

DEPARTAMENTO DE ECONOMÍA AMBIENTAL – MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE

ANÁLISIS GENERAL DEL IMPACTO ECONÓMICO Y SOCIAL DEL ANTEPROYECTO DEL PLAN DE DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA PARA LA MACROZONA DEL VALLE CENTRAL DE LA REGIÓN DEL MAULE

Diciembre de 2024

Presentación

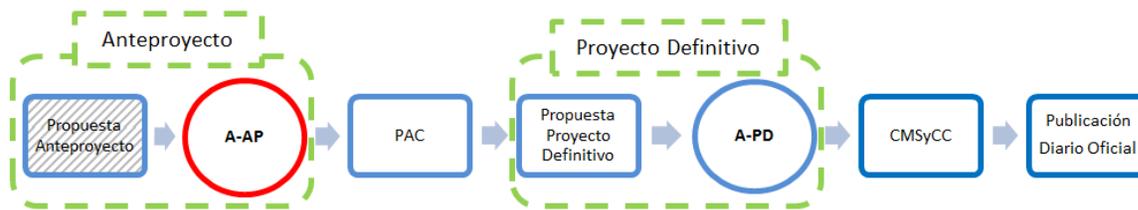
El Ministerio del Medio Ambiente (MMA) es el encargado de coordinar el diseño y establecimiento de normas de calidad y de emisión, así como Planes de Prevención y/o Descontaminación ambiental. De acuerdo a lo establecido en la Ley N°19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, en el Reglamento para la Dictación de Normas de calidad (D.S. N° 38/2012 del MMA) y en el Reglamento para la Dictación de Planes de Prevención y Descontaminación Ambientales (D.S. N°39/2012 del MMA), se requiere de un Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) de la propuesta regulatoria, que sirva como apoyo al proceso de Participación Ciudadana (PAC) y a la toma de decisiones, enfocada principalmente en el Consejo de Ministros para la Sustentabilidad y el Cambio Climático (CMS y CC). Esta tarea recae en el Departamento de Economía Ambiental (DEA) del Ministerio del Medio Ambiente.

El proceso de elaboración de un Plan de Descontaminación, 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,
- 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, de tal forma de 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, no obstante, 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 pueden ser, por ejemplo, antecedentes geográficos y demográficos, datos históricos, situación política y la percepción pública respecto a la contaminación.

Figura 1: Etapa actual del proceso regulatorio y del AGIES



Fuente: Elaboración propia.

El presente documento corresponde a la evaluación de costos y beneficios del Anteproyecto A-AP (en rojo, Figura 1) del Plan de Descontaminación Atmosférica para la Macrozona del Valle Central de la Región del Maule. Este plan contempla la revisión del Plan de Descontaminación Atmosférica de las comunas de Talca y Maule¹ y la revisión del Plan de Descontaminación Atmosférica para el valle central de la Provincia de Curicó², permitiendo la elaboración de un solo Plan de Descontaminación Atmosférica para toda la cuenca atmosférica del Valle Central de la Región del Maule.

Este análisis evalúa el cumplimiento de la norma anual (20 ug/m^3) y diaria de $\text{MP}_{2,5}$ (50 ug/m^3), la que supone el peor escenario de evaluación y significa la mayor dificultad a la hora de evidenciar el cumplimiento del PDA. Asegurar el cumplimiento de la norma diaria permite justificar el cumplimiento de la norma anual de $\text{MP}_{2,5}$, y consecuentemente de la norma diaria de MP_{10} .

Se estiman los beneficios valorizables producto de la reducción de casos de mortalidad y morbilidad en la población. El análisis incluye costos adicionales de medidas ya implementadas en los PDA que son revisados, como la implementación de nuevas medidas para las comunas que se adicionan al PDA, o un mayor número de recambios de calefactores y de acondicionamientos térmicos.

Los resultados presentados corresponden a las medidas definidas a la fecha de cierre de este informe, las que podrían sufrir modificaciones en etapas posteriores, tales como PAC, Consejos Consultivos y CMS y CC.

¹ D.S. N°49 de 2016 del Ministerio del Medio Ambiente, que Establece el Plan de Descontaminación Atmosférica para las comunas de Talca y Maule.

² D.S. N°44 de 2019 del Ministerio del Medio Ambiente, que Establece el Plan de Descontaminación Atmosférica para la Provincia de Curicó.

Resumen

El presente documento presenta los resultados del Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) Plan de Descontaminación Atmosférica para la Macrozona del Valle Central de la Región del Maule el plan contempla la de revisión del Plan de Descontaminación Atmosférica de las comunas de Talca y Maule y la revisión del Plan de Descontaminación Atmosférica para el valle central de la Provincia de Curicó. Además de la incorporación de las comunas de: Colbún, Linares, Longaví, Parral, Retiro, San Javier, Villa Alegre y Yerbas Buenas. Su objetivo es evaluar los costos y beneficios asociados a las medidas propuestas en el Anteproyecto dentro de un plazo de 10 años (2026-2035).

Mediante el Decreto Supremo N°53 del 2015 del Ministerio del Medio Ambiente (MMA) se declaró zona saturada por material particulado MP_{2,5}, como concentración de 24 horas, al valle Central de la provincia de Curicó y mediante el Decreto Supremo N°7 del 2021 del Ministerio del Medio Ambiente (MMA) se declaró zona saturada por material particulado MP_{2,5}, como concentración de 24 horas, al valle Central de la Región del Maule. Adicionalmente, la Resolución Exenta N°254, de 2021, del Ministerio del Medio Ambiente, establece la revisión del PDA para las comunas de Talca y Maule. Además, la Resolución Exenta N°1292, de 2022, del Ministerio del Medio Ambiente, establece la revisión del PDA para el Valle Central de la provincia de Curicó y ordena acumulación, en conformidad con el procedimiento y etapas señaladas en el artículo 44 de la ley 19.300 y en el D.S. N° 39, de 2013, del Ministerio del Medio Ambiente.

La Resolución Exenta N°1292, de 2022, del Ministerio del Medio Ambiente, resuelve la acumulación del proceso de revisión y actualización del Plan de Descontaminación Atmosférica para el Valle Central de la provincia de Curicó; el proceso de Elaboración del PDA para el Valle Central de la Región del Maule; y el de Revisión y actualización del PDA para las comunas de Talca y Maule, en un solo proceso que se denominará "Plan de Descontaminación Atmosférica para la Macrozona del Valle Central de la Región del Maule".

Debido a esta unificación de procesos, este AGIES estimará los costos y beneficios asociados a las nuevas medidas para las comunas recientemente incorporadas y el robustecimiento de las medidas ya existentes de los PDAs de las comunas de Talca y Maule; y la provincia de Curicó.

Las características territoriales y atmosféricas asociadas a este Plan, el que considera veinte comunas, presentan un desafío respecto a la evaluación. Para poder estimar de manera más concreta los efectos de las medidas con respecto a las estaciones de control (estaciones de calidad del aire), la evaluación del AGIES se realizó separando la zona saturada en tres zonas se según su provincia: (1) la zona Curicó cuya calidad del aire está asociada al cumplimiento de los valores de la estación de monitoreo Curicó, (2) la zona Talca, cuya calidad del aire corresponde al cumplimiento de los valores en la estación La Florida Talca; (3) y la zona Linares, cuya calidad del aire corresponde al cumplimiento de los valores en la estación Linares.

Respecto a las emisiones en las comunas, el principal sector emisor es el residencial, el que se estima que aporta cerca del 80,7% de las emisiones de MP_{2,5}. Consecuentemente, las medidas propuestas en el Anteproyecto han sido reforzadas con énfasis en dicho sector mediante (i) el mejoramiento térmico de viviendas y la propuesta de estándares térmicos para viviendas

nuevas, (ii) el recambio por equipos de calefacción y cocción más eficientes y menos contaminantes, (iii) la prohibición de quemas agrícolas durante los meses de invierno, (iv) la prohibición gradual de calefactores que no cumplan con estándares de emisión.

Los resultados del AGIES indican que:

- Las medidas propuestas en el Anteproyecto permitirían cumplir la norma diaria de $MP_{2,5}$ en el año 2030 en la estación Curicó, asociada a las comunas de Curicó, Molina Rauco, Romeral, Sagrada Familia y Teno; en el año 2030 en la estación y La Florida Talca asociada a las comunas de Maule, Pelarco, Río Claro, San Clemente, San Rafael y Talca; y el año 2033 para la estación Linares, asociada a las comunas de Colbún, Linares, Longaví, Parral, Retiro, San Javier, Villa Alegre e Yervas Buenas (Figura A, Figura B y Figura C). Esto implica un cumplimiento total para todas las comunas evaluadas.
- A partir de las características de las emisiones de las comunas evaluadas, en las que el 80,7% proviene del sector residencial, se concluye que se cumple con la norma diaria de MP_{10} , ya que las medidas fueron diseñadas para reducir la emisión tanto de $MP_{2,5}$ como la de MP_{10} (siendo la norma diaria de $MP_{2,5}$ la de mayor exigencia).
- La reducción de emisiones (Figura E) generará los siguientes beneficios: reducción de los casos de mortalidad, reducción de efectos en la salud humana con la consecuente disminución de costos en salud y reducciones en consumo de combustible para calefacción. Adicionalmente, la reducción de MP posee otros beneficios no cuantificados en este análisis como la mejora en la visibilidad y disminución de efectos negativos en ecosistemas, entre otros.
- Los beneficios valorizados se estiman en US\$545 millones, para un horizonte de evaluación de 10 años³. Estos están dados por la reducción de casos de mortalidad, morbilidad y ahorros en calefacción (Figura D y Figura F).
- Los costos asociados a la implementación del Plan, considerando un horizonte de evaluación de 10 años, ascienden a US\$86,9 millones y corresponden a: acondicionamiento térmico de viviendas, subsidios para el recambio de calefactores. Un 62,7% de estos costos son asumidos por el Estado (Figura F).
- La valoración de los beneficios y costos adicionales del PDA indica que su implementación es altamente rentable desde la perspectiva social. Los beneficios netos⁴ en valor presente a 10 años se estiman en US\$ 458 millones, lo que constituye una razón beneficio-costos de 6,3 (Figura F).

Este análisis concluye que, junto con permitir el cumplimiento de las normas vigentes del Estado de Chile, la norma es consistente con los compromisos del Ministerio del Medio Ambiente, al crear instrumentos que disminuyen la contaminación y promueven la equidad entre sus habitantes.

³ Supuestos generales: Valor de la vida estadística=10.850 UF al año 2002 (Iragüen y Ortúzar, 2004), proyectado según poder de paridad de compra y crecimiento de la población / Tasa de descuento=5,5% / Horizonte de evaluación=10 años / Tipo cambio dólar: 927,5 CLP / Tipo cambio UF: 37.950 CLP.

⁴ Los beneficios netos corresponden a los beneficios menos los costos.

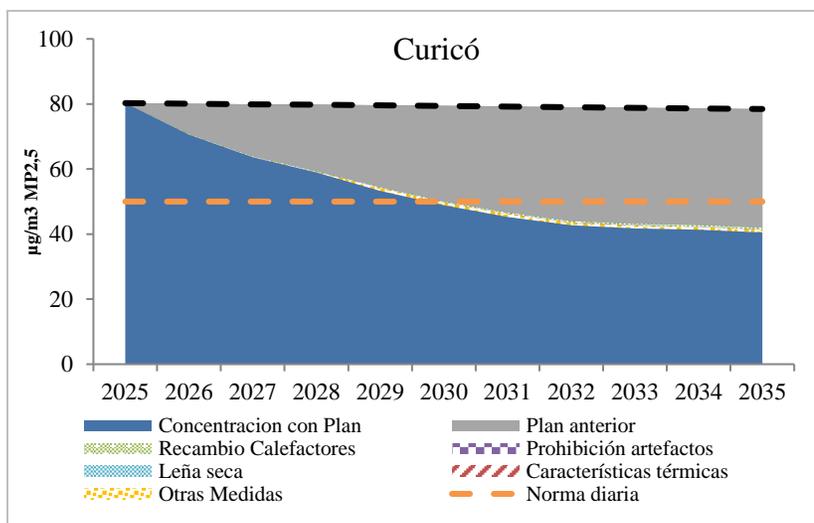


Figura A: Reducción de la concentración diaria de $\text{MP}_{2,5}$ en Curicó

El gráfico presenta la reducción de la concentración de $\text{MP}_{2,5}$ diaria asociada a los valores de la estación Curicó. En él, se observa que se alcanza el objetivo de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al año 2030 debido principalmente a las reducciones que aún generan las medidas del Plan vigente (área de color gris).

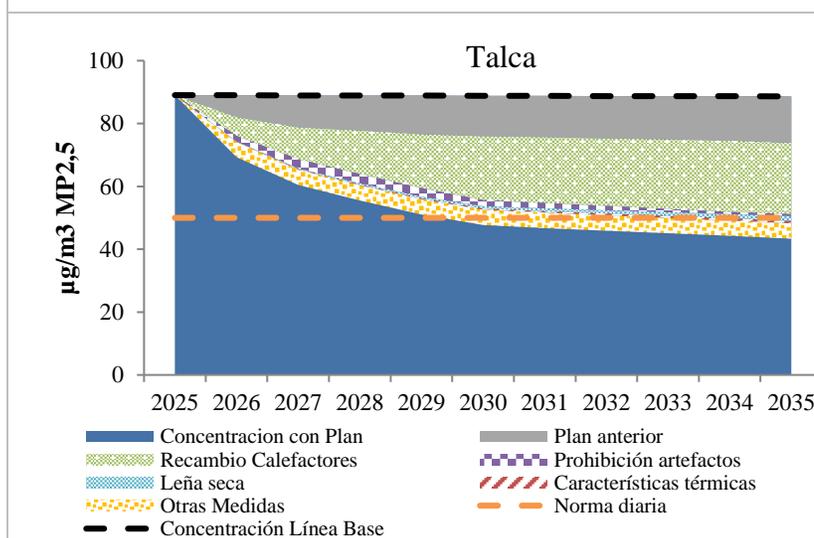


Figura B: Reducción de la concentración diaria de $\text{MP}_{2,5}$ en Talca

La reducción de la concentración de $\text{MP}_{2,5}$ diaria asociada a los valores de la estación La Florida Talca (estación con la mayor concentración entre las estaciones cercanas, siendo así el escenario más restrictivo de cumplimiento) muestra que se alcanza el objetivo de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al año 2030. Esta reducción de concentración se obtiene debido a medidas del plan anterior y el nuevo plan propuesto, siendo la principal medida el recambio de calefactores.

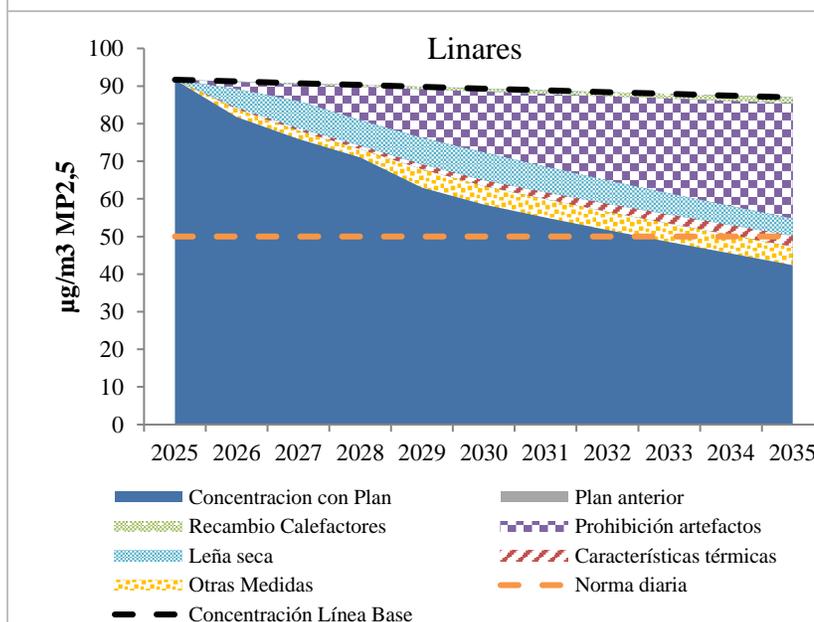
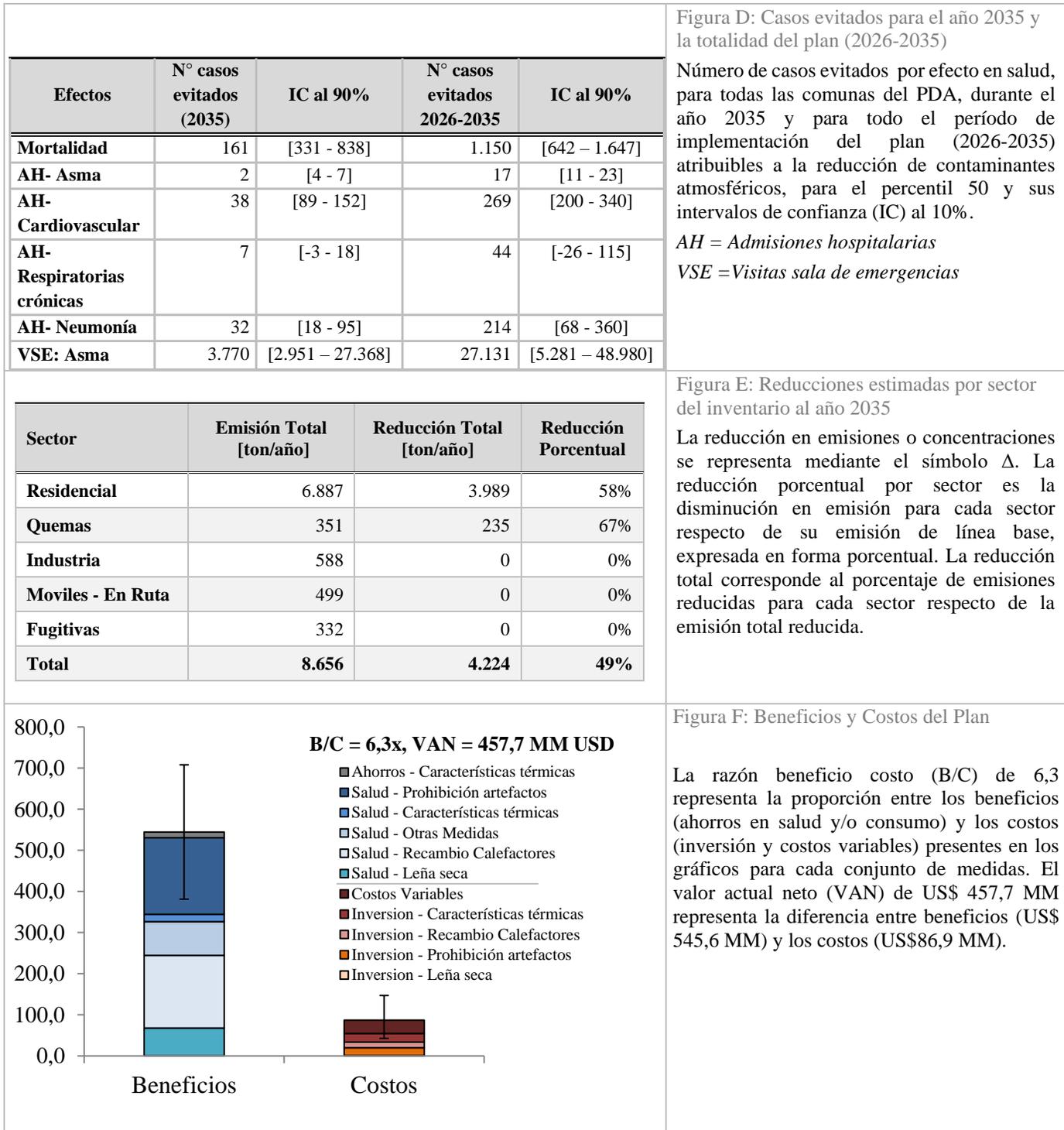


Figura C: Reducción de la concentración diaria de $\text{MP}_{2,5}$ en Linares

La reducción de la concentración de $\text{MP}_{2,5}$ diaria asociada a los valores de la estación Linares muestra que se alcanza el objetivo de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al año 2033. Esta reducción de concentración se obtiene principalmente a la prohibición gradual de calefactores.



ÍNDICE

1. ANTECEDENTES.....	8
1.1 MEDIDAS EVALUADAS.....	8
1.2 CONSIDERACIONES TERRITORIALES DEL PDA.....	9
1.3 CONCENTRACIONES ATMOSFÉRICAS.....	11
1.4 INVENTARIO DE EMISIONES.....	11
2. METODOLOGÍA DEL AGIES.....	12
2.1 ASIGNACIÓN PORCENTUAL DE LAS MEDIDAS ENTRE SECTORES.....	15
3. RESULTADOS.....	16
3.1 EFECTOS EN CALIDAD DEL AIRE.....	16
3.2 REDUCCIÓN DE EMISIONES.....	19
3.3 REDUCCIÓN DE EFECTOS A LA SALUD: CASOS EVITADOS.....	20
3.4 INDICADORES ECONÓMICOS.....	21
3.4.1 <i>Análisis Costo-Beneficio</i>	21
4. CONCLUSIONES.....	23
5. REFERENCIAS.....	25
6. ANEXOS.....	27
6.1.1 <i>Inventario de emisiones proyectado</i>	27
6.2 RESULTADOS POR MEDIDA.....	28
6.3 METODOLOGÍA PARA EL SECTOR RESIDENCIAL.....	29
6.4 SINERGIAS DE MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES.....	30
6.5 BENEFICIOS EN LA SALUD.....	31
6.6 EVALUACIÓN DE COSTOS.....	33
6.7 FICHAS DE MEDIDAS.....	35
6.7.1 <i>Recambio de calefactores</i>	35
6.7.2 <i>Acondicionamiento térmico</i>	35
6.7.3 <i>Prohibición gradual calefactores</i>	36
6.7.4 <i>Quemas agrícolas</i>	37
6.7.5 <i>Valores unitarios de beneficios</i>	38
6.8 COEFICIENTES DE RIESGO UNITARIO.....	38
6.9 FICHA DE ELABORACIÓN DEL AGIES.....	39

1. Antecedentes

Mediante Decreto Supremo N° 12, de 04 de febrero de 2010, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, publicado en el Diario Oficial el 22 de junio de 2010, se declaró Zona Saturada por Material Particulado Respirable MP10 a las comunas de Talca y Maule; mediante el Decreto Supremo N°53 del 2015 del Ministerio del Medio Ambiente (MMA) se declaró zona saturada por material particulado MP_{2,5}, como concentración de 24 horas, al valle Central de la provincia de Curicó y mediante el Decreto Supremo N°7 del 2021 del Ministerio del Medio Ambiente (MMA) se declaró zona saturada por material particulado MP_{2,5}, como concentración de 24 horas, al valle Central de la Región del Maule. Adicionalmente, la Resolución Exenta N°254, de 2021, del Ministerio del Medio Ambiente, establece la revisión del PDA para las comunas de Talca y Maule. Además, la Resolución Exenta N°1292, de 2022, del Ministerio del Medio Ambiente, establece la revisión del PDA para el Valle Central de la provincia de Curicó y ordena acumulación, en conformidad con el procedimiento y etapas señaladas en el artículo 44 de la ley 19.300 y en el D.S. N° 39, de 2013, del Ministerio del Medio Ambiente.

El PDA para las comunas de Talca y Maule, establecido en el DS N°49 del año 2016 establece en su artículo N° 74 y en el PDA para el valle Central de la Provincia de Curicó establece en su artículo N° 58 que “Con el propósito de complementar en lo que sea necesario, los instrumentos y medidas, a fin de cumplir las metas de reducción de emisiones planteadas, se establece para la revisión y actualización del presente decreto, un plazo de 5 años desde la publicación del mismo en el Diario Oficial.” siendo este documento la evaluación de la actualización de dicho Plan en conjunto con las medidas propuestas para toda la cuenca atmosférica del Valle Central de la Región del Maule.

A continuación, se presentarán los antecedentes de las nuevas propuestas asociadas a la revisión del Plan de Talca y Maule y al Plan para el valle central de la provincia de Curicó. Esta evaluación considera una vigencia de 10 años, por lo que este análisis comprende un plazo entre los años 2026 al 2035. En este período, se espera dar cumplimiento a la norma por MP_{2,5} diaria y a las normas anuales de MP_{2,5} y diaria de MP₁₀ para el Valle Central de la Región del Maule.

1.1 Medidas evaluadas

Las modificaciones en las medidas propuestas en el AP del PDA, las cuales a su vez aplicarán a todas aquellas comunas que no posean plan dentro de la zona declarada, se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 1: Medidas con cambios propuestas evaluadas por el AGIES

Medida	PDA
Recambio Calefactores	Artículo 13: se implementará un programa de recambio de calefactores y cocinas a leña, de al menos 52.000 calefactores, esta cifra contabilizará los recambios realizados a la fecha.

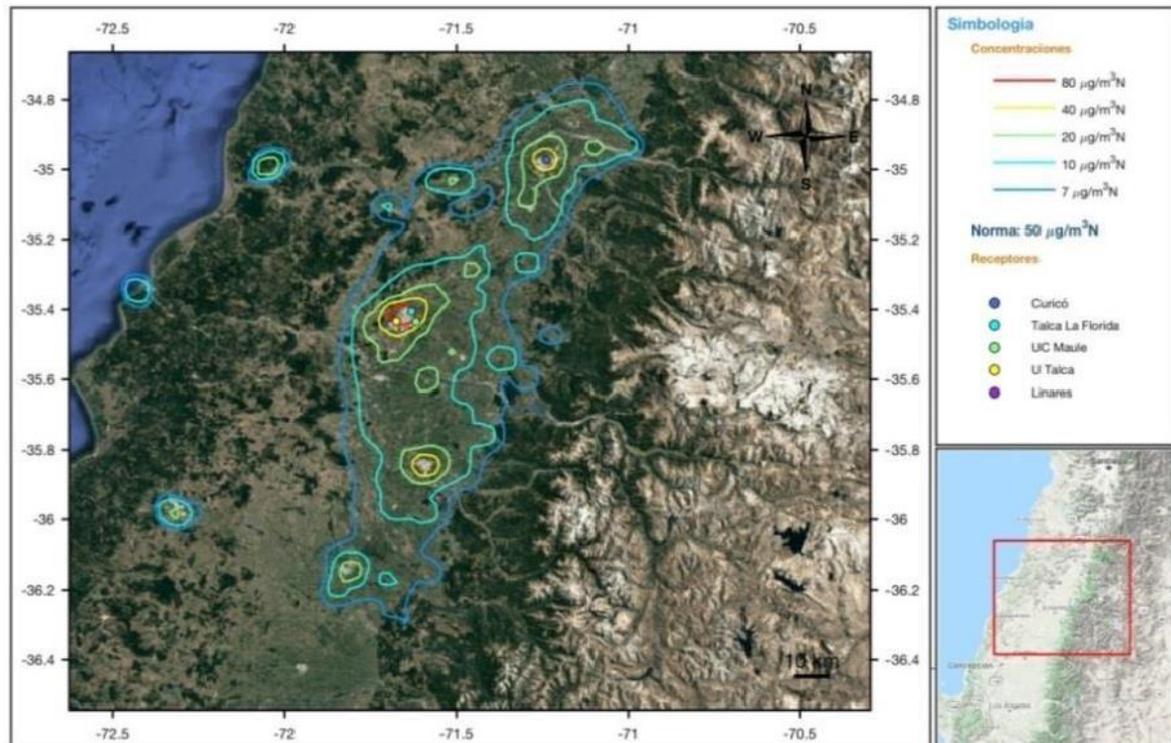
Acondicionamiento térmico de viviendas	Artículo 15: Se implementarán al menos 68.000 subsidios de acondicionamiento térmico, hasta el término de la vigencia de este decreto. Los estándares térmicos de los recambios han sido definidos para viviendas existentes en el artículo 17 del anteproyecto
Leña seca	Artículo 4: Toda leña comercializada en la zona saturada deberá cumplir con los requerimientos técnicos de la Norma NCh 2907.
Prohibición gradual de calefactores	Artículo 11: Se prohíbe a partir del 4° año de entrada en vigor del Plan, en toda la zona saturada, la utilización de calefactores que no cumplan con la normativa.
Prohibición meses quema	Artículo 36: Se prohíbe la quema de rastrojos y vegetación agrícola entre el 1° de mayo al 31 de agosto.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que también se implementarían medidas de límites de emisión a calderas las cuales no son evaluadas debido a que no se cuentan con antecedentes suficientes.

1.2 Consideraciones territoriales del PDA

De los resultados del “Informe técnico para declarar Zona Saturada por material particulado respirable fino (MP_{2,5}) a del Valle Central de la Región del Maule” (SEREMI del Medio Ambiente Región del Maule, 2020), se puede observar que, considerando las variables climáticas, la distribución de la concentración en la zona saturada está estrechamente relacionada con zonas geográficas específicas, estas son Curicó y el complejo Talca-Maule y Linares (ver Figura 2).

Figura 2: Distribución del percentil 98 de MP_{2,5} diario para la zona saturada

Fuente: Informe técnico para declarar Zona Saturada por material particulado fino respirable (MP_{2,5}) a la Macrozona del Valle Central de la Región del Maule.

A partir de los modelos de dispersión atmosféricos que relacionan las condiciones meteorológicas, territoriales y la emisión, la zona saturada se ha dividido en tres zonas, correspondientes a las provincias de Curicó, Talca y Linares. La primera abarca las comunas de Curicó, Molina, Rauco, Romeral, Sagrada Familia y Teno, cuyos efectos en la reducción de la contaminación se relacionan con la calidad del aire de la estación de monitoreo Curicó. La segunda considera las comunas de Maule, Pelarco, Río Claro, San Clemente, San Rafael y Talca, cuyos efectos en la reducción de la emisión se asocian a las concentraciones de la estación La Florida Talca. La tercera considera las comunas de Colbún, Linares, Longaví, Parral, Retiro, San Javier, Villa Alegre e Yervas Buenas, cuyos efectos en la reducción de la emisión se asocian a las concentraciones de la estación Linares. Esta separación se realiza con el fin de dar mayor certeza a la modelación del AGIES.

Debido a lo anterior, de manera adicional se han dividido las medidas, lo que quiere decir que un porcentaje de los recambios y acondicionamientos térmicos se utilizarán para modelar la reducción de emisiones para el primer sector y otro porcentaje para el segundo sector. Los porcentajes de recambios y acondicionamientos empleados en los sectores fueron asignados con relación a la necesidad del sector para poder cumplir con la normativa vigente, de modo que las comunas asociadas a la estación Talca considerarán un mayor porcentaje con respecto a las comunas asociadas a la estación las otras dos estaciones.

Cabe señalar que esta diferenciación en el territorio se establece exclusivamente para la modelación del AGIES y no representa una obligatoriedad dentro del Plan de Descontaminación.

1.3 Concentraciones atmosféricas

En la Tabla 2 se presentan los valores de las concentraciones utilizadas para la modelación del Anteproyecto propuesto. Estos valores son utilizados como información de línea base y para los cuales se calcula la reducción en concentración de las medidas y el cumplimiento del plan. Los criterios utilizados para la elección del valor corresponden a la data coincidente en su temporalidad con la elaboración de los inventarios de emisión (año base 2023), y buscan representar el escenario de mayor concentración de las estaciones con mediciones en las comunas presentes en la Macrozona del Valle Central de la Región del Maule. Por tanto, se trata del escenario de mayor dificultad para su cumplimiento.

Tabla 2: Concentraciones $\mu\text{g}/\text{m}^3$ utilizadas en la modelación

Estación	Medida	MP _{2,5}	Criterio
Curicó	Diaria	98	Percentil 98 para los datos de concentración del año 2023.
La Florida Talca	Diaria	105	Percentil 98 para los datos de concentración del año 2023.
Linares	Diaria	93	Percentil 98 para los datos de concentración del año 2022, debido a falta de data de 2023.

Fuente: Elaboración propia.

1.4 Inventario de emisiones

La Tabla 3 presenta las emisiones estimadas para el año 2026 a partir de la metodología y modelo utilizados para la elaboración del AGIES, para los distintos sectores de la zona estudiada. Este inventario toma como base el inventario del PDA del año 2017 y una proyección basada en el crecimiento de la población, crecimiento del parque automotriz, crecimiento industrial y el recambio natural de artefactos, la entrada de viviendas nuevas con mejores estándares de aislación, etc.(ver inventario proyectado entre el año 2017 y 2035 en Tabla 8) El mayor aporte es generado por el sector residencial, con un 80.7% de participación en las emisiones de MP_{2,5}, debido principalmente al uso de biomasa en la calefacción.

Tabla 3 : Inventario de emisión ton/año base calculadas para MP_{2,5} estimado para el año 2026

Sector del Inventario	Curicó	Talca	Linares	Total
Área - Residencial	1.932	3.344	1.829	7.105
Área - Quemadas	4	146	201	351
Puntual - Industria	190	294	104	588
Móviles - En Ruta	128	165	206	499
Fugitivas	80	111	141	332
TOTAL	2.333	4.060	2.482	8.874

Fuente: Elaboración propia.

2. Metodología del AGIES

La metodología empleada en la elaboración del AGIES es el Análisis Costo-Beneficio (ACB), ampliamente utilizado y recomendado en la literatura para la evaluación de proyectos sociales (Boardman *et al.*, 2006; Hanley and Spash, 1993; Layard and Glaister, 1994). La reducción de emisiones asociadas a Planes de Prevención o de Descontaminación Ambiental tiene efectos medioambientales, económicos y sociales que se resumen en beneficios para los receptores de las emisiones y costos para el regulado.

En primer lugar, es importante especificar que, al tratarse de la revisión de un PDA, la línea base considera las medidas ya implementadas por el plan que se encuentra en vigencia, y adicionalmente considera que los cumplimientos de las metas de ese Plan serán independientes en cuanto a la evaluación de costos y beneficios de las medidas adicionales impulsadas por este nuevo PDA. De este modo, esta evaluación considera medidas que aún tienen efectos de reducción del PDA de las comunas de Talca-Maule; y de la provincia de Curicó, pero no considera los costos o beneficios que estas medidas generen a futuro, puesto que ya fueron cuantificadas en la evaluación del PDA vigente a la fecha. Su consideración podría significar un error metodológico al cuantificar doblemente sus efectos en los costos y beneficios.

Por esto, si bien el nuevo PDA traerá una modificación en la cantidad de recambios y acondicionamientos térmicos a implementarse, se evalúa para comunas de Talca-Maule; y de la provincia de Curicó i) el adicional de recambio de calefactores y ii) el adicional de acondicionamientos térmicos, mientras que para las demás comunas se evalúa la totalidad de las medidas definidas en la Tabla 1.

Las reducciones de emisiones son atribuibles a las medidas definidas en el Anteproyecto, las que afectan heterogéneamente a los distintos sectores involucrados, siendo de especial relevancia las aplicadas al sector residencial. En este caso, se consideraron las sinergias que

genera la implementación de dichas medidas de manera secuencial⁵, evitando así sobredimensionar la reducción de emisiones para evaluar la efectividad de cada una de las medidas de forma realista. Para mayor detalle, ver la sección 6.4.

El AGIES es elaborado mediante una secuencia de análisis o modelos que permiten relacionar cambios en las emisiones de línea base con los beneficios y costos percibidos por los diferentes agentes impactados de la regulación. Por ello, el modelo integra una sección de emisiones, un modelo de emisión-calidad, un modelo de concentración-respuesta basado en estudios epidemiológicos⁶ y un modelo económico de valorización de los beneficios. Paralelamente, se integra información sobre los costos de las medidas que pueden ser relacionados con los beneficios para realizar el ACB (ver Figura 3) (Szklo & Nieto, 2014).

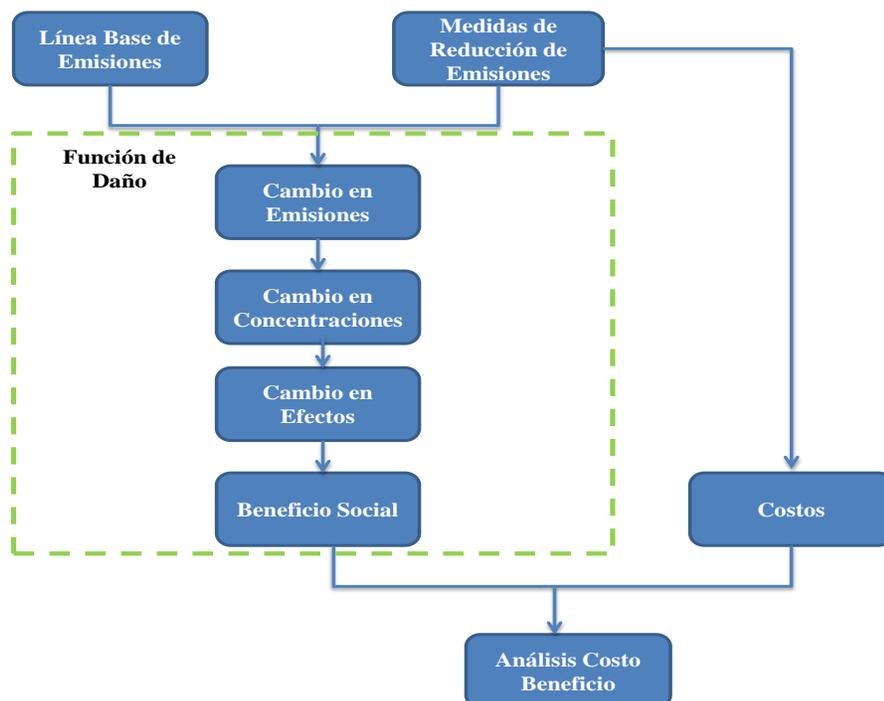
Los beneficios valorizados de las medidas del plan corresponden a impactos en la salud de la población expuesta debido a la disminución de concentración ambiental de MP_{2,5} producto de la reducción de emisiones de las fuentes reguladas. Específicamente, se valoran los eventos evitados de mortalidad prematura, morbilidad, días de actividad restringida y productividad laboral perdida. Adicionalmente, se valoran los beneficios por ahorros en el uso de combustible destinado a calefacción debido a medidas que mejoran la eficiencia o reducen la demanda de este. En relación con los costos, se incorporan la inversión y costos de operación, incluyendo los subsidios a otorgar por el Estado.

La metodología es aplicada para todas las comunas del PDA, considerando una aplicación proporcional a la población de las medidas, tal como se explicó en la sección 1.2 del presente documento.

⁵ Por ejemplo, si dos medidas con eficiencias del 70% y 80% son aplicadas sobre una misma fuente emisora, el orden que implemente la medida afecta la efectividad de cada una de ellas, no así el valor de la reducción total de emisiones, que en este caso correspondería a $1 - (1-0,7) \cdot (1-0,8) = 0,94$.

⁶ Epidemiología se define como el estudio de la distribución y determinantes de estados de salud o eventos en poblaciones determinadas y la aplicación de este estudio para controlar los problemas de salud (Szklo & Nieto, 2014).

Figura 3: Diagrama metodológico para la evaluación del AGIES, Análisis Costo-Beneficio



Fuente: Evaluación propia basado en (EPA 2000; MMA 2013).

Dentro de las limitaciones del análisis se encuentran los beneficios por reducción de $MP_{2,5}$ que no fueron valorizados, tales como la mejora en visibilidad, en materiales, efectos sobre ecosistemas, disminución de gases de efecto invernadero, beneficios para la agricultura y suelos, imagen país, externalidades positivas asociadas a la educación ambiental, efectos en la salud en otras comunas del país y beneficios derivados de la reducción de *Black Carbon*⁷. Esto se debe a la carencia de metodologías validadas a nivel internacional o falta de información base para hacer la evaluación correspondiente.

Finalmente, es importante recalcar que los resultados del AGIES intentan orientar a los tomadores de decisiones mediante el uso de la metodología aquí planteada, sin embargo, no debe ser considerada como el único criterio para la aprobación de una política pública (Fisher 1991; Arrow, Cropper et al. 1996). Ésta debe tener una visión integral que incorpore otras variables, tales como el riesgo de la población expuesta⁸, consideraciones culturales de la zona regulada, aspectos sociales, entre otras⁹.

⁷ Es un agente capaz de afectar el clima, formado debido a combustión incompleta de combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa. Corresponde a carbón puro que absorbe calor en la atmósfera, con tiempo de residencia que va de días a semanas. Se asocia al aumento de la temperatura global.

⁸ En este caso particular de un PDA, el riesgo en salud está dado de manera implícita con la norma de calidad ambiental de MP_{10} y $MP_{2,5}$, la cual debe cumplirse en todo el territorio nacional.

⁹ D.S. N°38 y D.S. N°39/2012 del MMA incorporan, entre otras cosas, la generación de comités, la Participación Ciudadana y el Consejo de Ministros para la Sustentabilidad y el Cambio Climático los cuales intentan incorporar los aspectos mencionados.

2.1 Asignación porcentual de las medidas entre sectores

Para realizar la distribución de medidas de recambio de calefactores y de reacondicionamiento térmico, se realizó necesidad para cumplir con la normativa. De este modo la Tabla 4, presenta la distribución de las medidas asignadas para estas medidas.

Tabla 4: Asignación porcentual entre sectores del PDA, asociados a cada estación de monitoreo

Medida	Recambios Calefactores	Reacondicionamiento Térmico
Sector Curicó	0,9%	18,4%
Sector Talca	96,6%	63,2%
Sector Linares	2,45%	18,4%

Fuente: Elaboración propia.

Es importante aclarar que esta distribución es un supuesto construido para poder realizar la evaluación del Plan bajo un escenario conservador, pero no representa el mandato legal del PDA ni tampoco reproduce la real aplicación de las medidas a futuro, ya que su aplicación dependerá de otros factores, tales como la postulación de los participantes, determinaciones técnicas, u otras.

Sin embargo, cambios menores en la distribución no afectarán mayormente los resultados. Por ejemplo, un cambio en 1.000 acondicionamientos térmicos y/o recambios de calefactores al año entre un sector u otro no implican el incumplimiento de las metas del Plan.

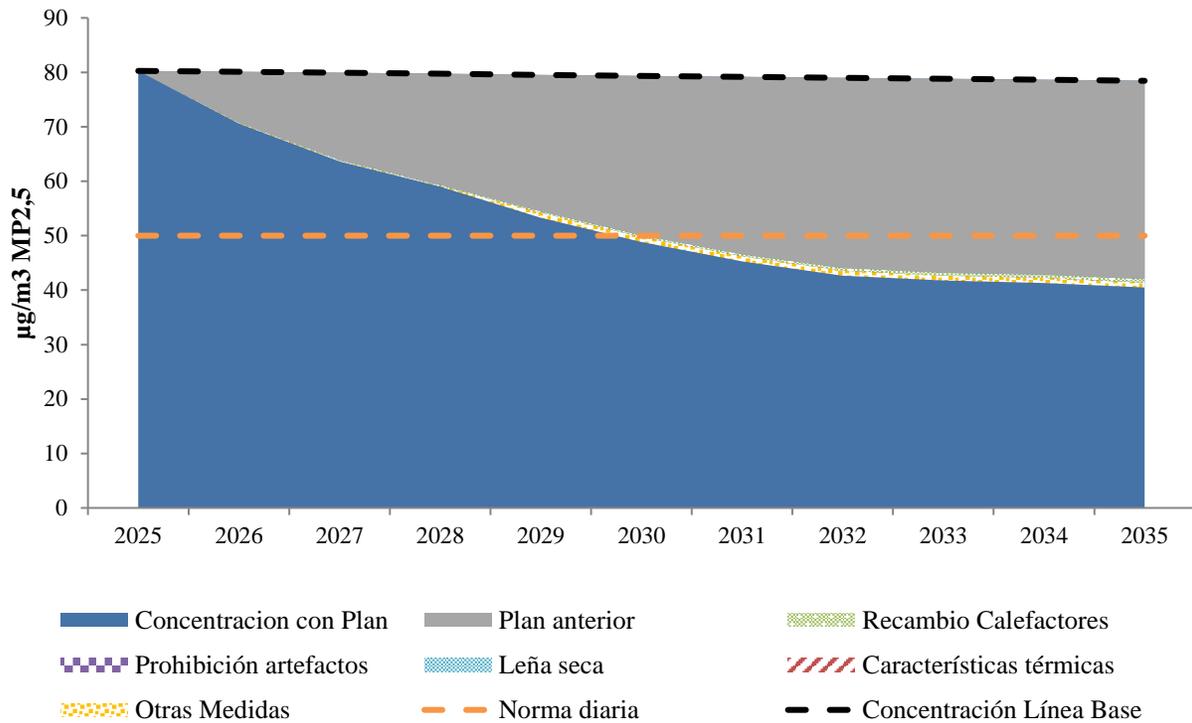
3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados de las medidas evaluadas y definidas en la Tabla 1 para la reducción de la concentración atmosférica. También se calculan los costos y beneficios en salud asociados a la reducción de la concentración atmosférica por $MP_{2,5}$, según la metodología detallada anteriormente.

3.1 Efectos en calidad del aire

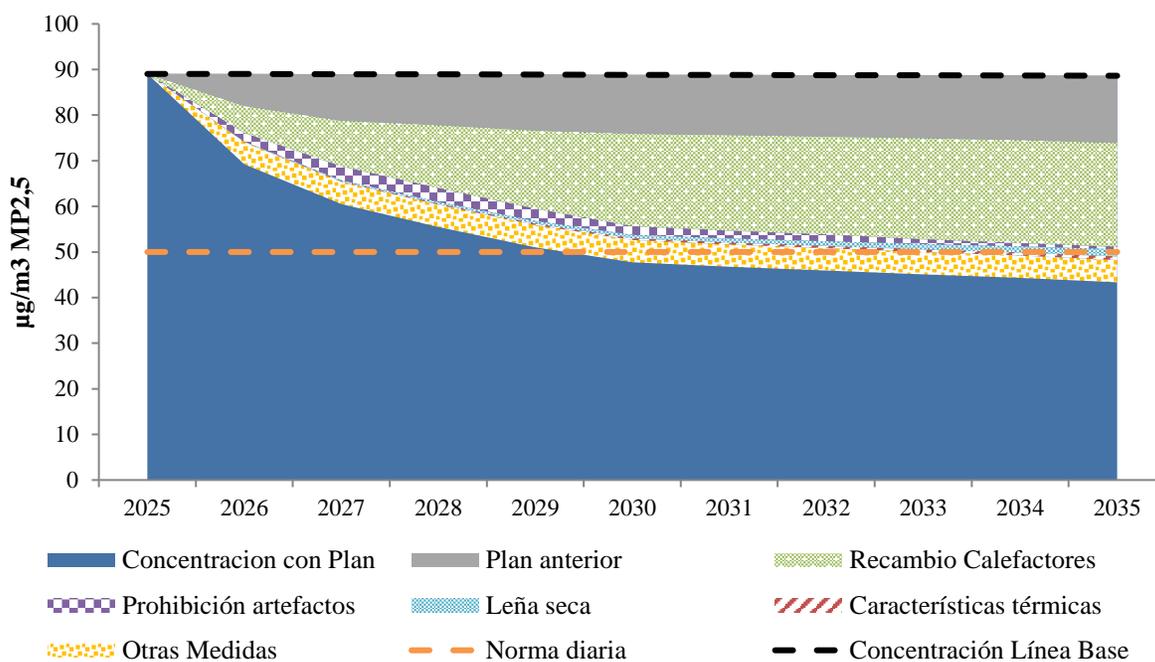
La implementación de las medidas se estima a partir del año 2026, por lo que el Plan comprenderá un periodo de 10 años calendario (2026-2035, del 1 de enero a 31 de diciembre). Para la evaluación de este Plan, se hace el supuesto de que la evaluación más restrictiva es la de $MP_{2,5}$ diario, ya que es la que necesita una mayor disminución porcentual en concentración para cumplir con la normativa, por lo cual se utilizará esta medida para considerar el cumplimiento del plan en su norma de $MP_{2,5}$ diaria y en las normas de MP_{10} diarias y anuales.

Considerando los supuestos anteriormente mencionados, la Figura 4 presenta la reducción en las concentraciones diarias para $MP_{2,5}$ para el sector Curicó. Se puede observar que al año 2030 y producto de las nuevas medidas del Plan, se genera un cumplimiento de la norma ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), alcanzando una concentración de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al año 2035, con todas las medidas del Plan ya implementadas. Cabe destacar que gran parte de esta reducción es por medidas del plan anterior, como la comercialización de leña seca o prohibición gradual de calefactores generan reducciones en el tiempo.

Figura 4: Reducción de la concentración diaria de $MP_{2,5}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], estación Curicó.

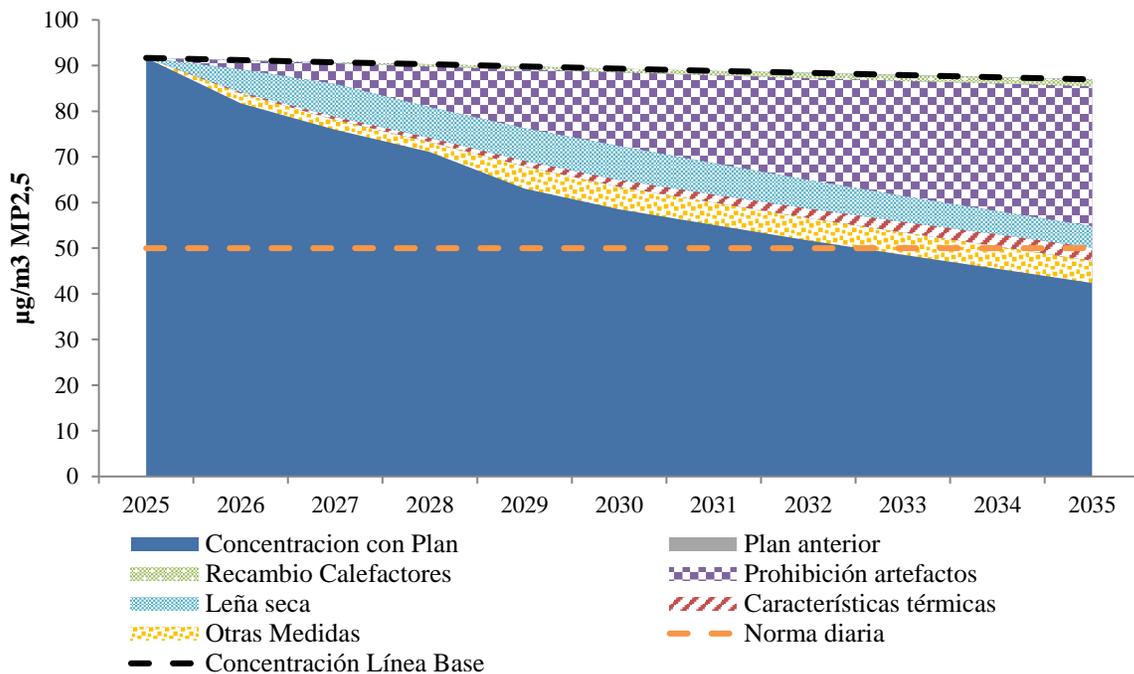
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5 presenta las reducciones estimadas para la concentración atmosférica de $MP_{2,5}$ en su métrica diaria para el sector de Talca-La Florida. Se estima que la norma diaria para $MP_{2,5}$ se cumplirá el año 2030, logrando una concentración de $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y manteniendo este cumplimiento hasta el año 2035, en donde la concentración se estima en $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos valores suponen un descenso de los niveles establecidos por la norma, por consiguiente, se considerará un cumplimiento en los objetivos del PDA para ambos sectores. Esto se traduce en el cumplimiento del PDA para toda la zona saturada.

Figura 5: Reducción de la concentración diaria de $MP_{2,5}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], estación La Florida Talca.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 6 presenta las reducciones estimadas para la concentración atmosférica de $MP_{2,5}$ en su métrica diaria para el sector de Linares. Se estima que la norma diaria para $MP_{2,5}$ se cumplirá el año 2033, logrando una concentración de $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y manteniendo este cumplimiento hasta el año 2035, en donde la concentración se estima en $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos valores suponen un descenso de los niveles establecidos por la norma, por consiguiente, se considerará un cumplimiento en los objetivos del PDA para ambos sectores. Esto se traduce en el cumplimiento del PDA para toda la zona saturada. Para mayor detalle de las medidas y sus reducciones de emisión, revisar el Anexo 6.1.1.

Figura 6: Reducción de la concentración diaria de MP_{2,5} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], estación Linares

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Reducción de emisiones

En la Tabla 5 se presentan las emisiones de MP_{2,5} de línea base asociadas a los sectores residencial, quemas, industria, transporte y fuentes fugitivas para el año 2035 (considerado como el año de plena implementación de todas las medidas) derivadas de la implementación de las medidas del Plan para dichos sectores. Se muestran las reducciones totales del PDA considerando las tres zonas (Curicó, Talca y Linares).

Tabla 5: Reducción de emisiones de MP_{2,5} con respecto a la línea base, año 2035

Sector	Emisiones [ton/año]			Reducciones [ton/año]			Porcentaje Reducción		
	Curicó	Talca	Linares	Curicó	Talca	Linares	Curicó	Talca	Linares
Residencial	1.889	1.821	3.177	19	716	1.779	1,0%	39,3%	56,0%
Quemas	4	201	146	4	136	96	100,0%	67,5%	65,8%
Industria	190	104	294	0	0	0	0,0%	0,0%	0,0%
Transporte	128	206	165	0	0	0	0,0%	0,0%	0,0%
Fugitivas	80	141	111	0	0	0	0,0%	0,0%	0,0%
TOTAL	2.290	2.473	3.893	22	852	1.875	1,0%	34,5%	48,2%

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla anterior, se aprecia que las mayores reducciones de emisiones corresponden al sector residencial, con 19, 716 y 1.779 ton/año en el año 2035, en las zonas de Curicó, Talca y Linares. Esto se debe principalmente a la gran cantidad de recambios de calefactores y acondicionamientos térmicos planteados en el PDA, lo que permitirá reducir drásticamente las emisiones de este sector. Otras reducciones, como quemas agrícolas e industrias, poseen reducciones acordes a su participación en las emisiones, y permiten de igual manera dar cumplimiento a los objetivos del PDA. Las reducciones serían aún mayores si se contabilizaran las del sector industrial, las cuales no se evaluaron al no tener suficientes antecedentes. Las emisiones totales de MP 2,5 en las comunas afectas son de 8.656 toneladas y se reducirían en un 49% llegando a 4.432 toneladas, esto considerando las reducciones por medidas del plan anterior que llegarían a 1.475 toneladas anuales (1.063 en la zona de Curicó y 412 en la zona de Talca Talca).

El conjunto de reducciones en la concentración para lastres zonas del PDA al año 2035, junto con su reducción porcentual, se presentan en la Tabla 6, donde se observa que la medida más importante para la zona de Talca y Linares corresponde a la prohibición gradual de calefactores, en la zona de Talca corresponde al recambio de calefactores. Respecto al total de emisiones la medida, que genera más reducciones es la prohibición gradual de calefactores, seguida del recambio de calefactores. Cabe destacar que la prohibición gradual de calefactores considera el recambio gradual de calefactores que no cumplen con la norma de emisión para artefactos de calefacción que combustionen leña (D.S. N°39 de 2011, del MMA) por calefactores más eficientes.

Tabla 6: Reducción de emisiones [toneladas] de MP_{2,5} diaria por medida, año 2035

Medida	Reducción			Porcentaje de Reducción			Total Reducciones	Porcentaje reducción
	Curicó	Talca	Linares	Curicó	Talca	Linares		
Recambio Calefactores	18,5	635,5	70,4	82,6%	74,6%	3,8%	724,3	26,3%
Proh. Gradual Calefactores	0,0	14,9	1.369,0	0,0%	1,7%	78,0%	1383,9	50,3%
Reacondicionamiento Térmico	0,3	20,9	129,2	1,4%	2,5%	6,9%	150,4	5,5%
Leña Seca	0,0	44,9	210,2	0,0%	5,3%	11,2%	255,1	9,3%
Quemas	3,6	135,9	96,0	16,0%	16,0%	5,1%	235,5	8,6%
Puntuales	0,0	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0	0,0%
Totals	22,3	852,1	1.874,8	100,0%	100,0%	100,0%	2749,3	100,0%

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Reducción de efectos a la salud: casos evitados

Para entender mejor los beneficios monetarios relacionados a la salud presentados en la sección 3.4 sobre indicadores económicos, la Tabla 7 muestra una estimación del número de casos evitados por tipo de evento para el año 2035 debido a la menor concentración esperada de MP_{2,5} y la cual corresponde a la fecha de término del plan, donde se consideran todas las medidas ya implementadas. Adicionalmente, los coeficientes de riesgo unitario utilizados y los valores unitarios por evento se presentan en la sección 6.8 de Anexos.

Cabe destacar que, pese a que este PDA está enfocado en $MP_{2,5}$ en su métrica diaria, las medidas implementadas tendrán efectos en la reducción de su concentración diaria y anual. Es por esto que se contabilizan los casos de mortalidad (crónica) que se evitarían con la implementación de nuevos recambios de calefactores, acondicionamientos térmicos y otras medidas evaluadas. En vista de que la zona saturada de este PDA abarca una población entre 984.868 personas al año 2026 y de 1.049.576 al año 2035, se usan las proyecciones del CENSO 2017 para las 20 comunas para presentar los casos evitados para el período.

Tabla 7: Número de casos evitados al año 2035 y para la totalidad del plan (2026-2035)

Evento	Tipo	Per50	IC90	Per50	IC90
Mortalidad	<i>Largo Plazo</i>	161	[331 - 838]	1.150	[642 - 1.647]
Admisiones hospitalarias	<i>Asma</i>	2	[4 - 7]	17	[11 - 23]
	<i>Cardiovascular</i>	38	[89 - 152]	269	[200 - 340]
	<i>Respiratorias crónicas</i>	7	[-3 - 18]	44	[-26 - 115]
	<i>Neumonía</i>	32	[18 - 95]	214	[68 - 360]
Visitas Salas de Emergencia	<i>Asma</i>	3.770	[2.951 - 27.368]	27.131	[5.281 - 48.980]
Productividad perdida	<i>Días laborales</i>	19.712	[73.043 - 88.369]	142.445	[128.669 - 155.795]
	<i>Días de actividad restringida</i>	109.829	[410.580 - 480.390]	791.913	[728.759 - 853.410]
	<i>Días de actividad restringida menor</i>	207.005	[740.036 - 940.093]	1.492.659	[1.313.494 - 1.669.745]

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Indicadores económicos

3.4.1 Análisis Costo-Beneficio

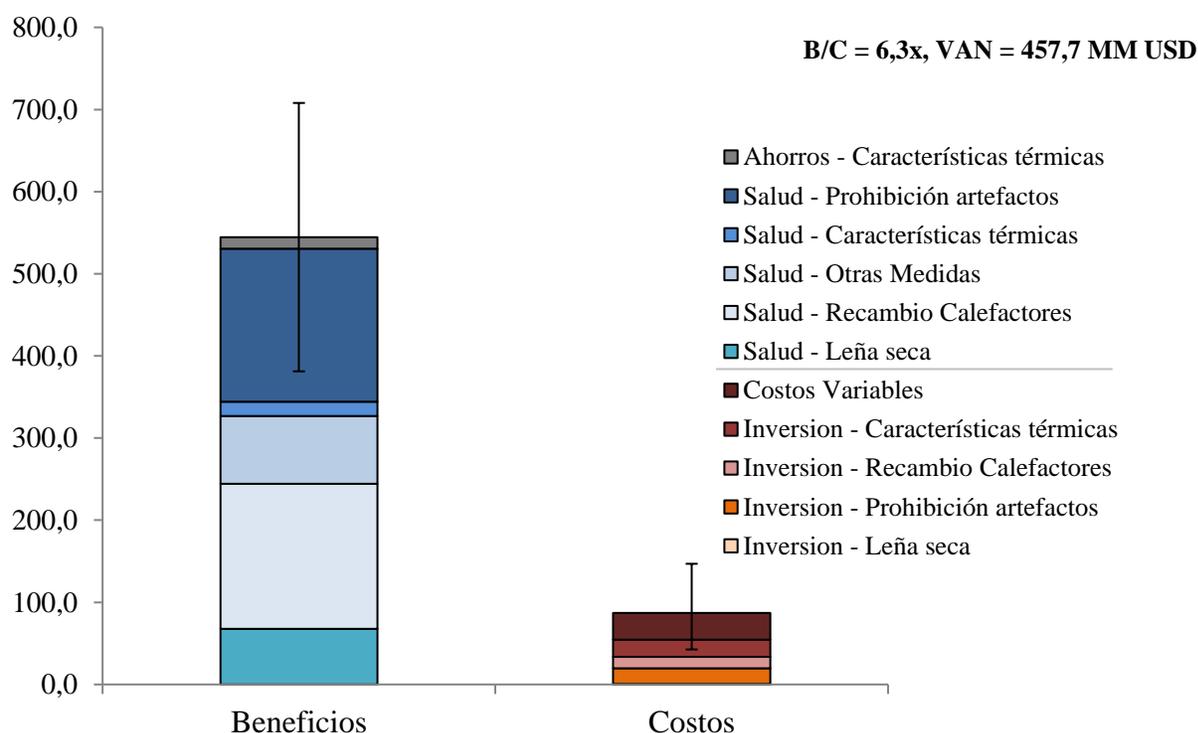
La Figura 7 muestra en valor presente los beneficios y costos asociados a la implementación del Plan, considerando las medidas a implementar en el anteproyecto. El proyecto tendría beneficios de US\$ 544,5 millones y costos de US\$ 86,9 millones, de modo que el beneficio social neto es de US\$ 457,7 millones de dólares para el periodo de evaluación, con beneficios cercanos a 6,3 veces los costos. Se puede observar que las medidas del Plan generan beneficios por la reducción de casos de morbilidad y mortalidad, así como ahorros por el mejoramiento térmico de las viviendas, el uso de calefactores más eficientes y el uso de leña seca.

Los valores de los beneficios están dados por la cantidad de población afecta, lo que genera un gran número de casos evitados dentro de las 20 comunas que comprenden la zona saturada. Al

reducir las emisiones en valores cercanos al 49% en una zona con una gran población, es razonable tener altos beneficios en la población.

Se determinó que el costo total del nuevo Plan corresponde a US\$ 86,9 millones de dólares para el período de evaluación. Los costos son asociados, los recambios de calefactores dan cuenta de un 16% de estos costos, el acondicionamiento térmico de viviendas corresponde a un 22% de los costos y la prohibición gradual de calefactores genera un 24% de los costos del Plan. Los costos variables corresponden al 37% de los costos del Plan, y consideran mayores costos de operación del uso de artefactos, mayor costo de la leña seca, costos de operación y mantención para tecnologías de abatimiento, entre otras.

Figura 7: Valor presente de beneficios, costos, beneficio neto y razón B/C (MM US\$)



El valor de la reducción de riesgos fatales (valor de la vida estadística) sigue una distribución triangular con mediana de UF del año, con IC al 90% de [10,345; 18,991] UF10. Se proyecta con una tasa de crecimiento del 2.9%. El beta utilizado (de largo plazo) para adultos sigue una distribución normal, con media de 0.93% y un IC al 90% de [0.47; 1.41]. Para los costos se asume una desviación de 30%.

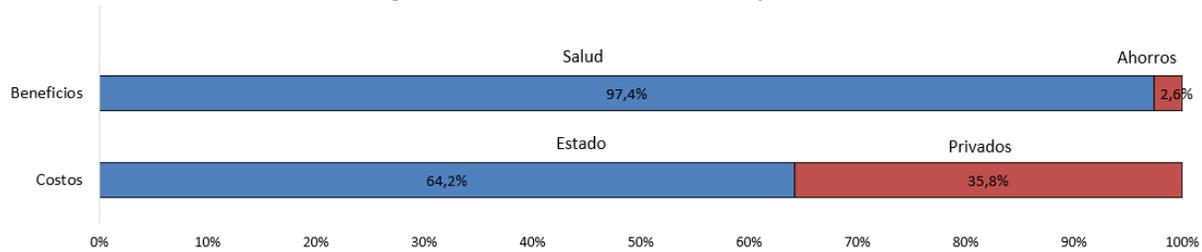
Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a los costos, el Estado asume un 64,2% de estos por concepto de subsidio a los recambios de calefactores y subsidios de aislación térmica. Por su parte, los emisores financian el 35,8% de los costos correspondientes en mayor parte a costos variables, la implementación

¹⁰ MMA (2012). Nuevos Elementos para la Inclusión de la Distribución de Beneficios en la Elaboración de AGIES, Preparado por GreenLabUC, Licitación Pública 608897-143-LE11, para Ministerio del Medio Ambiente.

de maquinaria para substituir las quemas agrícolas y la implementación de abatimientos en calderas residenciales e industriales.

Figura 8: Distribución de beneficios y costos



Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones

Para la evaluación del Plan se realizó un ACB, en el que se cuantificaron y valorizaron, cuando fue posible, los beneficios en salud y los costos identificados de las diferentes medidas, junto con los ahorros generados en el sector residencial producto de la reducción en el consumo de combustible.

Del análisis, se desprende que el beneficio neto social total del Plan es de US\$ 457,7 millones de dólares en valor presente. Estos beneficios se concentran principalmente en la reducción de casos de mortalidad y morbilidad y en ahorros dados por un mejor estándar de confort térmico, lo que generará un menor consumo de leña en los hogares. Estos beneficios resultan en gran parte de la aplicación de medidas en el sector residencial, en la reducción de concentración de MP_{2,5}.

Los costos totales se estiman en US\$ 86,9 millones de dólares. Las medidas de recambio de calefactores y acondicionamientos térmicos pese a que incurre en costos posee un alto nivel de reducción. Los demás sectores tienen un costo medio mayor, esto es, cada unidad de concentración reducida es más costosa. El aporte del Estado alcanza un 64,2% de los costos, este valor se debe principalmente a un alto número de subsidios de aislación térmica y al alto número recambio de calefactores implementados. Por otra parte, los emisores aportan con el 35,8% de los costos, los cuales principalmente corresponden a costos variables.

Respecto a la concentración alcanzada con el Plan, la zona lograría salir de la saturación por norma diaria de MP_{2,5} en el año 2030 para la estación Curicó, 2030 para la estación La Florida Talca y 2033 para la estación Linares. De esta forma se estaría llegando a niveles de concentración entre a los 40 a 43 µg/m³ en el año 2035 para las tres estaciones, suponiendo un cumplimiento en todo el territorio asociado a la zona saturada.

Es importante señalar que los resultados obtenidos en este análisis obedecen a la metodología y supuestos establecidos y deben ser considerados como un antecedente más para la toma de decisiones, a la cual se debe incorporar otros elementos relevantes para la discusión del instrumento. En el futuro se espera reportar dentro de los AGIES los efectos de la política pública en la paridad de género y pueblos originarios, además de informar acerca de los potenciales efectos asociados al cambio climático.

5. Referencias

- 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.
- DICTUC (2008). Estudio Diagnóstico Plan de Gestión Calidad del Aire VI Región, Encargado por Gobierno Regional Región del Libertador Bernardo O'Higgins.
- EPA (2000). Guidelines for preparing economic analyses. Washington, DC, US Environmental Protection Agency.
- Fisher, A. (1991). "Increasing the Efficiency and Effectiveness of Environmental Decisions: Benefit-Cost Analysis and Effluent Fees."
- MIDEPLAN. (2011). Precios Sociales para la Evaluación Social de Proyectos, División de Planificación. Santiago, Chile.
- MMA. (2011). Guía Metodológica Inventario de Emisiones Atmosféricas M11 Metodología SINCA 2011. Elaborado por AMBIOSIS., Ministerio del Medio Ambiente.
- 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.
- MMA. (2012). Nuevos Elementos para la Inclusión de la Distribución de Beneficios en la Elaboración de AGIES, Preparado por GreenLabUC, Licitación Pública 608897-143-LE11, para Ministerio del Medio Ambiente.
- MMA. (2013). Desarrollo de Modelo Genérico para Evaluación de Planes de Prevención y de Descontaminación Ambiental para Aire, Preparado por GreenLabUC para Ministerio del Medio Ambiente.
- 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.
- Noel de Nevers and J. Roger Morris. (1975). "Rollback Modeling: Basic and Modified." *Journal of the Air Pollution Control Association* **25**(9): 943-947.

Seremi del Medio Ambiente Región del Maule (2020). "Informe Técnico Declaración de Zona Saturada por Material Particulado Respirable Fino (MP2,5) del Valle Central de la Región del Maule".

Szklo, M. and F. J. Nieto. (2014). Epidemiology: beyond the basics, Jones & Bartlett Publishers.

- T. Y. Chang, B. W. (1975). "Generalized Rollback Modeling for Urban Air Pollution Control." Journal of the Air Pollution Control Association **25**(10): 1033-1037.
- Sistam. (2013). Generación de Antecedentes Técnicos y Económicos para la Elaboración de una Norma de Emisión para Calderas y Procesos de Combustión en el Sector Industrial, Comercial y Residencial, Solicitado por Ministerio del Medio Ambiente, ID licitación 608897-60-LE13.

6. Anexos

6.1.1 Inventario de emisiones proyectado

Tabla 8: inventario de Emisiones Proyectado [ton/año] por sector contaminante.

Sector	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Área - Residencial	9004	8679	8365	8011	7551	7129	7105	7081	7057	7033	7009	6984	6960	6936	6911	6887
Área - Quemadas	351	351	351	351	351	351	351	351	351	351	351	351	351	351	351	351
Puntual - Industria	588	588	588	588	588	588	588	588	588	588	588	588	588	588	588	588
Móviles - En Ruta	499	499	499	499	499	499	499	499	499	499	499	499	499	499	499	499
Fugitivas	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332
Total	10773	10448	10135	9780	9320	8899	8874	8851	8827	8802	8778	8754	8730	8705	8681	8656

Fuente: Elaboración propia.

6.2 Resultados por medida

La Tabla 9 presentan los costos, beneficios e indicadores económicos para las medidas evaluadas.

Tabla 9: Resultados por medida. MM US\$. Valor presente

Medidas	Variables		Costos Inversión		Beneficios Salud	VAN Medidas	Beneficio Total	Costo Total	Razon B/C
	Costos	Beneficios	Privado	Estado					
Recambio Calefactores	28,56	0	1,42	12,48	176,40	133,95	176,4	42,5	4,2
Proh. Gradual calefactores	0,21	0	19,24	0,00	186,52	167,07	186,5	19,5	9,6
VE- Reacondicionamiento térmico	-13,61	0	7,30	13,55	17,48	10,24	31,1	20,8	1,5
Leña Seca	-0,31	0	0,52	0,00	67,87	67,65	68,2	0,5	130,3
Quemas	3,66	0	0,00	0,00	82,41	78,75	82,4	3,7	22,5
Total	18,52	0	28,48	26,03	530,68	457,66	544,6	86,9	6,3

Fuente: Elaboración propia.

Notas: VN: vivienda nueva. VE: vivienda existente. LE: Límite de emisión. Prohibición de calefactores incluye las medidas de prohibición de salamandra. Cámara simple y otros artefactos que no cumplan norma. Subsidios térmicos incluye tanto viviendas que son objeto de subsidio PPPF como las que no lo son.

6.3 Metodología para el sector residencial

La estimación de emisiones por calefacción para el sector residencial se estima de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$Emisiones = \sum_j \sum_i \frac{Demanda\ de\ calor \cdot FE_i}{PC_j \cdot \eta_i}$$

Dónde:

Emisiones: Emisiones [gr/año]

η_i : Eficiencia de calefacción del equipo tecnología i

FE_i : Factor de emisión equipo tecnología i, [gr/kg]

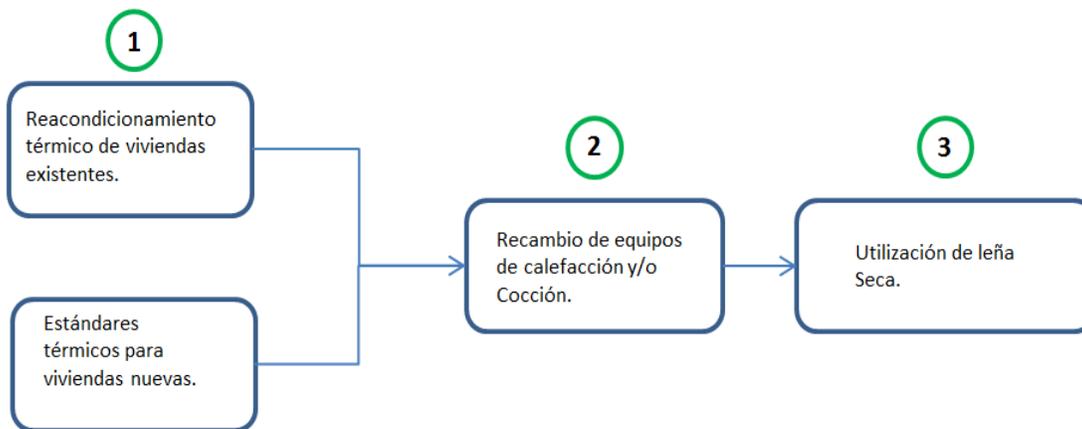
Demanda de calor: Demanda de calor de la vivienda j [MJ/vivienda-año]

PC_j : Poder calorífico del combustible utilizado por tecnología j [MJ/kg]

La reducción de emisiones¹¹ corresponde a las emisiones finales menos las iniciales. Las emisiones finales consideran una mejora en el factor de emisión y eficiencia de los equipos, además de un incremento en el poder calorífico del combustible utilizado. La medida de confort térmico de las personas se mantiene constante.

En este sector, la estimación de la reducción de emisiones debe considerar que las medidas presentan interacciones, por lo que no pueden ser evaluadas independientemente, sino que en forma secuencial. La Figura 9 muestra la metodología descrita que se implementa con el fin de evitar sobreestimar la reducción de emisiones en el sector.

Figura 9: Interacción medidas sector residencial.



Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto a los costos, estos consideran la inversión anualizada y la diferencia en los costos de operación debido al cambio de tecnología y/o combustible para calefacción. Los costos de fiscalización no se desagregarán a nivel de medidas específicas, ya que los diferentes servicios informan sólo costos agregados.

¹¹ O emisiones evitadas dado que son las emisiones que no se emitirán en el escenario con Plan.

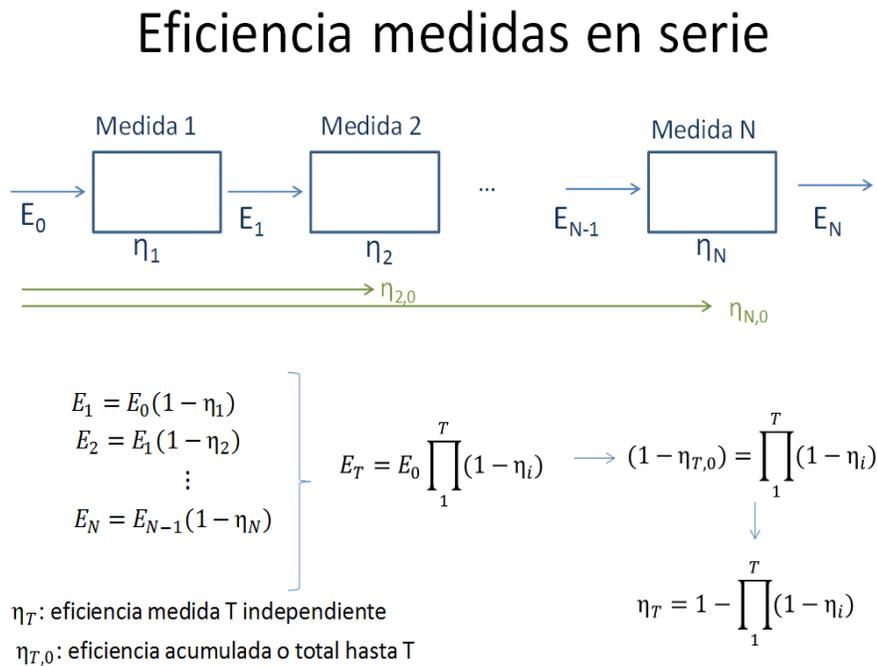
La metodología para la estimación de beneficios en salud asociados a la disminución de concentración de MP_{10} y $MP_{2.5}$ se detalla en la sección 6.5.

6.4 Sinergias de medidas de reducción de emisiones

Se consideraron los efectos combinados o sinergias que poseen las medidas del PDA, tanto en la reducción de emisiones como en los costos variables en combustible del sector residencial, fuente emisora con múltiples medidas que la afectan, De otro modo, se estaría haciendo un doble conteo tanto en reducción de emisiones como en costos.

La Figura 10 explica en forma simple cómo fue abordado este tema en la evaluación, en ella se explicita que la eficiencia final de dos medidas que son aplicadas a una misma fuente emisora es la combinación de las eficiencias en su conjunto según la fórmula matemática señalada y con ello, se evita la sobre estimación de reducción de emisiones y de los costos que también dependen de ellas.

Figura 10: Diagrama conceptual de medidas aplicadas en serie para considerar sinergias entre ellas.



Fuente: Elaboración propia

Unos ejemplos de las medidas sinérgicas corresponden a la implementación de acondicionamiento térmico en una vivienda en conjunto con el recambio por un calefactor de mayor eficiencia, ambas medidas lograrán un mayor grado de confort térmico a una menor demanda de combustible, por ende, reducirán sus emisiones en una cantidad mayor que el acondicionamiento térmico por sí solo, o un recambio de calefactores por sí solo.

6.5 Beneficios en la salud

La Tabla 10 resume los efectos identificados e indica si estos han sido llevados a términos monetarios.

Tabla 10: Beneficios identificados derivados de la reducción de emisiones

Identificados	Valorizados
↓ Mortalidad prematura (MP)	Sí
↓ Morbilidad (MP, SO ₂)	Sí
↓ Productividad perdida (MP, SO ₂)	Sí
↓ Actividad restringida (MP)	Sí
↑ Visibilidad (MP)	No
↓ Corrosión materiales (SO ₂)	No
↑ Producción agrícola (MP, SO ₂)	No
↓ Efectos en ecosistemas (SO ₂)	No
↑ Imagen país (recomendaciones OCDE)	No
↓ Depósito de contaminantes (MP, SO ₂)	No
↓ Efectos en la salud en otras comuna (MP)	No
↑ Cobeneficios en reducción de <i>Black Carbon</i> (MP)	No

Fuente: Elaboración propia,

Los beneficios en salud derivan de cambios en concentraciones de material particulado fino (MP_{2.5}). Para estimar el cambio en la concentración de MP_{2.5} con respecto a un cambio en la emisión de un determinado contaminante (NO_x, COV_s, SO_x, y MP), se debe estimar el factor de emisión-concentración o FEC para cada zona geográfica. El FEC indica las toneladas necesarias de contaminante para aumentar en 1 µg/m³ el promedio anual de concentración de MP. Los FEC utilizados en la evaluación fueron determinados usando modelos del tipo *rollback* simple (Noel de Nevers and J. Roger Morris 1975; T. Y. Chang 1975), relacionando emisiones con concentraciones:

$$FEC_p = \left(\frac{\partial C_p}{\partial E_p} \right)^{-1} \approx \frac{E_p}{C_p}$$

Dónde:

FEC_p: Factor emisión concentración para contaminante p, [(ton/año)/(µg/m³)],

C_p: Concentración ambiental del contaminante p, [µg/m³],

E_p: Emisión del contaminante p [ton/año],

A partir de la fracción de componentes elementales del MP y la relación de éstos con los contaminantes emitidos por las fuentes se obtienen los factores emisión-concentración, tal como se indica a continuación:

$$FEC_p = \frac{E_p}{CT_{MP_i} \cdot F_{MP_i,p}}$$

Donde:

CT_{MP_i} : Concentración ambiental total de MP_{10} o $MP_{2.5}$, [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

$F_{MP_i,p}$: Fracción del componente elemental p en el MP

Una vez obtenidos estos, el cambio en la concentración de un contaminante p, en este caso $MP_{2.5}$; se estima como:

$$\Delta C_{MP_{2.5}} = \sum_i \frac{\Delta E_i}{FEC_i}$$

Donde el subíndice i corresponde a $MP_{2.5}$ (primario), NO_x , $COVs$ y SO_x (precursores de $MP_{2.5}$ secundario).

Para el presente plan de descontaminación, dada la baja importancia de los precursores de $MP_{2.5}$ comparada con las emisiones directas, estas no se consideran en la estimación del FEC, el cual fue calculado con respecto a las emisiones y concentración del año 2020, obteniéndose un valor de $0,00748$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/ton.

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

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

Donde:

$\Delta \text{Efecto}_{pj}$: Cambio en efecto en salud j debido al delta de emisión del contaminante p [$(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$]

β_{pj} : Coeficiente de riesgo unitario del efecto en salud j y contaminante p [$(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$]

ΔC_{pi} : Cambio en concentración de contaminante p en ubicación i [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

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 de obtiene:

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

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

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:

$$\text{Beneficio}_p = \sum_j \Delta\text{Efecto}_{pj} \cdot \text{VU}_j$$

Donde:

Beneficio_p : Beneficio de la reducción de la concentración ambiental de p, en este caso $\text{MP}_{2.5}$

VU_j : Valoración unitaria de cada efecto j evaluado [UF/caso]

El detalle de la metodología utilizada se encuentra en “Guía Metodológica para la elaboración de un Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) para Instrumentos de Gestión de Calidad del Aire” (MMA 2011).

6.6 Evaluación de costos

Los costos evaluados corresponden al costo incremental de las medidas respecto del escenario base, esto es, considerando normativas previas vigentes a nivel nacional o en la zona de aplicación de las medidas, tales como el PDA vigente en las comunas de Talca y Maule; y el PDA de Curicó.

Debido a las diferentes vidas útiles de las inversiones necesarias para dar cumplimiento al plan, se anualizan los costos para una adecuada comparación de estos con los beneficios asociados a salud y a ahorro de combustibles.

La tasa de descuento utilizada en la evaluación es de 6%, según se recomienda para proyectos sociales (MIDEPLAN 2011).

Se considera la inversión anualizada de acuerdo a su vida útil y los costos de operación y mantención. Los diferentes flujos de costos asociados a las diferentes medidas son llevados a valor presente. A su vez, el valor presente de los costos corresponde a la sumatoria del costo medio de las medidas multiplicado por la reducción de emisiones asociada para cada periodo.

$$\text{VP CT} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=0}^T \left(\frac{\text{Inversión}_{m,t}}{(1+r)^t} \cdot \left[\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \right] + \frac{\text{Costos OyM}_{m,t}}{(1+r)^t} \right) = \sum_{m=1}^M \sum_{t=0}^T \frac{\text{CMe}_{m,t} \cdot \text{Red}_{m,t}}{(1+r)^t}$$

Donde:

VP CT : Valor presente de los Costos Totales realizadas un horizonte de T años, para todas las medidas [\\$].

$\text{Inversión}_{m,t}$: Inversión de la medida m realizada en el año t [\\$].

- Costos OyM_t : Costos de Operación y Mantenimiento realizados en el año t [\$/año].
- CMe_m : Costo Medio de la medida m $\left[\frac{\$}{\text{ton de } p} \right]$ o $\left[\frac{\$}{\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \text{ de } p} \right]$.
- Red_p : Reducción del contaminante p de la medida m en $[\text{ton } p]$ o $\left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} p \right]$.
- r : Tasa de descuento utilizada.
- n : Vida útil de la inversión [años].
- T : Horizonte de Evaluación de las medidas [años].

6.7 Fichas de medidas

6.7.1 Recambio de calefactores

Programa de recambio de artefactos a leña																																				
Descripción	La SEREMI del Medio Ambiente de la Región del Maule ejecutará un programa de recambio voluntario de artefactos existentes (calefactores y cocinas) que combuscionen leña o derivados de la madera Vigencia: desde la publicación del PDA.																																			
Supuestos de evaluación	52.000 recambios en diez años (2026-2035): la totalidad de ellos corresponden a 50% recambio de calefactores a Pellet y 50% eléctricos. Valor equipo pellet: 44,0 UF/eq Valor equipo eléctrico 30 UF/eq Valor del subsidio: 24,2 UF/eq Costo chatarrización equipo recambiado: 0,517 UF/eq Vida útil equipos de calefacción: 20 años																																			
Resultados	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Zona</th> <th colspan="2">Reducción MP_{2,5}</th> <th>Beneficios Salud</th> <th>Costo Variable*</th> <th>Inversión</th> </tr> <tr> <th>Ton/año</th> <th>µg/m³</th> <th>MM US\$</th> <th>MM US\$</th> <th>MM US\$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Curicó</td> <td>18,5</td> <td>0,2</td> <td>1,9</td> <td>0,3</td> <td>0,2</td> </tr> <tr> <td>Talca</td> <td>635,5</td> <td>5,8</td> <td>165,4</td> <td>27,0</td> <td>13,2</td> </tr> <tr> <td>Linares</td> <td>70,4</td> <td>0,5</td> <td>9,1</td> <td>1,2</td> <td>0,6</td> </tr> <tr> <td>TOTAL</td> <td>724,3</td> <td>-</td> <td>176,4</td> <td>28,6</td> <td>13,9</td> </tr> </tbody> </table> <p>Reducción de emisiones, corresponden al año 2035. Beneficios, Ahorros y Costos en valor presente de flujos anualizados.</p> <p>*Costo variable neto, valores negativos representan ahorros netos.</p>	Zona	Reducción MP _{2,5}		Beneficios Salud	Costo Variable*	Inversión	Ton/año	µg/m ³	MM US\$	MM US\$	MM US\$	Curicó	18,5	0,2	1,9	0,3	0,2	Talca	635,5	5,8	165,4	27,0	13,2	Linares	70,4	0,5	9,1	1,2	0,6	TOTAL	724,3	-	176,4	28,6	13,9
Zona	Reducción MP _{2,5}		Beneficios Salud	Costo Variable*	Inversión																															
	Ton/año	µg/m ³	MM US\$	MM US\$	MM US\$																															
Curicó	18,5	0,2	1,9	0,3	0,2																															
Talca	635,5	5,8	165,4	27,0	13,2																															
Linares	70,4	0,5	9,1	1,2	0,6																															
TOTAL	724,3	-	176,4	28,6	13,9																															
Referencias Bibliográficas	(MMA 2013)																																			

6.7.2 Acondicionamiento térmico

Subsidio al acondicionamiento térmico de las viviendas existentes																
Descripción	La SEREMI de Vivienda y Urbanismo entregará al menos 40.000 subsidios para acondicionamiento térmico de las viviendas existentes en la zona saturada. Se deberá dar cumplimiento al menos a los siguientes parámetros de transmitancia térmica (Tabla 18 del Anteproyecto), adicionales a la normativa vigente en la zona: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Muro (pesado/liviano)</th> <th>Piso Ventilado</th> <th>Ventanas</th> <th>Techumbre</th> <th>Puerta</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>U [W/m²°K]</td> <td>U [W/m²°K]</td> <td>U [W/m²°K]</td> <td>U [W/m²°K]</td> <td>U [W/m²°K]</td> </tr> <tr> <td>0,60</td> <td>0,6</td> <td>3,6</td> <td>0,33</td> <td>1,7</td> </tr> </tbody> </table>	Muro (pesado/liviano)	Piso Ventilado	Ventanas	Techumbre	Puerta	U [W/m ² °K]	0,60	0,6	3,6	0,33	1,7				
Muro (pesado/liviano)	Piso Ventilado	Ventanas	Techumbre	Puerta												
U [W/m ² °K]	U [W/m ² °K]	U [W/m ² °K]	U [W/m ² °K]	U [W/m ² °K]												
0,60	0,6	3,6	0,33	1,7												

Supuestos de evaluación	<p>vida útil aislamiento térmica: 25 años. subsidios desde el año 2026 a 2035. Costos: Ecuaciones de costos en función de ΔU. Los costos totales varían por tipología de vivienda, en promedio 104,10 UF/vivienda calculados para una vivienda tipo de 66,5 m². Y una vida útil de 25 años.</p>						
Resultados		Zona	Reducción MP_{2,5}		Beneficios Salud	Costo Variable*	Inversión
			Ton/año	µg/m³	MM US\$	MM US\$	MM US\$
		Curicó	0,3	0,003	0,0	0,0	0,0
		Talca	20,89	0,19	0,7	-3,3	6,7
		Linares	129,2	0,88	16,8	-10,3	14,1
		TOTAL	150,44	-	17,5	-13,6	20,8
	<p>Reducción de emisiones, concentración corresponden al año 2035. Beneficios, Ahorros y Costos en valor presente de flujos anualizados.</p> <p>*Costo variable neto, valores negativos representan ahorros netos.</p>						
Referencias Bibliográficas	(MMA 2013), (GreenLabUC 2013)						

6.7.3 Prohibición gradual calefactores

Prohibición gradual de calefactores							
Descripción	A partir del 4to año de entrada en vigencia del PDA se prohibirá en la zona saturada la utilización de calefactores que combustionen leña que no cumplan la norma de emisión para calefactores D.S. N° 39, de 2011, del Ministerio del Medio Ambiente.						
Supuestos de evaluación	Se estima que cada calefactor que no cumpla la norma y que es prohibido es reemplazado por un calefactor nuevo que cumpla la normativa, se usa como supuesto que un 50% de los calefactores prohibidos serán recambiados por un calefactor a pellet y otro 50% será recambiado por un calefactor eléctrico.						
Resultados		Zona	Reducción MP_{2,5}		Beneficios Salud	Costo Variable*	Inversión
			Ton/año	µg/m³	MM US\$	MM US\$	MM US\$
		Curicó	0	0	0,0	0,0	0,0
		Talca	14,9	0,14	-13,0	-0,9	4,6
		Linares	1369	9,3	-173,5	1,1	14,6
		TOTAL	1384	-	-186,5	0,2	19,2
	<p>Reducción de emisiones, concentración corresponden al año 2035. Beneficios, Ahorros y Costos en valor presente de flujos anualizados.</p> <p>*Costo variable neto, valores negativos representan ahorros netos.</p>						
Referencia Bibliográfica	(MMA 2013), (GreenLabUC 2013)						

6.7.4 Quemias agrícolas

		Quemas agrícolas					
Descripción	Se prohíbe el uso del fuego para la quema de rastrojos, y de cualquier tipo de vegetación viva o muerta, en los terrenos agrícolas, ganaderos o de aptitud preferentemente forestal dentro de la zona saturada, desde el 1° de Abril hasta el 30 de Septiembre						
Supuestos de evaluación	Sólo se consideran los datos reportados a CONAF como quemias legales (no se consideran quemias ilegales ni incendios forestales), por lo que esta medida podría tener un potencial de reducción de emisiones mayor. Se utilizaron los FE extraídos de (MMA 2011a) ponderados por Ciudad de acuerdo a la participación de las especies producidas en cada una según datos regionales de CONAF 2023.						
Resultados		Zona	Reducción MP2,5		Beneficios Salud	Costo Variable*	Inversión
			Ton/año	µg/m3	MM US\$	MM US\$	MM US\$
		Curicó	3,580	0,03	-0,9	0,0	0,0
		Talca	135,93	1,2	-58,9	0,8	0,0
		Linares	95,97	0,65	-22,6	2,9	0,0
		TOTAL	235,48	-	-82,4	3,7	0,0
	Reducción de emisiones, concentración y CMe corresponden al año 2035. Beneficios, Ahorros y Costos en valor presente de flujos anualizados.						
Referencia Bibliográfica	(MMA 2013), (GreenLabUC 2013)						

6.7.5 Valores unitarios de beneficios

Tabla 11: Valores unitarios por casos evitados [UF/caso], escenario Normal año base.

Tipo de efecto	Efecto detalle	Niños	Adultos 18-29	Adultos 30-64	Adultos Mayores
Mortalidad	<i>Largo Plazo</i>	12,897	12,897	12,897	12,897
Admisiones hospitalarias	<i>Asma</i>	22	24	24	0.0
	<i>Cardiovascular</i>	0.0	49	49	49
	<i>Respiratorias crónicas</i>	0.0	31	31	32
	<i>Neumonía</i>	0.0	0.0	0.0	34
Visitas Salas de Emergencia	<i>Asma</i>	1.1	0.0	0.0	0.0
Productividad perdida	<i>Días laborales</i>	0.0	0.7	0.7	0.0
	<i>Días de actividad restringida</i>	0.0	0.2	0.2	0.0
	<i>Días de actividad restringida menor</i>	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: (MMA 2011)

6.8 Coeficientes de riesgo unitario

En la Tabla 12 se presentan los valores correspondientes al percentil 50 de los coeficientes de riesgo unitario para el material particulado fino.

Tabla 12: Coeficientes de riesgo unitario para MP_{2.5}

		Niños	Adultos 18-29	Adultos 30-64	Adultos Mayores
Mortalidad	<i>Largo Plazo</i>	0.00%	0.93%	0.93%	0.93%
Admisiones hospitalarias	<i>Asma</i>	0.33%	0.33%	0.33%	0.00%
	<i>Cardiovascular</i>	0.00%	0.15%	0.15%	0.16%
	<i>Respiratorias crónicas</i>	0.00%	0.24%	0.24%	0.12%
	<i>Neumonía</i>	0.00%	0.00%	0.00%	0.40%
Visitas Salas de Emergencia	<i>Asma</i>	0.44%	0.00%	0.00%	0.00%
Productividad perdida	<i>Días laborales</i>	0.00%	0.46%	0.46%	0.00%
	<i>Días de actividad restringida</i>	0.00%	0.48%	0.48%	0.00%
	<i>Días de actividad restringida menor</i>	0.00%	0.74%	0.74%	0.00%

Fuente: (MMA 2011)

6.9 Ficha de elaboración del AGIES

ÍTEM	GLOSA	DESCRIPCIÓN
Identificación	Nombre AGIES	Análisis General de Impacto Económico y Social del Anteproyecto del Plan de Descontaminación Atmosférica para la Macrozona del Valle Central de la Comuna de Maule.
	Nombre instrumento normativo que da origen al AGIES	Decreto Supremo N°53 del 2015 del Ministerio del Medio Ambiente (MMA) se declaró zona saturada por material particulado MP2,5, como concentración de 24 horas, al valle Central de la provincia de Curicó y mediante el Decreto Supremo N°7 del 2021 del Ministerio del Medio Ambiente (MMA) se declaró zona saturada por material particulado MP2,5, como concentración de 24 horas, al valle Central de la Región del Maule. La Resolución Exenta N°254, de 2021, del Ministerio del Medio Ambiente, establece la revisión del PDA para las comunas de Talca y Maule. Además, la Resolución Exenta N°1292, de 2022, del Ministerio del Medio Ambiente, establece la revisión del PDA para el Valle Central de la provincia de Curicó y ordena acumulación La Resolución Exenta N°1292, de 2022, del Ministerio del Medio Ambiente, resuelve la acumulación del proceso de revisión y actualización del Plan de Descontaminación Atmosférica para el Valle Central de la provincia de Curicó; el proceso de Elaboración del PDA para el Valle Central de la Región del Maule; y el de Revisión y actualización del PDA para las comunas de Talca y Maule, en un solo proceso que se denominará "Plan de Descontaminación Atmosférica para la Macrozona del Valle Central de la Región del Maule".
	Tipo de regulación	Plan de Descontaminación Atmosférica
	Fecha de término del AGIES	11 de diciembre de 2024
	Alcance geográfico	Comunas de Colbún, Curicó, Linares, Longaví, Maule, Molina, Parral, Pelarco, Rauco, Retiro, Río Claro, Romeral, Sagrada Familia, San Clemente, San Javier, San Rafael, Talca, Teno, Villa Alegre e Yerbas Buenas
	Instrumento nuevo o revisión	Revisión del PDA de Valle de Curicó y PDA de Comunas de Talca-Maule y Nuevo Plan para el resto de comunas
	Área de aplicación	Asuntos Atmosféricos.
	Metodología	Metodología
Nivel de evaluación de beneficios		Valorados beneficios en salud y ahorros en combustibles
Tasa de descuento		5,5%
Valor de la vida estadística		14,910 UF al año 2014, con IC al 90% de [10,345; 18,991] UF
Años de evaluación		2026-2035
Parámetros	Valor del dólar	927,5 pesos/dólar
	Valor de la UF	37.950 pesos/UF
Resultados	Concentración final MP _{2,5} Sector Curicó	40 µg/m ³ al año 2035

Concentración final MP _{2.5} Sector Talca	43 µg/m ³ al año 2035
Concentración final MP _{2.5} Sector Linares	42 µg/m ³ al año 2035
Costos estimados en MM US\$ (valor presente)	86,9
Beneficios estimados en MM US\$ (valor presente)	544,6
Valor actual neto en MM US\$	457,7