen constantes, las reducciones para el período serán constantes.

 Tabla 12 Toneladas reducidas al año de **As_(ton)**.

Fundiciones	Abatimiento Artículo 4	Abatimiento Artículo 6	Total
Altornorte	35,2	-	35,2
Caletones	36,6	-	36,6
Chagres	2,7	0,4	3,0
Chuquicamata	58,9	-	58,9
Potrerillos	11,4	0,5	11,9

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se presentan los porcentajes de captura que tendrán las fuentes por contaminante⁹.

Tabla 13. Porcentaje captura y abatimiento por fundición a partir del año 2035.

Fundiciones	S	As
Altornorte	98,0%	98,5%
Caletones	98,0%	98,1%
Chagres	98,5%	98,0%
Chuquicamata	98,0%	98,1%
Potrerillos	98,0%	98,1%

Fuente: Elaboración propia.

Al cumplir con estos 2 límites normativos, disminuirían las emisiones de *azufre* y *arsénico* por parte de las fundiciones por lo cual se cumpliría con el Artículo N°3 como se muestra a continuación.

⁹ Se considera que en caso de existir una diferencia menor a 0,1%, esta podrá ser compensada con medidas operacionales.

Tabla 14: Emisiones de SO₂ (ton) y As (ton) con la implementación de la Norma

Fundiciones	SO ₂	As
Altonorte	12.496	74,6
Caletones	15.197	48,9
Chagres	4.566	10,1
Chuquicamata	8.866	124,1
Potrerrillos	7.302	26,9

Fuente: Elaboración propia.

De este modo todas las fundiciones cumplirían con la norma propuesta en el anteproyecto.

2.3 Costos

Los costos considerados en el presente AGIES fueron obtenidos del estudio base para la evaluación de la Norma (MMA, 2022), en el cual se preseleccionaron las tecnologías aplicables, según su costo efectividad, para abatir emisiones necesarias para cada una de las superaciones necesarias a revertir.

Al tratarse de la revisión de una norma vigente no se consideraron costos de fiscalización y/o monitoreo por parte del estado ya que se asume como supuesto que ya existe la capacidad instalada.

Es importante señalar que, los costos aquí cuantificados son referenciales y no vinculantes, esto quiere decir que es un escenario en el cual se estima el cumplimiento al menor costo de inversión, sin embargo, esto no significa que las fuentes evaluadas tengan o deban implementar las medidas estimadas en el AGIES.

2.3.1 Costos por reducción de la emisión

A continuación, se presentan los costos de inversión¹⁰, operación y mantención, para cada una de las fundiciones. El cálculo de estos costos se consideró la anualización de los valores, considerando una vida útil de 20 años de las tecnologías y una tasa social de descuento del 5,5%. (MIDESO 2024).

Estos costos se resumen en la Tabla 15 , se considera un total de 61 millones de dólares al año por concepto de abatimiento. Las fundiciones con mayores costos para poder cumplir con la norma serían Caletones (33,8%), Potrerillos (24%) y Chuquicamata (20%).

¹⁰ Considera los costos asociados a los períodos de detención para instalar medidas de abatimiento.

Tabla 15. Costos anualizados en millones de dólares de las medidas seleccionadas para cumplir con norma de emisión.

Fundición	Inversión	O&M	Detención para instalación medidas	Total
Altornorte	4,1	0,3	0,1	4,5
Caletones	18,9	1,5	0,2	20,6
Chagres	6,5	2,6	0,0	9,2
Chuquicamata	10,9	0,8	0,2	11,9
Potrerrillos	13,6	1,0	0,2	14,8
Total	54,0	6,3	0,7	61,0

Fuente: Elaboración propia.

El detalle de las medidas evaluadas se presenta en los Anexos 5.4.

2.4 Beneficios

Los beneficios consisten en la valoración económica de la reducción de los efectos en salud (casos evitados) a causa de la mejora en la calidad del aire, la cual se genera por la reducción de las emisiones.

El cálculo de los beneficios se realizó siguiendo la metodología presentada en el Capítulo 1.6 y según la metodología específica descrita en Anexo 5.2

El cumplimiento de los límites normativos significa ahorros para la sociedad evaluados en USD 1.524.204 para el periodo de evaluación. La Tabla 16 presenta el número de casos y los beneficios totales valorizados para cada uno de los efectos considerados.

Tabla 16 Delta de casos y beneficios anualizados valorizados por el cumplimiento normativo

Efecto	Casos Evitados	Beneficios [USD/Año]
Mortalidad > 30 años+	19,3	1.514.381
Cáncer Respiratorio	0,001	80
AH -Cardiovascular < 64 años	2,7	1.209
AH -Cardiovascular > 65 años	3,9	1.399
AH -Efectos Respiratorios agudos	14,5	392
AH - Efectos Respiratorios Crónicos	0,17	8,4
AH -Asma	0,15	6,3
VSE- Asma 0-99 años	638,5	6.242
Días de Productividad perdidos	202,9	467
Total	-	1.524.204

Fuente: Elaboración propia.

AH= admisiones hospitalarias, ERV= visitas a sala de urgencias, WLD= días de productividad perdidos

Al cuantificar los beneficios por comuna se obtienen los resultados indicados en Tabla 17, la mayoría de los beneficios valorizados se encuentran en la ciudad de Calama.

Tabla 17 Beneficios USD por comuna

Localidades	Beneficios [USD]	Porcentaje
Calama	1.515.848	99,45%
ChiuChiu	217	0,01%
La Negra		
Antofagasta	4.803	0,32%
El Salvador	1.888	0,12%
Catemu	972	0,06%
Panquehue	0	0,00%
Llailay	1	0,00%
Coya	462	0,03%
Total	1.524.204	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, los beneficios anuales se cuantifican en USD 1.524.204, este beneficio esta dado en mayor medida por la reducción de casos de mortalidad en personas mayores de 30 años. Adicionalmente se cuantificó la reducción de casos considerando las reducciones de MP_{2,5} por el abatimiento adicional que generan las tecnologías de reducción de As y SO₂, estos beneficios fueron incorporados dentro de los beneficios total de la evaluación.

2.5 Análisis costo beneficio

Al comparar los costos de la norma con los beneficios sociales de esta, los costos son mayores a los beneficios en una razón beneficio/costo es de 0,025 es decir los beneficios sociales estimados serían un 2,5% de los costos estimados. La principal razón de este resultado está determinada por la metodología empleada la que al considerar una población expuesta muy baja genera una baja valorización económica de los casos.

3. Conclusiones

El presente AGIES evaluó la norma propuesta “Emisión Para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico”. De la revisión de los cumplimientos se estiman, que se generarán un total de 25 incumplimientos. En este caso todas las fundiciones evaluadas generarían al menos un incumplimiento. Todos los incumplimientos serían factibles de ser revertidos, por ende, se considera que la Norma podrá ser cumplida por las fuentes emisoras.

Respecto de los costos, estos ascienden USD 61 millones al año, considerando costos de abatimiento. Lo cuales serían asumidos por principalmente por las fundiciones Caletones (33,8%), Potrerillos (24%) y Chuquicamata (20%). La principal fuente de estos costos es el abatimiento para poder cumplir con el artículo N° 6 de la norma, es decir el límite de porcentaje de captura de 98% de As y S.

Los beneficios cuantificados por reducción de enfermedades, consultas hospitalarias y corresponden a USD 1.524.204, distribuidos en 8 comunas nacional las que reducirán su riesgo de exposición por el cumplimiento de la norma de emisión. Estas son: Calama, Chiu Chiu, Antofagasta, El Salvador, Catemu, Panquehue, Llay-Llay y Coya. Dentro de estas Calama sería la más beneficiadas con un 99% de los beneficios respectivamente. El mayor beneficio será en reducción de mortalidad de mayores de 30 años, representando un 99% de los beneficios.

La relación beneficio/costo es de 0,025 es decir los beneficios son un 2,5% de los costos. Este AGIES cumple con los requerimientos establecidos en el D.S. N° 38 de 2012, evaluando los costos para los regulados, considerando el principio de costo-efectividad, los costos para el Estado y los beneficios para la sociedad.

4. Bibliografía

- Arrow, K. J., M. L. Cropper, et al. 1996. "Is there a role for benefit-cost analysis in environmental, health, and safety regulation?". *Science*, 272(5259): 221-222.
- Fisher, A. 1991. "Increasing the Efficiency and Effectiveness of Environmental Decisions: Benefit-Cost Analysis and Effluent Fees."
- MIDESO, 2018. Precios Sociales 2018.
- MMA. 2011. Valores Recomendados a Utilizar en la Realización de un AGIES que incorpore un Análisis Costo-Beneficio – Salud. Santiago, Preparado por DICTUC para Ministerio del Medio Ambiente. Disponible en <http://sinia.mma.gob.cl/>
- MMA. 2013. Guía metodológica para la Elaboración de un Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) para Instrumentos de Gestión de Calidad del Aire. Departamento de Economía Ambiental. Chile, Ministerio del Medio Ambiente. Disponible en <http://sinia.mma.gob.cl/>
- MMA (2022) Antecedentes para la elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico y revisión de la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico. preparado por DICTUC para Ministerio del Medio Ambiente

5. Anexos

5.1 Metodología de Cálculo de Costos

Respecto al cálculo de costos, estos se estiman considerando el principio de la minimización de costos, esto quiere decir, generar la mayor reducción de las emisiones al menor costo posible cumpliendo la norma. Para esto se consideran dos escenarios de abatimiento de emisiones a través de medidas de abatimiento de SO₂, As y MP o costos asociados a la gestión de la producción dentro de las fuentes emisoras.

El método de selección de las medidas de mitigación busca simular el comportamiento de los privados que deciden qué medidas de mitigación implementar en las distintas fuentes. Para ello se considera que los costos son incurridos por los privados, mientras que los beneficios en salud no son directamente percibidos por quienes toman las decisiones, de esta forma la simulación de la decisión privada se basa en minimizar los costos, sujetos al cumplimiento de la norma. De esta forma, las medidas se agrupan en *paquetes*, los cuales resultan en determinados costos y reducciones, seleccionando aquel *paquete* con menor costo que cumpla con los distintos límites normativos. Matemáticamente, lo anterior se expresa en la siguiente ecuación.

$$\text{Min}\{ \text{Costos Totales} = \sum_{\substack{p \in \text{medidas en paquete} \\ f \in \text{fundición}}} \text{Costo Medida}_{p,f} \} \quad \text{Ecuación 7}$$

s. a.

$$(1) \text{Emisión}_{f,p} = \text{Emisión}_f^{\text{sin paquete}} - \sum_{p \in \text{medidas en paquete}} \text{Reducción}_{p,f}$$

$$(2) \text{Concentración}_{l,p} = \frac{\text{Emisión}_{f,p}}{\text{FEC}_{f,l}}$$

$$(3) \text{Límite normativo}_{\text{Esc.NE}} \geq \text{Emisión}_{l,p}$$

Donde,

f: fundición

p: paquete de medidas

l: localidad

Esc NE: Escenario de NE

Los costos de inversión se anualizan según la vida útil del proyecto. Los costos de O&M son calculados según su requerimiento anual, por lo que se suman al costo de inversión anualizado. Así, se obtiene el costo total por año que deberá ser considerado.

En el caso de la evaluación de una Normativa, debido a que no existe un horizonte de evaluación definido, ya que estas pueden mantenerse en el tiempo, la anualización de los costos resulta crucial para poder realizar una evaluación bajo un mismo valor económico.

Finalmente, se calcula el valor anualizado de la inversión, este valor considera una tasa de descuento del 6% (MIDESO, 2018) en los sucesivos períodos de evaluación.

$$\text{Valor Anualizado} = \sum_{n=0}^n \frac{\text{Inversión}}{(1+r)^n}$$

Ecuación 8

Donde,

Inversión: Costos de adquisición del equipo y/o costo de operación & mantención

r: Tasa de descuento (6%).

n: Numero de períodos del pago (vida útil)¹¹.

¹¹ Se consideró una vida útil de 20 años.
Departamento de Economía Ambiental
División de Información y Economía Ambiental

5.2 Metodología de Beneficios en Salud

Los beneficios en salud derivan de cambios en concentraciones de SO₂ y As, para el cual se han encontrado en la literatura internacional, efectos crónicos para la generación de Cáncer y otros efectos de mortalidad para MP y MP_{2,5}.

El cambio en concentraciones ambientales se relaciona con el cambio en el número de eventos a través de la utilización de funciones dosis respuesta:

$$\Delta\text{Efecto}_{pj} = \sum_{i=1}^n (e^{(\beta_{pj}\Delta C_{pi})} - 1) \cdot P_{ijp} \cdot Y_{0j} \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

- ΔEfecto_{pj} : Cambio en efecto en salud j debido al delta de concentración del contaminante p [(mg/m³)⁻¹]
- β_{pj} : Coeficiente de riesgo unitario del efecto en salud j y contaminante p [(mg/m³)⁻¹]
- ΔC_{pi} : Cambio en concentración de contaminante p en ubicación i [mg/m³]
- P_{ijp} : Población i expuesta al contaminante p que puede sufrir efecto en salud j [habitantes]
- Y_{0j} : Tasa de incidencia base [casos / (habitantes- año)]

Al linealizar¹² la expresión anterior se obtiene:

$$\Delta\text{Efecto}_{pj} \approx \sum_{i=1}^n \beta_{pj} \cdot \Delta C_{pi} \cdot P_{ijp} \cdot Y_{0j} \quad \text{Ecuación 10}$$

Esto implica que para la evaluación se asume una relación lineal entre los niveles de concentración y daños en la salud.

Finalmente, el beneficio se obtiene multiplicando el número de casos por la valoración asociada de padecer uno de los efectos valorados, tal como se señala a continuación:

$$\text{Beneficio}_p = \sum_j \Delta\text{Efecto}_{pj} \cdot VU_j \quad \text{Ecuación 11}$$

Dónde:

- Beneficio_p : Beneficio de la reducción de la concentración ambiental de p .
- VU_j : Valoración unitaria de cada efecto j evaluado [USD/caso]

¹² Expansión de Taylor de primer orden de la función exponencial. La aproximación es razonable dado que el coeficiente de riesgo β es pequeño.

5.2.1 Coeficientes de Dosis-Respuesta

Para efectos de este estudio se consideraron los siguientes valores de betas y riesgo unitario empleados para SO₂, As y MP_{2,5} para distintas causas corresponden a:

Tabla 18: Beta dosis-respuesta en 1/ug/m³ y betas utilizados en el modelo

Efecto	As	SO ₂	MP _{2,5}
Mortalidad>30 años+	0	0	0,00946
Cáncer Respiratorio	0,0000043	0	0,00000
AH-Cardiovascular < 64 años	0	0	0,00140
AH-Cardiovascular > 65 años	0	0	0,00189
AH-Efectos Respiratorios agudos	0	0,0008	0,00139
AH-Efectos Respiratorios crónicos	0	0	0,00220
AH-Asma	0	0	0,00332
ERV-Asma	0	0	0,00139
ERV-Asma-0-14	0	0,005	0,00000
ERV-Asma-65+	0	0,011	0,00000
WLD- 18 a 64 años	0	0	0,00460

Fuente: Elaboración propia.

AH= admisiones hospitalarias, ERV= visitas a sala de urgencias, WLD= días de productividad perdidos.

5.3 Relación fundición Comuna.

Tabla 19: Relación fundición/Comuna

Comunas	CHU	ALT	POT	CHA	CAL	MH
Calama	1	-	-	-	-	1
ChiuChiu	1	-	-	-	-	1
La Negra	-	1	-	-	-	-
Antofagasta	-	1	-	-	-	-
El Salvador	-	-	1	-	-	-
Potreriillo	-	-	1	-	-	-
Panquehue	-	-	-	1	-	-
Llailay	-	-	-	1	-	-
Coya	-	-	-	-	1	-

Fuente: Elaboración propia en base a (MMA, 2022)

5.4 Medidas seleccionadas por fundición

Para seleccionar las medidas de chimeneas se buscaron las alternativas de abatimiento más económicas que permitieran reducir la concentración de salida de las chimeneas que incumplirían con la nueva normativa.

Tabla 20. Medidas seleccionadas para cumplimiento de artículo 5 por chimenea.

Fundición	Unidad Fiscalizable	Medida
Altonorte	Planta de Ácido 1	-
Altonorte	Planta de Ácido 3	Scrubber
Altonorte	Secador	-
Caletones	Planta de Tratamiento de Gases 1	Scrubber
Caletones	Planta de Tratamiento de Gases 2	Scrubber
Caletones	Secador 1	-
Caletones	Secador 2	Filtro de manga
Caletones	Secador 3	Filtro de manga
Chagres	Horno de Limpieza de Escorias	Filtro de manga
Chagres	Horno de Limpieza de Escorias	-
Chagres	Secador	-
Chuquicamata	Planta de Ácido 3	-
Chuquicamata	Planta de Ácido 4	-
Chuquicamata	Secador	Filtro de manga
Potreriillos	Planta de Ácido	Scrubber
Potreriillos	Secador	Filtro de manga
Ministro Hales	Planta de Ácido	-

Fuente: Elaboración propia.

Para seleccionar las medidas de mitigación para la norma de emisión total (Artículo N°6) se consideraron las medidas propuestas por el estudio para la elaboración de la Norma (MMA,2022). Se seleccionó la combinación de medidas con el menor costo, que junto con las medidas de abatimiento de las chimeneas permitieran el cumplimiento del artículo N°3 y 6. Esto se realizó con modelo de optimización que minimiza los costos y que busca que se cumpla con la norma.

De este modo las medidas seleccionadas finalmente fueron:

Tabla 21. Medidas seleccionadas por fundición para cumplir con Artículo 3 en donde un 1 significa que la medida fue seleccionada.

Medida de mitigación	Altornorte	Caletones	Chagres	Chuquicamata	Potrerillos
Planta tostación	0	0	0	0	0
Captura y tratamiento gases secundarios CPS	0	1	1	0	1
Flotación de escorias	0	0	0	0	0
PTGC	0	0	0	0	0
Captura y tratamiento sangrado reactor	1	0	0	0	0
Captura y tratamiento hornos escoria	0	0	0	0	0
Captura secundaria en boca del reactor	0	1	0	1	1
Alimentación carga fría CPS	0	0	0	0	1
Captura techo y filtro de manga reactor	0	0	1	0	0
Captura techo en reactor	0	0	0	0	0
Captura terciaria en CPS	1	0	0	1	1
ESP húmedo en horno anódico	0	0	0	1	1

Fuente: Elaboración propia en base a MMA, 2022

Ficha Resumen AGIES

ÍTEM	GLOSA	DESCRIPCIÓN
Identificación	Nombre AGIES	Análisis General de impacto Económico y Social del Anteproyecto de la revisión de la Norma de Emisión Fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico.
	Nombre instrumento normativo que da origen al AGIES	Anteproyecto norma de emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico
	Tipo de regulación	Norma de emisión
	Fecha de término del AGIES	Octubre 2024
	Alcance geográfico	Nacional
	Instrumento nuevo o revisión	Revisión
	Área de aplicación	Asuntos Atmosféricos
Metodología	Metodología	Análisis Costo-Beneficio, Beneficios salud en base a (<u>MMA 2013</u>)
	Normativas consideradas de línea base	Decreto Supremo N° 28 de 2013, que establece norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes emisoras de Arsénico.
	Nivel de evaluación de beneficios	Identificación de beneficios
	Tasa de descuento	5,5%
	Años de evaluación	2035-2044
	Valor del Dólar	895,5 promedio mayo 2024-junio 2024
	Valor de la UF	37.475 valor 6 de junio de 2024
Resultados	Costos estimados en millones USD/Año	61,0
	Beneficios estimados en millones USD	1,5