

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – CHILE
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

***ANÁLISIS DE REGULACIONES AMBIENTALES PARA
MATERIAL PARTICULADO FINO EN FUENTES
INDUSTRIALES Y RESIDENCIALES DEL
CONCEPCIÓN METROPOLITANO***

por

Andrés Esteban Saavedra Pino

Profesor Guía:

Dr. Cristian Mardones Poblete

Concepción, Junio de 2015

Tesis presentada a la

**DIRECCIÓN DE POSTGRADO
UNIVERSIDAD DE CONCEPCION**



Para optar al grado de

MAGISTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



*“Por todos los que me han acompañado
Y por el apoyo incondicional de mi familia
Es que soy la persona que soy hoy en día...
Gracias Por Todo”*

RESUMEN

ANÁLISIS DE REGULACIONES AMBIENTALES PARA MATERIAL PARTICULADO FINO EN FUENTES INDUSTRIALES Y RESIDENCIALES DEL CONCEPCIÓN METROPOLITANO

Andrés Esteban Saavedra Pino

Junio 2015

PROFESOR GUÍA: Dr. Cristian Mardones Poblete

PROGRAMA: Magíster en Ingeniería Industrial

En este estudio se desarrolla un modelo de optimización para el Concepción Metropolitano, el cual minimiza los costos de reducir la contaminación mediante el recambio de los equipos de calefacción residencial y/o la aplicación de tecnologías de abatimiento de emisiones atmosféricas en las industrias. Específicamente, se simula un sistema de permisos de emisiones transables (SPET), un sistema de permisos ambientales (SPA) con nivel de concentración meta y un sistema de permisos ambientales por metas porcentuales. Así, se concluye bajo las tres regulaciones que para lograr la costo-efectividad en la reducción de la contaminación ambiental por material particulado fino se debe regular directamente a las fuentes residenciales, incentivar programas públicos de recambio de calefactores a leña, o alternativamente incluir a las fuentes residenciales en mecanismos de compensación de emisiones para fuentes industriales.

Palabras Clave: MP_{2,5}, sistema de emisiones transables, sistema de permisos ambientales.

Magíster en Ingeniería Industrial, Dirección de Postgrado - Universidad de Concepción

ABSTRACT

ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL REGULATIONS FOR FINE PARTICULATE MATTER IN INDUSTRIAL AND RESIDENTIAL SOURCES OF METROPOLITAN CONCEPCION

Andrés Esteban Saavedra Pino

June 2015

THESIS SUPERVISOR: Dr. Cristian Mardones Poblete

PROGRAM: Master in Industrial Engineering

This study develops a optimization model for Metropolitan Concepción, that minimizes the costs of reducing pollution considering the replacement of firewood heaters and the implementation of atmospheric emissions abatement technologies in industries. Specifically, a tradable emission permit system (TEPS), an ambient permit system (APS) with concentration levels targets and an ambient permit system with percentage targets are simulated. Thus, it is concluded under the three regulations that to achieve the cost-effectiveness in reducing environmental pollution by fine particulate matter the residential sources must be regulated directly, encourage firewood heaters replacement public programs, or alternatively including residential sources in emissions compensation mechanisms for industrial sources.

Keywords: PM_{2,5}, emissions permit system, ambient permit system.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	2
1.1	Justificación del Tema.....	4
1.2	Hipótesis.....	5
1.3	Objetivo General.....	5
1.4	Objetivos Específicos.....	5
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Material Particulado	7
2.2	Modelos de Dispersión Ambiental.....	8
2.3	Esquemas Regulatorios	10
3	DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL	14
3.1	Situación actual Concepción Metropolitano	14
3.2	Características Meteorológicas	16
4	METODOLOGÍA	19
4.1	Recambio de Calefactores a Leña.....	19
4.1.1	Cálculo Emisiones Fuentes Residenciales.....	19
4.1.2	Opciones de Recambio para Fuentes Residenciales.....	22
4.1.3	Funciones de Costos asociadas a las Opciones de Recambio	24
4.2	Tecnologías de Abatimiento para las Fuentes Industriales	28
4.2.1	Funciones de Costo asociadas a las Tecnologías de Abatimiento.....	29
4.3	Modelos de Dispersión y FEC	30
4.4	Modelo de Optimización para Reducir MP _{2,5}	32
5	RESULTADOS	37
5.1	Emisiones y Concentraciones de MP _{2,5}	37
5.2	Modelo de Optimización.....	39
6	DISCUSIONES Y CONCLUSIONES	50
	REFERENCIAS	52
	ANEXOS	55
	Anexo 1: Método de Estimación FEC Residenciales	55

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

TABLAS

Tabla 3-1 Fuentes emisoras de MP _{2,5} en Concepción Metropolitano.....	14
Tabla 4-1 Método de la transformada inversa	21
Tabla 4-2 Factores de emisión de MP _{2,5} y distribución de artefactos y leña usados	22
Tabla 4-3 Artefactos de calefacción a evaluar	23
Tabla 4-4 Eficiencia térmica artefactos de calefacción	25
Tabla 4-5 Precio y poder calorífico de los combustibles.....	26
Tabla 4-6 Eficiencias tecnologías de abatimiento para MP _{2,5} según combustible	29
Tabla 4-7 Funciones de costo de las tecnologías de abatimiento	29
Tabla 5-1 Emisiones y aporte a concentraciones de MP _{2,5} según tipo de fuente y comuna.....	37
Tabla 5-2 Emisiones de MP _{2,5} de fuentes industriales según tipo de combustible.....	39
Tabla 5-3 Resultados SPET con todas las opciones de recambio.....	40
Tabla 5-4 Resultados SPA por porcentaje con todas las opciones de recambio.....	42
Tabla 5-5 Resultados SPA con todas las opciones de recambio.....	43
Tabla 5-6 Resultados SPET con restricción de liquidez.....	45
Tabla 5-7 Resultados SPA con porcentaje con restricción de liquidez	46
Tabla 5-8 Resultados SPA con restricción de liquidez.....	47

FIGURAS

Figura 3-1 Evolución del promedio anual de MP _{2,5}	16
Figura 4-1 FEC MP _{2,5} fuentes industriales del Concepción Metropolitano	31
Figura 4-2 FEC MP _{2,5} fuentes residenciales del Concepción Metropolitano	32

NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES

AGIES: Elaboración análisis general de impacto económico y social

CAE: Costo anual equivalente

CASEN: Encuesta de caracterización socioeconómica

EXP: Factor de expansión

FE: Factor de emisión

FEC: Factor de emisión-concentración

g: gramos

GLP: Gas licuado de petróleo

INE: Instituto nacional de estadística

m: metros

MP: Material particulado

MP_{2,5}: Material particulado fino

MP₁₀: Material particulado respirable

MM\$: Millones de pesos chilenos

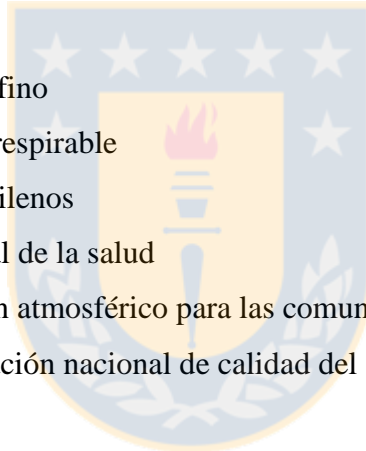
OMS: Organización mundial de la salud

PPACM: Plan de prevención atmosférico para las comunas del Concepción Metropolitano

SINCA: Sistema de información nacional de calidad del aire

ton: Toneladas

WHO: World health organization





1 INTRODUCCIÓN

Hace tiempo que los organismos encargados de llevar a cabo las políticas ambientales están generando iniciativas que regulan la contaminación atmosférica, pues se ha demostrado que las altas concentraciones de sustancias contaminantes del aire resultan perjudiciales para la salud de la población y el medio ambiente. Los primeros esfuerzos que se realizaron para controlar la contaminación de aire datan de los años 50's, cuando el Gobierno Federal de los Estados Unidos creó la Ley para el Control de la Contaminación del Aire de 1955¹. Posteriormente, iniciativas de este tipo se fueron implementando a lo largo del mundo y Chile no es la excepción. En la región Metropolitana, desde 1990 se han estado implementando planes de descontaminación para mejorar la calidad del aire. Posteriormente, este tipo de planes se han implementado en otras zonas altamente contaminadas del país, como es el caso de Concepción Metropolitano.

Concepción Metropolitano o el Gran Concepción, es un área localizada en la zona centro sur de Chile, en la provincia de Concepción, en la región del Biobío, y está constituida por las comunas de Concepción, Coronel, Chiguayante, Hualpén, Hualqui, Lota, Penco, San Pedro de la Paz, Talcahuano y Tomé. Según las proyecciones realizadas por el Instituto Nacional de Estadística (INE), su población estimada para el año 2015 sería de 1.049.589 habitantes, siendo la segunda área metropolitana más poblada de Chile, después de la región Metropolitana. Además, es el segundo núcleo industrial del país, donde se encuentran principalmente industrias forestales, pesqueras, alimentarias, siderúrgicas y centrales termoeléctricas, entre otras².

Como resultado de la intensa actividad industrial y la combustión residencial de leña en la zona, es que se han manifestado problemas en la calidad del aire; lo cual se debe principalmente a que las industrias deben realizar procesos que involucran la combustión de biomasa y/o combustibles fósiles, y a que a su vez, una gran parte de la población utiliza leña como medio de calefacción en la época de otoño-invierno.

El material particulado es el principal contaminante que afecta a las comunas de la zona, el cual se puede dividir en dos grupos según su tamaño. La fracción respirable de material particulado, también conocida como MP₁₀, que está constituida por aquellas partículas de diámetro

¹ http://bvs.per.paho.org/bvsci/e/fulltext/orienta/lecc3/lecc3_2.html, revisado el 19 de Junio del 2015

² Debido a la falta de información referente a la comuna de Hualqui sobre sus niveles de concentración y los factores de emisión-concentración, es que en este estudio esta comuna no será considerada como parte del Concepción Metropolitano cuando se hable de éste.

aerodinámico menor o igual a 10 micrones, capaces de ingresar al sistema respiratorio; y la fracción fina o MP_{2,5}, que está constituida por aquellas partículas de diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 micrones, capaces de ingresar al sistemas respiratorio y circulatorio, lo cual provoca graves daños a la salud (Curtis et al, 2006; Pope y Dockery, 2006).

En este sentido, las normas primarias fijan límites para la concentración de los contaminantes en el ambiente, pues estas provocan efectos adversos sobre la salud de las personas. Sin embargo, para entender la relación que existe entre las emisiones y los niveles de concentración de contaminante, es necesario utilizar modelos de dispersión que estimen los factores de emisión-concentración (FEC), los cuales establecen la relación entre emisión y concentración de una sustancia contaminante en un receptor; siendo un receptor una localización específica en la que se instala un equipo para la medición de la contaminación del aire y otras variables atmosféricas.

Considerando la problemática anteriormente expuesta, en este estudio se evalúan los costos de regular la contaminación ambiental en el Concepción Metropolitano atribuible al material particulado fino emitido por las industrias y hogares, específicamente a través de tres tipos de regulación, las que consisten en: establecer niveles de concentración máximos para las comunas del Concepción Metropolitano, reducir porcentualmente el total emisiones independientemente de la localización de la fuente emisora y disminuir porcentualmente la fracción reducible de las concentraciones en cada una de las comunas. Esto se hace a través de un modelo de optimización que considera cómo se dispersa el contaminante entre las distintas comunas de la zona y los costos que involucran la implementación de medidas de abatimiento por parte de las industrias y el recambio de los equipos de calefacción en los hogares. Además estos esquemas regulatorios serán evaluados bajo dos escenarios, uno optimista que no considera ningún tipo de restricción a las opciones para reducir emisiones en las fuentes residenciales, y otro más realista, que considera restricciones para las fuentes residenciales, las que simulan un menor acceso a ciertos equipos de calefacción; ya sea por, elevado costo de inversión, falta de información, acceso a crédito, liquidez o por preferencias personales.

Las opciones tecnológicas consideradas para reducir las emisiones de las fuentes industriales son la implementación de sistemas de abatimiento como lavador Venturi, filtro de mangas y precipitador electrostático. Mientras que para las fuentes residenciales se considera el recambio de los calefactores a leña por equipos que utilizan kerosene, gas licuado de petróleo (GLP),

electricidad, pellet, o bien, se recambian por artefactos a leña más eficientes y menos contaminantes.

De esta forma, mediante el modelo de optimización se podrán evaluar los costos asociados a alcanzar distintas metas de calidad del aire bajo distintos esquemas regulatorios y la conveniencia económica de regular a las fuentes residenciales e industriales para el control de las concentraciones y/o emisiones de material particulado fino.

1.1 Justificación del Tema

En el año 2006 Concepción Metropolitano fue declarado zona latente por material particulado respirable (Decreto N°41, 2006). Lo que quiere decir, que la concentración de este contaminante estaba entre el 80% y 100% de lo que permitía la norma de calidad ambiental. Sin embargo, actualmente esta norma fue derogada (Decreto N°20, 2013)³, pues siguiendo las tendencias internacionales, y ya que la fracción fina y gruesa del material particulado están relacionadas, es que se decidió concentrar los esfuerzos en controlar la fracción fina de este contaminante (MP_{2,5}), pues resulta ser más perjudicial para la salud (Norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable MP_{2,5})⁴.

Dado lo anterior, y tomando en cuenta los estudios internacionales que respaldan la existencia de efectos negativos sobre la salud debido a elevadas concentraciones de MP₁₀ y sobre todo MP_{2,5}, es que se hace necesario evaluar medidas que permitan controlar la contaminación a un bajo costo, para así poder proteger la salud de la población y cumplir con los niveles ambientales establecidos en la norma vigente, asignando los recursos disponibles de la mejor forma posible. Siendo en este caso en particular bajo el punto de vista económico de la costo-efectividad.

Por otra parte, tanto a nivel nacional como internacional, existe escasa investigación sobre la incorporación de fuentes residenciales en mecanismos que permitan reducir los niveles de concentración de MP_{2,5}. Siendo este un motivo adicional para realizar este estudio en Concepción Metropolitano, dadas las características de las fuentes residenciales e industriales, además de la disponibilidad de la información necesaria para parametrizar el modelo de optimización.

³ <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1057140>, revisado el 11 de Abril del 2015

⁴ <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1025202>, revisado el 11 de Febrero del 2015

1.2 Hipótesis

La incorporación de fuentes residenciales en los mecanismos de reducción de la contaminación en las distintas comunas del Concepción Metropolitano, no genera una disminución en los costos de reducir la contaminación por $MP_{2,5}$.

1.3 Objetivo General

Desarrollar y resolver un modelo de optimización que determine el costo mínimo de reducir la contaminación por $MP_{2,5}$ en las distintas comunas del Concepción Metropolitano, considerando tanto fuentes industriales como residenciales.

1.4 Objetivos Específicos

- i. Recopilar y generar información actualizada referente a las emisiones de las fuentes residenciales e industriales en el Concepción Metropolitano.
- ii. Formular un modelo de optimización que minimice el costo de reducir la contaminación por $MP_{2,5}$ entre las distintas comunas del Concepción Metropolitano, considerando medidas de abatimiento para las fuentes industriales, recambio de sistemas de calefacción para las fuentes residenciales y la dispersión de las emisiones entre las distintas comunas.
- iii. Identificar el costo total de las fuentes y las tecnologías involucradas en alcanzar las distintas metas de reducción de la contaminación de $MP_{2,5}$.



2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Diversos estudios concuerdan en que el material particulado produce graves efectos sobre la salud de las personas, por lo que los gobiernos se ven en el deber de implementar diversas políticas que controlen la contaminación de este contaminante. Es en este sentido, resulta relevante realizar estudios que permitan conocer las implicaciones económicas de implementar algún tipo de regulación para un contaminante como el material particulado fino en Concepción Metropolitana. Generalmente, estos estudios se basan en análisis de costo-efectividad, buscan la alternativa de regulación menos costosa, o en análisis de costo-beneficio, consideran los costos de implementar tecnologías que controlen la contaminación y los beneficios asociados a mejorar la salud de la población. El presente estudio se desarrolla desde el punto de vista de la costo-efectividad.

A continuación se presenta una revisión de estudios referentes al material particulado, modelos de dispersión y tipos de regulación.

2.1 Material Particulado

Se ha demostrado que el material particulado respirable (MP_{10}) logra traspasar las barreras del sistema respiratorio, y que incluso en su fracción más fina ($MP_{2,5}$), logra entrar al sistema circulatorio lo cual puede provocar o agravar enfermedades cardiovasculares, enfermedades respiratorias o incluso pudiendo causar la muerte (Pope y Dockery, 2006; Pope et al., 2009; Lu et al., 2015). Dada esta evidencia, es que los gobiernos han mostrado especial interés en la utilización de instrumentos económicos y políticas ambientales enfocadas en la protección de la salud de las personas, a través de la reducción de los niveles de concentración de contaminante.

El material particulado presenta distintas composiciones, lo que dificulta el poder identificar cuáles son las principales fuentes emisoras y componentes más perjudiciales (Pope y Dockery, 2006). Por ejemplo, en Palermo, se realizó un estudio donde se comparan las concentraciones en zonas urbanas y periféricas, concluyéndose que la concentración es casi el doble en zonas urbanas, presentándose las mayores concentraciones en invierno y otoño (Dongarra et al., 2010); en Beijing, China, se encontró un alto contenido de carbono orgánico y una diferencia significativa en la concentración entre invierno y verano (menor concentración en este último) (He et al., 2001); en Cork Harbour, Irlanda, se observó un alto contenido de componentes inorgánicos como sulfato y amonio (Hellebust et al., 2010); y en Chillán, Chile, los mayores

constituyentes fueron material orgánico y material inorgánico como NO_3 y NH_4 , habiendo una mayor concentración de los primeros en invierno (Celis et al., 2003). De aquí se desprende que la composición y niveles de concentración se ven fuertemente influenciados por el lugar y la temporada en la cual se realizan las mediciones, siendo el material particulado heterogéneo en composición y origen, por lo que varían sus efectos (Song et al., 2011)

En el caso particular del Concepción Metropolitano, este presenta las mayores concentraciones de material particulado durante la estación fría, atribuyéndose este efecto principalmente a la quema de leña para calefacción realizada por las fuentes residenciales. Y en cuanto a su composición, el material particulado, tanto en su fracción fina ($\text{MP}_{2,5}$) como gruesa (MP_{10}), está compuesto principalmente por material orgánico, el que proviene en su mayoría de la quema de leña y procesos de combustión (Centro Mario Molina, 2008).

Finalmente, dado el efecto negativo de la contaminación por $\text{MP}_{2,5}$ sobre la salud de las personas, es que la Organización Mundial de la Salud (OMS o WHO, en inglés) a dictado guías para los niveles de concentración ambiental permisibles para este contaminante, que son $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio anual y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio diario de las concentraciones⁵. Mientras que en Chile en el año 2012 a través de la Norma Primaria de Calidad del Aire para Material Particulado Fino, se establecieron los niveles de concentración límites para $\text{MP}_{2,5}$, los que corresponden a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio anual y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio diario⁶.

2.2 Modelos de Dispersión Ambiental

Los modelos de dispersión sirven para simular el transporte de una sustancia en la atmósfera, y así, poder relacionar las emisiones con las concentraciones de contaminante. Una de las primeras revisiones completas sobre los modelos que han sido desarrollados y aplicados para calcular la dispersión y concentraciones de partículas en la atmósfera trata las ventajas y limitaciones de estos modelos, que van desde simples modelos de caja a complejos modelos que incorporan principios de dinámica de fluidos; concluyéndose que la falta de retroalimentación para mejorar los modelos imposibilita que estos se ajusten en mejor medida a la realidad (Holmes y Morawska, 2006).

⁵ http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf, revisado el 1 de Marzo del 2015

⁶ <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1025202>, revisado el 11 de Febrero del 2015, revisado el 1 de Marzo del 2015

Sin embargo, aunque existen variados modelos de dispersión, es importante poseer toda la información necesaria para implementarlos correctamente. Por ello, a veces se buscan formas más simples para relacionar el impacto de las emisiones sobre un receptor, por ejemplo, se puede asumir que el impacto es el mismo para todos los receptores; todo esto con la finalidad de comparar distintas políticas e instrumentos en áreas carentes de información (Kim, 2000).

En Bélgica se utilizaron modelos de transporte BeLEUROS para calcular las concentraciones de material particulado, obteniéndose para el material particulado fino una diferencia de menos del 23% con los datos reales. Estas diferencias se atribuyen a las faltas de información; concluyéndose que el modelo subestima las concentraciones, pero que igualmente es una buena aproximación (Deutsch et al., 2008).

Por otro lado, en Helsinki Finlandia, se utilizó a escala urbana un modelo de dispersión, CAR-FMI, en combinación con un modelo meteorológico, MPP-FMI, para estudiar el MP_{2,5}, observándose una buena concordancia entre los valores obtenidos y los observados en estaciones de monitoreo de la zona, destacando principalmente una mayor concentración del contaminante cerca del tránsito vehicular, y atribuyéndose la falta de exactitud a eventos imprevistos, como quemas agrícolas, condiciones meteorológicas imprevistas y aumentos inesperados en el flujo vehicular (Kauhaniemi et al., 2008).

Chile tampoco es ajeno a los modelos de dispersión, en Santiago se desarrolló un modelo de caja, el cual a su vez concuerda con otros estudios en que en los meses de otoño e invierno se pierde capacidad de dispersión, lo que explica los aumentos de concentración (Jorquera, 2002).

En cuanto a Concepción Metropolitana, se ha determinado que las concentraciones de material particulado están principalmente relacionadas con las emisiones de fuentes industriales y residenciales, presentándose las mayores concentraciones durante el invierno. En esta época las concentraciones se atribuyen principalmente a fuentes residenciales, pues la dirección predominante de los vientos reduce el impacto de las fuentes industriales.⁷ La dispersión de contaminantes utilizada en este estudio fue estimada por EULA (2014) con el modelo de dispersión CALPUFF-CALMET. CALPUFF es un modelo de transporte y dispersión de sustancias en la atmósfera que utiliza como datos de entrada la información meteorológica proporcionada por el modelo CALMET, la distribución espacial y temporal de las emisiones, y

⁷ http://www.sinia.cl/1292/articles-51604_anteproyecto.pdf, revisado el 10 de Abril del 2015

antecedentes de la calidad del aire obtenidos de las estaciones de monitoreo existentes; para así entregar como resultado la concentración ambiental de $MP_{2,5}$ en la ubicación elegida de un receptor específico dentro de cada comuna del Concepción Metropolitano. Mientras que el modelo CALMET es el encargado de procesar los datos meteorológicos del sector como velocidad del viento, temperatura, presión, elevación del terreno, entre otros, y entregárselos al modelo CALPUFF. Para finalmente, comparar los datos modelados con los reales y establecer la relación entre la tasa de emisiones y el promedio anual de concentraciones de $MP_{2,5}$.

2.3 Esquemas Regulatorios

La elección de la regulación más conveniente para mejorar la calidad del aire desde un punto de vista económico se basa principalmente en los análisis de costo-efectividad, que buscan minimizar los costos dado un objetivo ambiental, y en los análisis de costo-beneficio, que cuantifican los costos asociados a reducir la contaminación y los beneficios derivados de mejorar la salud de la población. Utilizando para este estudio el primer enfoque.

En muchos estudios se han comparado los costos de realizar distintas regulaciones ambientales, ya sean instrumentos económicos, en los que se transan permisos ambientales o de emisión, o políticas de comando y control, en las que el Estado define estándares para que se reduzca la contaminación; demostrándose que las medidas de carácter económico resultan ser menos costosas que las medidas de comando y control, aunque estas últimas son las más utilizadas. Por ejemplo, en un estudio realizado con la información de más de 100 mil industrias estadounidenses se estimaron los costos de abatir la contaminación del aire, concluyendo que las políticas de comando y control utilizadas presentan una variabilidad intersectorial muy alta entre los costos marginales de abatimiento. Si se utilizaran instrumentos económicos se igualarían los costos marginales y permitiría disminuir los costos de reducir la contaminación, con costos marginales aproximados de US\$30/ton para reducir el 40% de las emisiones de material particulado y US\$182/ton para reducir el 95% de estas (Hartman et al., 2010). En particular, en Santiago de Chile, utilizando un modelo de programación lineal, se demostró que los sistemas de permisos ambientales eran menos costosos que las políticas de comando y control, principalmente por los menores costos de cumplimiento, concluyendo que con solo una inversión de US\$ 20 millones en el mejor de los casos (sistema de permisos ambientales) se logra reducir un 80% de las concentraciones en el receptor con mayor concentración de partículas suspendidas (O'Ryan, 1996). Sin embargo, se ha propuesto que las alternativas de

comando y control podrían alcanzar la costo-efectividad al igual que los instrumentos económicos si es que los reguladores tuvieran información perfecta e implementaran medidas precisas, cosa que no ocurre en la realidad (Stavins, 2003). Posteriormente, se realizó un análisis costo-beneficio que compara los beneficios netos de regular la contaminación de MP₁₀ entre dos instrumentos de incentivos económicos y un instrumento de comando y control; concluyendo que un sistema en el que se transan emisiones sería la política más adecuada para regular la contaminación del aire en Santiago, pues genera más beneficios netos (O'Ryan y Sánchez, 2007)

Además, en varios estudios se ha demostrado que si bien el programa de compensación de emisiones establecido en Santiago logró mejoras en los niveles de calidad ambiental, este careció de eficiencia en su desempeño como mercado, pues debido a factores como los altos costos de transacción, la incertidumbre regulatoria, el incumplimiento por parte de las industrias, y la escasa participación de la ciudadanía, dificultó su desarrollo y desempeño, por lo que se deberían realizar ciertas modificaciones para aumentar las transacciones y mejorar la eficiencia (Montero et al., 2002; Schreifels, 2008; Coria y Sterner, 2008; Sánchez et al., 2008).

Otros estudios enfatizan que se debe analizar la asignación inicial de los permisos, pues bajo poder de mercado se pierde eficiencia si las asignaciones iniciales no son óptimas (Villegas y Chávez, 2004). Además, se han estudiado los efectos del monitoreo imperfecto en un sistema de permisos transables como el de Santiago de Chile, atribuyéndose a esta situación un aumento en los costos de reducir la contaminación (Montero, 2003; San Martín, 2003)

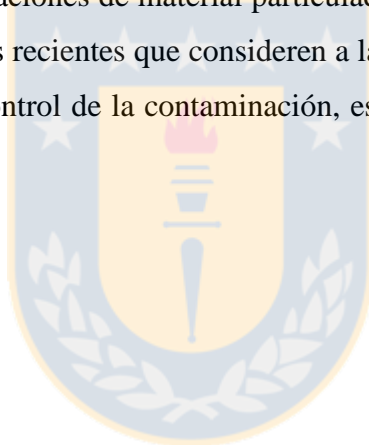
En la región del Biobío también se han realizado estudios que comparan la costo-efectividad de los sistemas de permisos transables con respecto a las políticas de comando y control, concluyéndose bajo distintos escenarios que la primera es la medida económicamente más conveniente para llevar a cabo el control de la contaminación atmosférica (Chávez y Ponce, 2005; Alegría et al., 2013).

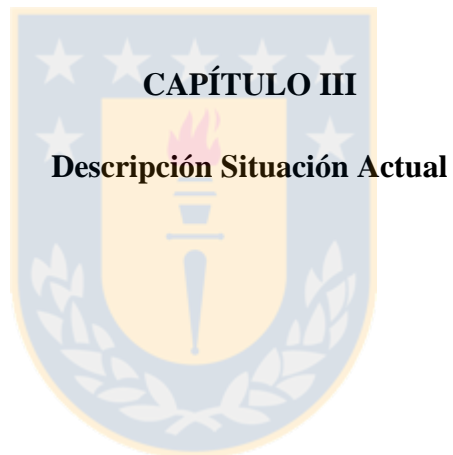
De manera particular, en un estudio realizado en el Concepción Metropolitano, se evaluaron los costos de implementar políticas basadas en instrumentos y políticas de comando y control; considerando además, la disponibilidad de gas natural como combustible para las industrias. Finalmente se concluyó, que los instrumentos económicos resultaban ser menos costos; y que más allá de la política seleccionada, la mayor reducción de costos se produciría gracias a la disponibilidad de gas natural (Mardones y Jiménez, 2015). De forma particular, la mejor solución, sistema de permisos de emisiones transables con 100% de disponibilidad de gas

natural, para reducciones del 0% genera ahorros de \$12 mil millones y para una reducción del 96% se incurre en costos de \$9 mil millones, aproximadamente.

En cuanto a la contaminación residencial, se ha demostrado que el recambio de artefactos de calefacción y cocina que utilizan leña o carbón por otros más eficientes o que utilicen combustibles más limpios permite obtener grandes mejoras en la calidad del aire, tanto al interior como al exterior de los hogares si los artefactos de calefacción son reemplazados por equipos que utilicen kerosene o gas licuado de petróleo (Kandlikar et al, 2011). Por ejemplo, se analizaron los resultados del programa de recambio de calefactores a leña realizado en Libby, Montana, que contemplo el recambio de 1.200 calefactores, concluyendo que se disminuyó en un 71% las concentraciones de $MP_{2,5}$ al interior de los hogares y en un 20% en el exterior (Palmer et al., 2009).

Dado que las altas concentraciones de material particulado fino son perjudiciales para la salud y que existen pocos estudios recientes que consideren a las fuentes residenciales además de las fuentes industriales en el control de la contaminación, es que este tipo de estudios se vuelven más relevantes.





3 DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

3.1 Situación actual Concepción Metropolitano

El fuerte desarrollo industrial del Concepción Metropolitano acompañado del incremento de la población, han generado problemas en la calidad del aire atribuibles principalmente a las emisiones de las fuentes industriales y residenciales. Siendo el material particulado el principal contaminante que afecta a los residentes de la zona, sobre todo en su fracción fina (MP_{2,5}) por ser capaz de ingresar tanto al sistema respiratorio como circulatorio perjudicando la salud de las personas.

El material particulado fino es emitido principalmente por fuentes industriales a través de sus procesos de combustión, y por fuentes residenciales, cuyas emisiones derivan del uso de leña para calefacción. En el Concepción Metropolitano, según el inventario de emisiones (EULA, 2014), existen 513 fuentes industriales y, de acuerdo a la encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN, 2013), existen 301.149 hogares. Sin embargo, las fuentes residenciales consideradas en este estudio son solo aquellas que han declarado consumir leña, mientras que en el caso de las fuentes industriales solo se consideran 200 fuentes, que son las que declararon sus emisiones de material particulado fino.

En la tabla 3-1, se presenta el resumen de las emisiones de MP_{2,5} para el Concepción Metropolitano según tipo de fuente.

Tabla 3-1 Fuentes emisoras de MP_{2,5} en Concepción Metropolitano

Categorías	Subcategorías	MP_{2,5} (ton/año)
Fuentes Industriales	Combustión	2.186
	Procesos sin combustión	316
Quema de leña-biomasa	Calefacción residencial	9.449
	Quemas agrícolas y forestales	657
Tránsito vehicular		348
Otros		86
Total		13.045

Fuente: Universidad Católica de Temuco (2009) y UDT-Proterm (2011)

De la tabla 3-1 se desprende que el total de emisiones de MP_{2,5} proveniente de fuentes industriales es de 2.501,9 ton/año, mientras que las emisiones de fuentes residenciales son 9.449

ton/año. Las cuales corresponden al 19,2% y 72,5% del total de emisiones de Concepción Metropolitano, respectivamente. Sin embargo, las emisiones para fuentes residenciales distan de los utilizados en este estudio, ya que se utilizó información más reciente sobre el consumo de leña levantada por la encuesta CASEN (2013), por lo que al ser un estudio posterior al presentado en la tabla y al considerarse la mala operación de los equipos de calefacción el total de emisiones desciende a 4.579 ton/año de MP_{2,5}. De manera similar, las emisiones de las fuentes industriales analizadas en este estudio alcanzan un total de 2.017 ton/año de MP_{2,5}, lo que se debe a que se utilizó información más reciente de un inventario de emisiones del año 2013 (EULA, 2014).

Dado el problema de contaminación ambiental en el Concepción Metropolitano, debido al aumento de las concentraciones de material particulado, se han estado monitoreando desde el año 2000 los niveles de concentración en distintos puntos de la zona. Estas mediciones llevaron a que en el 2006 se declarara zona latente por material particulado respirable (MP₁₀) al Concepción Metropolitano; y que posteriormente, en el año 2011, se aprobara el Anteproyecto del Plan de Prevención Atmosférico para las comunas del Concepción Metropolitano (PPACM), el cual busca evitar que se supere la norma. Sin embargo, la normativa actual, al igual que la internacional, está enfocada en controlar las concentraciones de MP_{2,5}; pues el menor diámetro de las partículas les permite internarse tanto en el sistema respiratorio como circulatorio.

En la siguiente figura se presenta la evolución de las concentraciones ambientales de los promedios anuales de MP_{2,5} en el Concepción Metropolitano, junto con el límite establecido en la norma primaria de calidad del aire vigente en Chile para este contaminante⁸.

⁸ La norma primaria de calidad del aire para el MP_{2,5} pretende mantener la concentración de este contaminante en niveles tales que no sea un riesgo para la salud de la población. Se considerará sobrepasada la norma de calidad del aire para material particulado fino respirable cuando la concentración anual calculada como promedio aritmético de tres años calendario consecutivos, sea mayor o igual a 20 µg/m³N.
<http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1025202>, revisado el 11 de Febrero del 2015

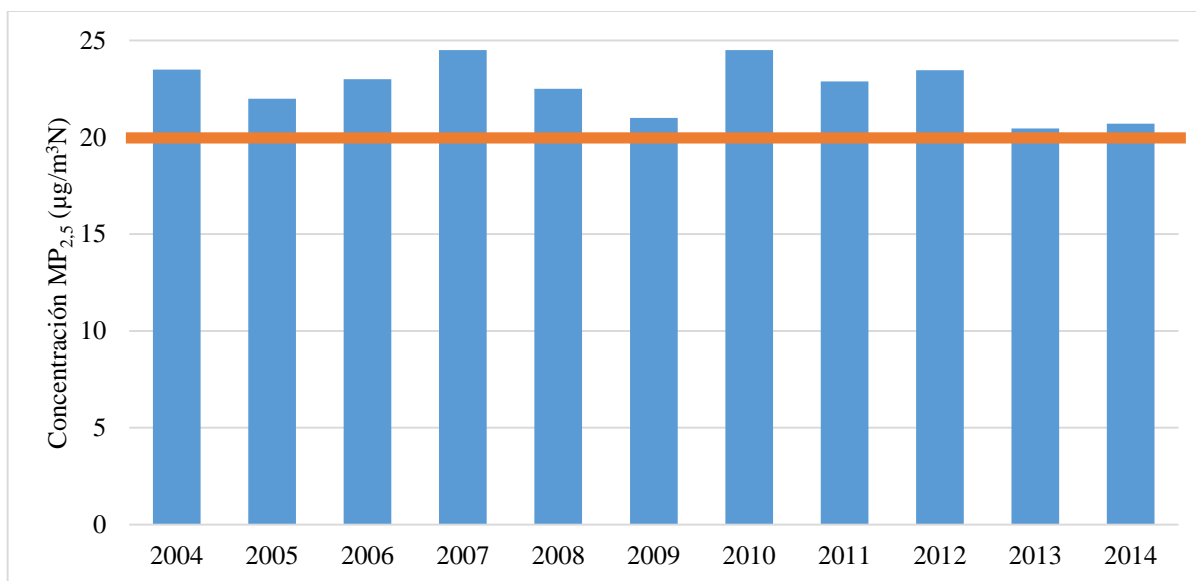


Figura 3-1 Evolución del promedio anual de MP_{2,5}

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente (2011) y SINCA (2015)⁹

En la figura es posible observar que la norma primaria de calidad del aire para MP_{2,5} es superada en su valor de concentración anual (20 µg/m³). Haciéndose necesario reducir las concentraciones de MP_{2,5}, de tal manera de prevenir los efectos negativos sobre la salud. Por lo anterior, resulta importante evaluar medidas que consideren la intervención tanto de fuentes industriales como residenciales, a fin de controlar las concentraciones de este contaminante y solucionar el problema de contaminación ambiental que afecta al Concepción Metropolitano; puesto que se ha demostrado en estudios anteriores (Mardones y Jiménez, 2015), que las fuentes industriales por si solas no son capaces generar reducciones suficientes que permitan alcanzar niveles de calidad ambiental que cumplan con la norma de MP_{2,5} en todas sus comunas. En este estudio, la evaluación de estas medidas se lleva a cabo desde un punto de vista económico centrándose en la costo-efectividad de alcanzar distintas metas de regulación bajo distintas circunstancias.

3.2 Características Meteorológicas

Las variaciones que presentan las concentraciones de material particulado en Concepción Metropolitano, se deben principalmente a la ubicación geográfica de las fuentes emisoras y a

⁹ Datos de las estaciones San Vicente y Nueva Libertad
<http://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/index/id/VIII>, revisado el 1 de Marzo del 2015

las condiciones meteorológicas que influyen en las condiciones ambientales que dispersan este contaminante y definen la estacionalidad de sus concentraciones.

Durante el año se puede observar una variación en las concentraciones, encontrándose los niveles más altos de este contaminante entre los meses de abril y julio, que es el periodo más frío, mientras que las concentraciones más bajas ocurren en el periodo más cálido, entre octubre y febrero. Esto se debe principalmente a la quema de leña para calefacción ocurre durante el periodo más frío, la cual influye en el aumento de las concentraciones del contaminante. En el verano se puede observar un mayor impacto de las emisiones industriales sobre las zonas urbanas por efectos del transporte de contaminantes. Mientras que en el invierno, el cambio en la dirección predominante de los vientos reduce el impacto de las megafuentes industriales en las zonas urbanas, por lo cual el mayor aporte a las concentraciones de material particulado se atribuye a las fuentes urbanas, como el uso de calefactores a leña poco eficientes y en menor magnitud, la industria y el transporte¹⁰.



¹⁰ http://www.sinia.cl/1292/articles-51604_anteproyecto.pdf, revisado el 1 de Marzo del 2015



4 METODOLOGÍA

Para estimar los costos asociados a alcanzar un determinado nivel de calidad ambiental y apreciar el efecto que tiene la inclusión de fuentes residenciales al control de la contaminación usando sistemas de permisos ambientales (transacción de concentraciones) y un sistema de permisos de emisiones transables, es necesario estimar los costos asociados tanto a fuentes residenciales como industriales, considerar la reducción de emisiones asociadas a las medidas de abatimiento, tomar en cuenta la dispersión de las emisiones, y finalmente elaborar un modelo de optimización que minimice los costos de reducir la contaminación por $MP_{2,5}$ bajo distintos esquemas regulatorios. En las siguientes secciones se presentan los pasos realizados para dicho modelo.

4.1 Recambio de Calefactores a Leña

Una forma de reducir las emisiones de material particulado fino aportado por las fuentes residenciales es cambiar los artefactos actuales de calefacción a leña de los hogares, por otros que usen una fuente de energía distinta o por otros artefactos a leña que sean más eficientes y menos contaminantes. De esta forma, si los hogares adquieren equipos más limpios, contribuyen a reducir la contaminación e incluso pueden contribuir con el ahorro energético. Este recambio además podría ser financiado por organismos gubernamentales a través de programas públicos de subsidio, o por empresas privadas que buscan compensar sus emisiones. En este estudio se considera el recambio de los calefactores a leña por equipos que utilizan kerosene, gas licuado de petróleo (GLP), electricidad, pellet, o bien, calefactores a leña más limpios que cumplan el decreto supremo 39 (DS 39¹¹).

4.1.1 Cálculo Emisiones Fuentes Residenciales

La información referente a las fuentes residenciales y metodologías utilizadas se obtuvieron principalmente del estudio de Sanhueza et al. (2015), estimando en el presente estudio las

¹¹Norma de emisión de material particulado para artefactos que combustionen o puedan combustionar leña y pellet de madera:

El límite máximo de emisión de material particulado para calefactores nuevos cuya potencia térmica nominal sea menor o igual a 8 Kw, es de 2,5 g/hr.

El límite máximo de emisión de material particulado para calefactores nuevos cuya potencia térmica nominal sea mayor a 8 Kw y menor o igual a 14 Kw, es de 3,5 g/hr.

El límite máximo de emisión de material particulado para calefactores nuevos cuya potencia térmica nominal sea mayor a 14 Kw y menor o igual a 25 Kw, es de 4,5 g/hr.

http://www.leychile.cl/Navegar/index_html?idNorma=1042254, revisado el 3 de Marzo del 2015

emisiones de $MP_{2,5}$ con la información sobre el consumo de leña de los hogares levantada por la Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional para el año 2013. En este sentido, se excluyeron los hogares que manifestaron no haber consumido leña o aquellos que se ubican en la comuna de Hualqui, pues esta comuna no es considerada debido a su baja participación en los niveles de concentraciones del Concepción Metropolitano y a la falta de información referente a las concentraciones y factores de emisión-concentración de $MP_{2,5}$. De esta forma el número de fuentes residenciales a analizar es de 2.200, las cuales representan a 165.551 hogares, cuyas emisiones de $MP_{2,5}$ se estiman de la siguiente manera:

$$E = \frac{C * FE * exp}{1000000} \quad (1)$$

Donde,

E : Emisiones de $MP_{2,5}$ (ton/año)

C : Consumo de leña del hogar (kg/año)

FE : Factor de emisión de $MP_{2,5}$ (g $MP_{2,5}$ /kg leña)

exp : Factor de expansión (cantidad de hogares que representa el hogar encuestado)

Como el factor de emisión considera el tipo de artefacto de calefacción que utiliza cada hogar y esta información no está disponible en la encuesta CASEN (2013), es que se debió simular esta información a través del método de la transformada inversa para variables discretas que considera la distribución de los artefactos de calefacción proporcionada por UDT (2005), lo que permitió simular el artefacto utilizado actualmente por cada hogar.

El método de la transformada inversa consiste en asignar una probabilidad $p(x)$ a la posibilidad de que alguno de los artefactos de calefacción considerados sea utilizado por una fuente residencial, la probabilidad $p(x)$ se determinó a partir de la información sobre la distribución de los artefactos de calefacción UDT (2005). Luego, con estos valores se establece la función de probabilidad acumulada $F(x)$; la cual con valores aleatorios de x que van desde 0 a 1 asigna para cada fuente residencial un artefacto de calefacción; todo esto dependiendo del rango de la función de probabilidad acumulada $F(x)$ en el cual se encuentre el número aleatorio x . En la siguiente tabla se presenta la probabilidad y función de probabilidad acumulada asociada a cada artefacto de calefacción.

Tabla 4-1 Método de la transformada inversa

Artefacto de Calefacción	Probabilidad $p(x)$	Probabilidad Acumulada $F(x)$
Combustión Lenta Cámara Simple	0,3565	$0 \leq x < 0,3565$
Salamandra	0,2352	$0,3565 \leq x < 0,5917$
Cocina a Leña	0,1926	$0,5917 \leq x < 0,7843$
Chimenea	0,0889	$0,7843 \leq x < 0,8732$
Combustión Lenta Doble Cámara	0,0682	$0,8732 \leq x < 0,9414$
Brasero	0,0069	$0,9414 \leq x < 0,9483$
Fogón	0,0049	$0,9483 \leq x < 0,9532$
Cocina + Chimenea	0,0110	$0,9532 \leq x < 0,9643$
Cocina + Comb. Lenta Simple	0,0256	$0,9643 \leq x < 0,9899$
Cocina + Leña	0,0101	$0,9899 \leq x \leq 1,0$

Fuente: Elaboración Propia en base a UDT (2005)

Es importante mencionar que los factores de emisión consideran la mala operación¹² por parte de los usuarios y el tipo de leña usada (seca, semi-húmeda y húmeda)¹³. La información de los factores de emisión utilizados según tipo de leña y tipo de artefacto de calefacción se obtuvo del UDT (2005) y se presenta en la siguiente tabla, junto con la distribución de estos dos últimos factores.

¹² Se considera mala operación cuando la combustión se realiza con el paso de aire cerrado.

¹³ El tipo de leña usada (seca, semi-húmeda y húmeda) se determinó encuestando a los hogares (UDT, 2015).

Tabla 4-2 Factores de emisión de MP_{2,5} y distribución de artefactos y leña usados

Artefacto	Distribución (%)	Factor de Emisión (g MP _{2,5} /kg leña)		
		Seca	Semi-húmeda	Húmeda
		79,9	15,6	4,5
Comb. Lenta Cámara Simple	35,65	25,5	32,9	69,9
Salamandra	23,52	16,1	26,0	75,8
Cocina a leña	19,26	18,6	30,1	87,6
Chimenea	8,89	16,1	26,0	75,8
Comb. Lenta Doble Cámara	6,82	13,9	17,9	38,2
Brasero	0,69	16,1	26,0	75,1
Fogón	0,49	16,1	26,0	75,1
Cocina + Chimenea	1,11	17,4	28,1	81,7
Cocina + Comb. Lenta Simple	2,56	22,1	31,5	78,8
Cocina + Salamandra	1,01	17,4	28,1	81,7

Fuente: DICTUC (2007) y UDT (2005)

4.1.2 Opciones de Recambio para Fuentes Residenciales

Como opciones de recambio de los calefactores a leña se considerarán los equipos a kerosene, gas licuado de petróleo (GLP), electricidad, pellet, o aquellos equipos a leña que presentan menores tasas de emisión de material particulado. Los equipos a considerar para este estudio se obtienen de la investigación de Sanhueza et al. (2015). Los datos que se usarán de estos equipos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4-3 Artefactos de calefacción a evaluar

Marca	Modelo	Combustible	Consumo (lt/h, kg/h, kwh)¹⁴	Costo Anual Equivalente CAE (pesos chilenos)¹⁵
Sindelen	EP-6000	Kerosene	0,23	6.445
Ocarina	OC-95TS	Kerosene	0,28	4.517
Sindelen	EP-6500	Kerosene	0,29	6.876
Sindelen	EP10000M	Kerosene	0,491	13.186
Sumo Heat	SH-230	Kerosene	0,6	16.929
Toyotomi	TF Laser-73	Kerosene	1,08	183.550
Elko	EH-4200	GLP	0,319	8.457
Sindelen	SR-6200 PT	GLP	0,269	9.619
Ursus Trotter	LM-4200T	GLP	0,264	11.217
Magefesa	MGF-1610	Electricidad	1,2	2.045
Heat Storm	HS-1000	Electricidad	1	8.469
Biosmart	BIO 1500 PB	Electricidad	1,5	24.001
Hass&Sohn	Catania-RLU	Pellet	1,64	127.749
Bosca	Spirit	Pellet	2,04	66.764
Bosca	Turbo	Pellet	1,84	49.821
Hass&Sohn	Fuego	Leña	1,23	54.437
Hass&Sohn	Pyrus	Leña	1,48	55.620
Hass&Sohn	Aarhus-II	Leña	1,72	56.803
Hass&Sohn	i-2020	Leña	1,97	57.985
Hass&Sohn	Vestre	Leña	2,45	60.351

Fuente: Sanhueza et al. (2015)

En este punto es importante destacar que para la generación de escenarios, en uno de estos se considerarán todas las opciones de recambio presentadas anteriormente, mientras que en el segundo, se aplicará una restricción de liquidez que consiste en solo considerar aquellas opciones que poseen un CAE inferior a \$17.400, lo que equivale a un costo total de \$200.000 aproximadamente. Lo anterior, con el objetivo de replicar la situación base en la cual no se observa que los hogares estén realizando recambios masivos por equipos más eficientes,

¹⁴ Las unidades de medida que corresponden a cada tipo de combustible son las siguientes: kerosene (lt/h), GLP (kg/h), electricidad (kwh), pellet, (kg/h) y leña (kg/h)

¹⁵ Precios anualizados a 20 años utilizando una tasa social del 6% y actualizados a precios del año 2015, considerando un aumento del 3,92% (los valores originales están en base al año 2013). http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_precios/ipc/base_2013/, revisado el 27 de Marzo del 2015.

atribuible al alto costo de inversión inicial y bajos ingresos que alcanzan los \$218.642 per cápita (CASEN, 2013).

4.1.3 Funciones de Costos asociadas a las Opciones de Recambio

Para estimar los costos de las opciones de recambio se considera la equivalencia energética, esto quiere decir, que los equipos de recambio deben proporcionar la misma cantidad de energía calorífica que los equipos actuales, según su consumo de leña declarado en la encuesta CASEN (2013). A partir de esto, se estima cuál es el consumo de combustible requerido por el equipo de recambio. Esto se hace de la siguiente forma.

$$CC_{EN} = \frac{CL_{EA} * PC_{leña} * Ef_{EA}}{PC_{combustibleEN}} \quad (2)$$

Donde,

CC_{EN} : Consumo de combustible del hogar con equipo de recambio, considerando un consumo energéticamente equivalente al consumo de leña declarado por los hogares. En (lt, kg o kwh)/año según combustible del equipo de recambio

CL_{EA} : Consumo de leña en kg/año, declarado para cada hogar

$PC_{leña}^{16}$: Poder calorífico inferior de la leña en Kcal/kg

Ef_{EA} : Eficiencia térmica del equipo de calefacción usado actualmente por cada hogar

Ef_{EN} : Eficiencia térmica de la opción de calefactor de recambio

$PC_{combustibleEN}$: Poder calorífico inferior en Kcal/(lt, kg o kwh) del combustible del equipo de recambio

En particular, para los artefactos a leña, el nuevo consumo está sujeto únicamente a la eficiencia de los equipos, ya que el poder calorífico es el mismo.

Las eficiencias térmicas de los equipos utilizados por los hogares y de las opciones de recambio se presentan a continuación.

¹⁶ El poder calorífico de la leña depende en gran parte del porcentaje de humedad de la misma, estableciéndose una relación inversa entre ambos. Este efecto fue considerado en el cálculo de emisiones.

Tabla 4-4 Eficiencia térmica artefactos de calefacción

Artefacto	Eficiencia Térmica¹⁷
Comb. Lenta Simple	62%
Salamandra	35%
Cocina a leña	32%
Chimenea	15%
Comb. Lenta Doble	65%
Brasero	90%
Fogón	15%
Cocina + Chimenea	27%
Cocina + Comb. Lenta Simple	41%
Cocina + Salamandra	33%
Artefactos de Calefacción a Kerosene	84%
Artefactos de Calefacción a GLP	92%
Artefactos de Calefacción a Electricidad	100%
Artefactos de Calefacción a Pellet	92%
Artefactos de Calefacción a Leña con una eficiencia mayor	82%

Fuente: Sanhueza et al. (2015)

Con la información anterior y la información de los precios de los combustibles fue posible calcular los costos operacionales, lo que se hace de la siguiente forma.

$$CO = CC_{EN} * P_{Comb} \quad (3)$$

Donde,

CO : Costo operacional (\$/año)

CC_{EN} : Consumo de combustible del hogar equipo nuevo, calculado en la ecuación (2)
(lt, kg o kwh)/año

P_{Comb} : Precio del combustible del equipo de recambio (\$/(lt, kg o kwh))

¹⁷ Para de aquellos hogares que utilizan más de dos artefactos de calefacción, se consideró el supuesto de que el uso de la cocina a leña es del 70% y la del otro artefacto es del 30%. Sanhueza et al. (2015)

Los precios de estos combustibles y los poderes caloríficos utilizados para el cálculo de costos se presentan en la siguiente tabla, de donde se puede inferir que el bajo precio de la leña se traduce en menores costos de operación para quienes usan este combustible.

Tabla 4-5 Precio y poder calorífico de los combustibles

Tipo de Combustible	Precio	Poder Calorífico
Kerosene	644 \$/lt	7.413,3 kcal/lt
GLP	1.088 \$/kg	11.900 kcal/kg
Electricidad	115,5 – 156 \$/kwatt	859,84 kcal/kwh
Pellet	277,3 \$/kg	4.200 kcal/kg
Leña	100,9 \$/kg	3.354,5 kcal/kg

Fuente: Elaboración propia en base a precios actualizados¹⁸ y a los poderes caloríficos inferiores utilizados por Sanhueza et al. (2015)

Además, con esta información es posible estimar el ahorro que se obtiene de reducir o eliminar el consumo de leña actual al momento de efectuar el recambio del equipo de calefacción. Esto se hace de la siguiente forma.

$$A = CL_{EA} * P_{leña} \quad (4)$$

Donde,

A: Ahorro en \$ producto de reducir o eliminar el consumo de leña declarado (\$/año)

CL_{EA} : Consumo de leña en kg/año, declarado para cada hogar

$P_{leña}$: Precio de la leña (\$/kg)

Sin embargo, además de los costos operacionales y ahorros asociados al recambio del equipo de calefacción; el recambio también debe considerar dentro de sus costos la cantidad de equipos que se necesitan para calefaccionar las viviendas, dado su rango de operación. Esto se hace

¹⁸Precios actualizados al año 2015, revisado el 7 de marzo del 2015:

Precio leña: <http://www.lenaexpress.cl/>; <http://www.sodimac.cl/sodimac-cl/product/155543X/Saco-de-lena-25-kilos>; <http://www.astillas.cl/precios.htm>; <http://www.maderaselcacique.cl/>; http://www.sinia.cl/1292/articles-28474_recurso_2.pdf

Precio kerosene: <http://www.bencinaenlinea.cl/web2/buscador.php?region=10>

Precio GLP considerando galón de 15kg como un promedio simple de los mayores precios de venta minorista y mayorista de la zona en estudio: http://gasenlinea.gob.cl/index.php/web/buscador?rere_id=8

Precio electricidad, cuya tarifa más alta se aplica cuando se superan los 430 kwatts de consumo mensual durante el periodo de invierno: <http://www.cgedistribucion.cl/Clientehogar/Paginas/Tarifas.aspx>

Precio pellet: <http://www.bosca.cl/#!saco-18-kg-pellet/c1y6a>

asumiendo una utilización de los calefactores de 8 horas al día y 183 días al año, lo que comprende el periodo más frío del Concepción Metropolitano, entre los meses marzo y octubre. Esto se calcula como sigue.

$$N_{equipos} = \frac{CC_{EN}}{Cn_{equipo} * Ut_{horas} * Ut_{días}} \quad (5)$$

Donde,

$N_{equipos}$: Cantidad de equipos necesarios para calefaccionar un hogar

CC_{EN} : Consumo de combustible del hogar con equipo nuevo, calculado en ecuación (2)

Cn_{equipo} : Consumo de combustible en kg/hora, lt/hr o kwh de cada una de las opciones de recambio, indicado en la tabla 4-3

Ut_{horas} : Cantidad de horas al día que se utiliza el equipo, en este caso 8 horas

$Ut_{días}$: Cantidad de días al año en que se utiliza el equipo, en este caso 183 días

Finalmente, con la cantidad de equipos, los costos operacionales y los ahorros producidos, se puede establecer la función de costos totales para cada una de las opciones de recambio. Esta función es como sigue.

$$CT = (N_{equipos} * CAE + CO - A) * exp \quad (6)$$

Donde,

CT : Costo anual de una opción de recambio para un tipo de hogar en particular

$N_{equipos}$: Cantidad de equipos necesarios para calefaccionar un hogar

CAE : Costo anual equivalente de un equipo nuevo (ver tabla 4-3)

CO : Costo operacional, descrito en la ecuación (3)

A : Ahorro producto de reducir o eliminar el consumo de leña, descrito en la ecuación (4)

exp : Factor de expansión (cantidad de hogares que representa el hogar encuestado)

4.2 Tecnologías de Abatimiento para las Fuentes Industriales

En las industrias, el abatimiento del material particulado suele realizarse mediante tecnologías de abatimiento de fin de tubo, las cuales capturan parte de las partículas emitidas en los procesos de combustión. A continuación se describen las tecnologías consideradas para este estudio.

El lavador Venturi es un equipo que puede remover partículas o gases por impacto o intercepción de un líquido lavador. Este tipo de lavador de gases húmedo es diseñado para remover partículas muy pequeñas, entre 0,2 y 10 micrones. El mecanismo principal consiste en una torre lavadora que va aumentando el tamaño de las partículas para que sean removidas fácilmente. El mecanismo secundario consiste en atrapar las pequeñas partículas con una película líquida que las arrastra y remueve con su corriente.

El filtro de mangas es un mecanismo diseñado para separar las partículas sólidas que se encuentran en suspensión dentro de una corriente gaseosa. Esta corriente de gas entra al equipo chocando y atravesando una serie de paneles, y dividiéndose en varias corrientes. Al mismo tiempo, las partículas de polvo se van depositando en la superficie de los paneles atravesados. Una vez que el gas es filtrado, éste se descarga por medio de un ventilador. De forma periódica estos equipos deben ser limpiados, aplicándose aire a presión en sentido inverso al de su funcionamiento, el cual desprende las partículas acumuladas en el filtro.

El precipitador electroestático está diseñado para atrapar y remover el material particulado de los gases de salida de las chimeneas. Se hace manteniendo un alto voltaje entre un alambre que baja por el centro de un ducto y la pared externa de éste. Esto genera un campo eléctrico que carga las partículas, las cuales son recolectadas en los platos o placas colectoras, con carga eléctrica opuesta, mientras el gas sigue fluyendo. El proceso de remoción de partículas es seco y las partículas atrapadas caen por efecto de la gravedad, a veces ayudadas por vibraciones.

Las eficiencias de reducción para $MP_{2,5}$ de las tecnologías de abatimiento se presentan en la siguiente tabla según tipo de combustible.

Tabla 4-6 Eficiencias tecnologías de abatimiento para MP_{2,5} según combustible

Combustible	Filtro de Manga	Lavador Venturi	Precipitador electrostático
Carbón	96%	89%	94%
Leña	99%	92%	90%
Petróleo N°6	99%	89%	95%
Petróleo N°5	99%	89%	95%
Petróleo N°2	99%	89%	95%

Fuente: US EPA (2009) y Cooper y Alley (2002)

Cabe destacar que para fuentes industriales con procesos sin combustión solo se considera la implementación de filtro de mangas de acuerdo a su factibilidad técnica.

4.2.1 Funciones de Costo asociadas a las Tecnologías de Abatimiento

Los costos de la utilización de cada una de las tecnologías de abatimiento, se estiman a partir de las funciones de costos desarrolladas por Ponce y Chávez (2005) para MP₁₀, actualizadas a precios del 2015 y adaptadas para emisiones de MP_{2,5} por Mardones y Jiménez (2015). Estas funciones son las siguientes.

Tabla 4-7 Funciones de costo de las tecnologías de abatimiento

Tecnología	Función de Costos (en pesos chilenos)
Precipitador Electrostático	$CT = 189.110,4 * (4.213,7 * E_{MP2,5} * tasa_{MP2,5}^{MP10})^{0,628} + 1.062,2 * (4.213,7 * E_{MP2,5} * tasa_{MP2,5}^{MP10}) + 14.924.140$
Lavador Venturi	$CT = 78.111,3 * (4.213,7 * E_{MP2,5} * tasa_{MP2,5}^{MP10})^{0,56} + 903,5 * (4.213,7 * E_{MP2,5} * tasa_{MP2,5}^{MP10}) + 26.816.018$
Filtro mangas	$CT = 2.525,9 * (4.213,7 * E_{MP2,5} * tasa_{MP2,5}^{MP10})^{0,914} + 1.033,1 * (4.213,7 * E_{MP2,5} * tasa_{MP2,5}^{MP10}) + 21.736.544$

Donde: *CT*: Costo total de la tecnología de abatimiento (\$); *E_{MP2,5}*: Emisiones de MP_{2,5} de la fuente industrial (ton/año); y *tasa_{MP2,5}^{MP10}*: Emisiones de MP₁₀ divididas por emisiones de MP_{2,5}

Fuente: Ponce & Chávez (2005) y Mardones y Jiménez (2015)

Por otra parte, como estas funciones fueron modeladas para MP₁₀ es necesario utilizar una aproximación para usarlas con MP_{2,5}, que en este caso consiste en multiplicar E por la relación existente entre las emisiones de MP_{2,5} y MP₁₀ de cada industria. La información sobre las

emisiones industriales se obtuvo del inventario de emisiones para Concepción Metropolitano actualizado al año 2013 por EULA (2014).

4.3 Modelos de Dispersión y FEC

Los modelos de dispersión se utilizan para relacionar niveles de emisiones con su contribución en los niveles de concentración en un lugar específico. Se basan principalmente en ecuaciones que buscan describir el comportamiento de la atmósfera, para así, establecer factores de transferencia que permiten relacionar las emisiones generadas por una fuente, con cierto nivel de concentración en un receptor. Estos modelos incorporan módulos de dinámicas de transporte de aerosoles, información acerca de la geografía del lugar, el patrón de comportamiento de los vientos, y los procesos físicos y químicos en el ambiente. Con esta información de entrada, los modelos son capaces de generar como solución los factores de transferencia, o también conocidos como factores emisión-concentración (FEC). Estos factores relacionan las emisiones (ton/año) de un determinado emisor con los niveles de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en un receptor. Pudiendo presentarse efectos muy diferentes a partir de las emisiones de una fuente sobre dos receptores distintos. La relación lineal entre emisiones y concentración se puede explicar con la siguiente aproximación.

$$FEC_{i,j} = \frac{C_i}{E_j} \quad (7)$$

Donde,

$FEC_{i,j}$: Factor de emisión-concentración en el receptor i debido a las emisiones de la fuente j
(($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/ (ton/año))

C_i : Concentración de $\text{MP}_{2,5}$ en el receptor i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

E_j : Emisiones de la fuente j (ton/año)

Para este estudio se considerara el efecto de las emisiones sobre las concentraciones de las distintas comunas del Concepción Metropolitano, excluyendo Hualqui. Para las fuentes industriales, los FEC para $\text{MP}_{2,5}$ fueron obtenidos de un estudio realizado por EULA (2014), a través del modelo de transporte y dispersión CALPUFF, el cual determina las concentraciones

sobre un determinado receptor con la información espacial y temporal de las fuentes emisoras y con los resultados del modelo meteorológico CALMET.

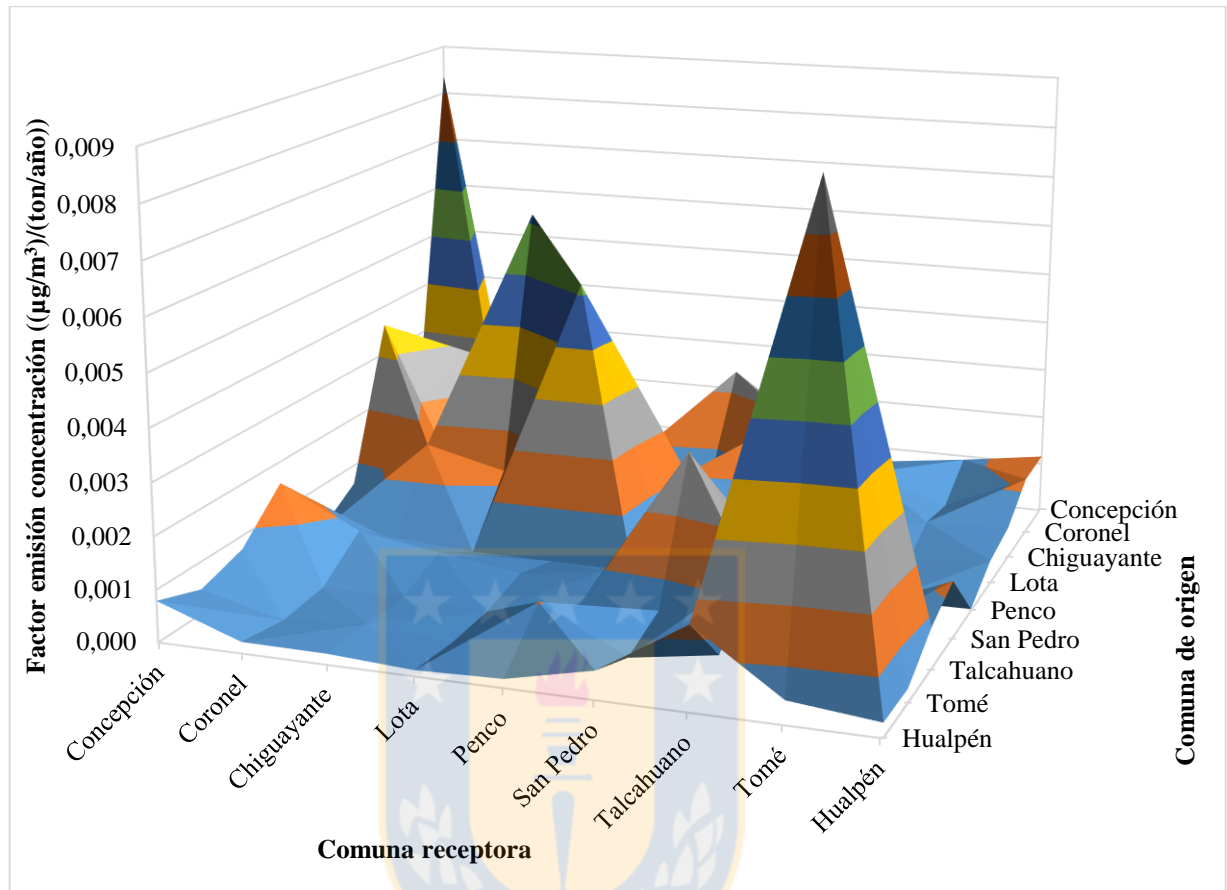


Figura 4-1 FEC MP_{2,5} fuentes industriales del Concepción Metropolitano

Fuente: EULA (2014)

Por otra parte, para las fuentes residenciales se estimaron los factores emisión-concentración para MP_{2,5} a partir de los datos de concentraciones y emisiones de MP₁₀ y MP_{2,5} disponibles¹⁹ (Ver Anexo 2). Además, se trabajará bajo el supuesto de que la dispersión de las emisiones residenciales no alcanza a llegar a otras comunas, esto debido a que la altura de las chimeneas no es suficiente como para que las emisiones recorran grandes distancias. Las diferencias entre los factores de emisión-concentración entre las distintas comunas se pueden atribuir a la presencia de distintas condiciones geográficas, meteorológicas y de ventilación, entre otras.

¹⁹ Los FEC residenciales para MP_{2,5} fueron estimados por el profesor guía Dr. Cristián Mardones Poblete, Docente Departamento Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.

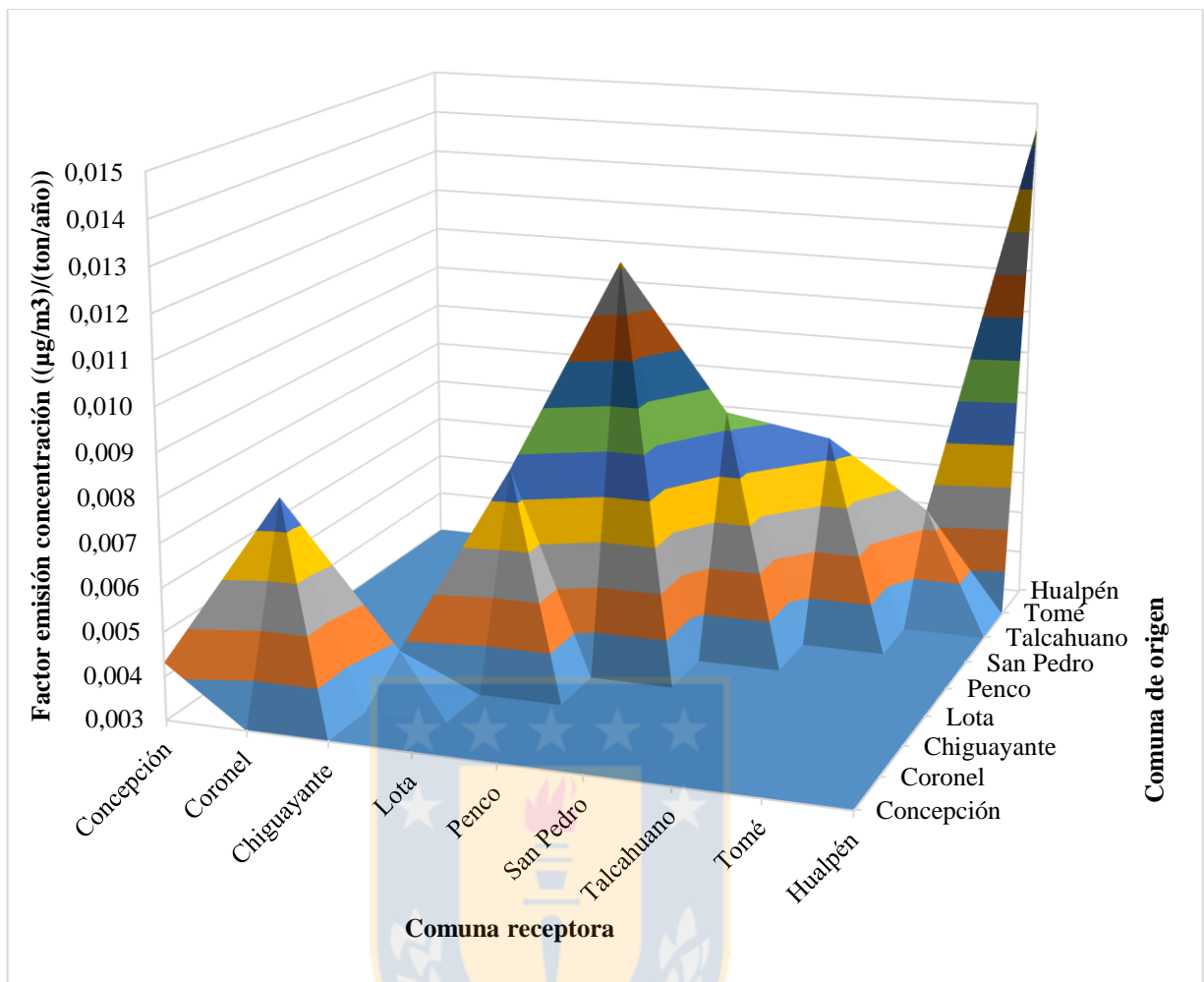


Figura 4-2 FEC MP_{2,5} fuentes residenciales del Concepción Metropolitano

Fuente: Elaboración propia en base a EULA (2014) y SINCA (2015)²⁰

4.4 Modelo de Optimización para Reducir MP_{2,5}

El modelo de optimización considera la minimización de los costos asociados a reducir los niveles de concentración de MP_{2,5} presentes en las distintas comunas del Concepción Metropolitano, esto mediante la implementación de opciones tecnológicas en fuentes residenciales e industriales que permitan reducir las emisiones de este contaminante.

En primer lugar, es necesario dejar en claro la notación que se utilizará para identificar las fuentes, alternativas, y los distintos elementos que se utilizarán para definir el modelo. Esta se puede ver a continuación.

²⁰ <http://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/index/id/VIII>, revisado el 1 de Marzo del 2015

Tipos de Fuentes

Fuentes h: Son las fuentes residenciales (hogares) que consumen leña en el Concepción Metropolitano consideradas de la encuesta CASEN (2013). Estas son 2.200 fuentes, las que representan aproximadamente a 165.551 hogares, ya que cada hogar encuestado representa una de las 2.200 fuentes residenciales, la cual a su vez representa a otros hogares de similares características (representados mediante el factor de expansión).

Fuentes f: Son las fuentes industriales a las que se les puede incorporar alguna tecnología de abatimiento, y de las cuales se tienen datos sobre sus emisiones de $MP_{2,5}$ (200 fuentes industriales).

Opciones Tecnológicas

Opción r: Son las opciones de recambio de calefactor para las fuentes residenciales. Estas corresponden a 6 calefactores a kerosene, 3 a gas licuado de petróleo (GLP), 3 a electricidad, 3 a pellet y 5 a leña. Además se considera la opción de no hacer recambio.

Opción t: Son las tecnologías de abatimiento consideradas para las fuentes industriales. Estas son lavador Venturi, filtro de mangas y precipitador electrostático. Cada una de estas presenta distintas eficiencias de reducción de emisiones, dependiendo del tipo de combustible que utiliza la fuente industrial. También se considera la opción de no implementar tecnologías de abatimiento.

Las variables de decisión que se utilizan para definir el modelo son dos, ambas de carácter binario. A continuación se describe cada una de ellas.

$w_{h,r}$: Variable binaria que determina si la fuente residencial h utiliza la opción de recambio r .

$y_{i,t}$: Variable binaria que determina si la fuente industrial i utiliza la tecnología de abatimiento t .

Además, cada una de las opciones representadas por las variables binarias tiene asociado un costo, los cuales son descritos a continuación.

$ch_{g,h,r}$: Costo anualizado del recambio r para la fuente residencial h . Para determinar estos costos anualizados se utiliza la función descrita al final de la sección 4.1.3, ecuación número (6). Esta función de costos incluye el factor de expansión, es decir, a todos los hogares que el tipo de hogar h representa.

$Cind_{i,t}$: Costo anualizado en que incurre la fuente industrial i al implementar la tecnología de abatimiento t . Para determinar estos costos se utilizaron las funciones de costos descritas en la tabla 4-7.

Dado lo anterior, la función objetivo del modelo de optimización es como sigue:

$$Z = MIN \left[\sum_h \sum_r chog_{h,r} * w_{h,r} \right] + \left[\sum_i \sum_t cind_{i,t} * y_{i,t} \right] \quad (8)$$

Sujeta a las restricciones siguientes:

$$\sum_r w_{h,r} = 1, \forall \text{ fuente } h \quad (9)$$

$$\sum_t y_{i,t} = 1, \forall \text{ fuente } i \quad (10)$$

$$\left[\sum_h \sum_r ehog_h * fechog_{h,k} * exp_h * (1 - rhog_{h,r}) * w_{h,r} \right] + \left[\sum_i \sum_t eind_i * fecind_{i,k} * (1 - rind_{i,t}) * y_{i,t} \right] + background \leq \mu gmeta_k, \forall \text{ comuna } k \quad (11)$$

$$\left[\sum_h \sum_r ehog_h * fechog_{h,k} * exp_h * (1 - rhog_{h,r}) * w_{h,r} \right] + \left[\sum_i \sum_t eind_i * fecind_{i,k} * (1 - rind_{i,t}) * y_{i,t} \right] \leq (\mu ginicial_k - background) * (1 - porcmeta), \forall \text{ comuna } k \quad (12)$$

$$\left[\sum_h \sum_r ehog_h * exp_h * (1 - rhog_{h,r}) * w_{h,r} \right] + \left[\sum_i \sum_t eind_i * (1 - rind_{i,t}) * y_{i,t} \right] \leq (1 - porcmeta) * \left[\sum_i eind_i + \sum_h ehog_h \right] \quad (13)$$

De esta manera, la función objetivo del modelo representa la minimización de costos asociados a reducir la contaminación por MP_{2,5} en las distintas comunas del Concepción Metropolitano, mediante la implementación de tecnologías de abatimiento y opciones recambio que permiten la reducción de las emisiones tanto de fuentes industriales como residenciales.

Las restricciones (9) y (10) representan que las fuentes industriales y residenciales deben escoger solo una opción tecnológica para implementar y reducir sus emisiones. Por otra parte, la reducción de la contaminación se puede llevar a cabo de tres formas: utilizando un sistema de permisos ambientales (SPA) el cual establece un nivel de concentración meta ($\mu gmeta_k$) para todas las comunas (restricción (11)); un sistema de permisos ambientales porcentual (SPA por porcentajes) el cual fija una meta de reducción porcentual ($porcmeta$) sobre la fracción reducible

de las concentraciones de cada comuna (restricción (12)); o con un sistema de permisos de emisiones transables (SPET) que exige una meta de reducción porcentual (*porcmeta*) sobre las emisiones de las fuentes (restricción (13)). Es importante destacar que estos tres esquemas regulatorios son excluyentes entre sí. En este sentido, la reducción de emisiones para las fuentes residenciales $rhog_{h,r}$, está dada por la relación que existe entre las emisiones actuales de las fuentes y las que generan una vez efectuado el recambio. Mientras que para las fuentes industriales, la reducción $rind_{i,t}$ refleja la eficiencia de reducción de la tecnología de abatimiento según tipo de combustible, tal como se muestra en la tabla 4-5. Los factores de emisión concentración de las fuentes residenciales e industriales se denotan $fehog_{h,k}$ y $fecind_{i,k}$, respectivamente (Ver sección 4.3). Las emisiones se denotan $ehog_h$ y $eind_i$ para las fuentes residenciales e industriales, respectivamente. Finalmente, el parámetro exp_h representa el factor de expansión asociado a cada tipo de hogar indicado por la encuesta CASEN (2013).

Finalmente, es importante recordar que se definen dos escenarios, el primero considera que los hogares poseen la liquidez, la información y el acceso a mejores tecnologías; lo cual les permitiría realizar cualquiera de los recambios disponibles, pudiendo acceder a tecnologías más eficientes y menos contaminantes. Mientras que el segundo restringirá el acceso a aquellas alternativas con costo superior a \$200.000, que son todos los calefactores a leña, todos los calefactores a pellet, el calefactor eléctrico más costoso y el calefactor a kerosene más costoso (Ver tabla 4-3); de tal forma de simular que los hogares no poseen la liquidez, el crédito, la información o el interés por participar del recambio con esas tecnologías.



5 RESULTADOS

5.1 Emisiones y Concentraciones de MP_{2,5}

Para cada comuna considerada en este estudio se estimaron las emisiones y aporte a concentraciones que son atribuibles a fuentes residenciales e industriales. Estos datos se pueden ver en la siguiente tabla; los cuales representan una estimación de la situación base en el Concepción Metropolitano.

Tabla 5-1 Emisiones y aporte a concentraciones de MP_{2,5} según tipo de fuente y comuna

	Emisiones (ton/año)			Aporte a concentraciones (µg/m ³)			Total con Background ²¹
	Industrias	Hogares	Total	Industrias	Hogares	Total	
Concepción	4	1.006	1.009	1,9	4,3	6,2	19,2
Coronel	737	705	1.442	2,5	5,4	7,9	20,9
Chiguayante	0	584	584	1,1	2,2	3,3	16,3
Lota	218	435	652	1,8	3,3	5,2	18,2
Penco	206	228	434	0,7	2,8	3,5	16,5
San Pedro de la Paz	26	298	324	2,0	2,5	4,6	17,6
Talcahuano	674	674	1.349	2,0	5,0	7,0	20,0
Tomé	15	333	349	0,8	1,8	2,6	15,6
Hualpén	137	317	453	1,6	4,6	6,1	19,1
Total	2.017	4.579	6.596				

Fuente: Elaboración propia

De esta forma se observa, que el total de emisiones consideradas en este estudio es de 6.596 ton/año de MP_{2,5}, las cuales se dividen en 4.579 ton/año y 2.017 ton/año emitidas por 165.551 fuentes residenciales y 200 fuentes industriales, respectivamente. Se observa que las industrias por si solas podrían contribuir a alcanzar niveles de concentración bajo la Norma Primaria de Calidad Ambiental para MP_{2,5}, 20 µg/m³ como promedio anual²². Sin embargo, las fuentes residenciales contribuyen más que las fuentes industriales a las concentraciones de MP_{2,5}.

En cuanto a las fuentes residenciales, es importante destacar que en estudios previos (Sanhueza et al., 2015) se utilizó la información provista por la encuesta CASEN (2006), la cual presentaba una gran variabilidad en el consumo de leña, con un mínimo de 5 kg y un máximo de 94.000,

²¹ Se considera un background de 13 µg/m³ para las concentraciones de MP_{2,5} tomando la información un estudio realizado en la región (IIT-UDEC, 2013).

²² Esto se contrapone al resultado de Mardones y Jiménez (2015), lo cual se atribuye a que el nivel total de concentraciones es menor, a que se utilizan inventarios de emisiones industriales más recientes con menor cantidad de emisiones industriales y a nuevas estimaciones de los factores emisión-concentración en la zona de estudio

estimándose 9.120 ton/año de $MP_{2,5}$ emitidas por 137.967 hogares. Por lo que la disminución en la cantidad de emisiones de $MP_{2,5}$ generadas en este estudio se atribuye a que los nuevos datos provenientes de la encuesta CASEN (2013) son más precisos al presentar una menor variabilidad, con mínimos y máximos de 9 kg y 13.920 kg de leña, respectivamente; lo que resulta razonable, pues no debería existir una dispersión tan grande entre los consumos de leña de los hogares. Por otra parte, es posible apreciar, que tanto las emisiones como los niveles de concentración estimados para cada comuna se ven influenciados principalmente por las fuentes residenciales; que si bien cada una por si sola puede que no tenga un gran impacto en la calidad del aire, en conjunto producen un efecto mucho mayor que el de las fuentes industriales juntas.

Además, queda en evidencia que la relación entre emisiones y concentraciones no es la misma en todas las comunas, pudiéndose apreciar el caso de Chiguayante, que pese a tener casi nulas emisiones industriales directas los niveles de concentración asociados a este tipo de fuentes no son tan bajos, por las emisiones industriales de otras comunas. Atribuyéndose esta disparidad a que las condiciones geográficas y de ventilación del contaminante son distintas entre comunas. En cuanto a las fuentes residenciales, hay que recordar que su efecto es más bien local; lo cual se atribuye principalmente a que la menor altura de las chimeneas (en relación a las industrias) contribuye a una menor dispersión del contaminante.

Por otra parte, es importante señalar que las 200 fuentes industriales consideradas en este estudio son todas aquellas que presentan algún nivel de emisión de $MP_{2,5}$ según el inventario de emisiones. Sin embargo, de estas 200 fuentes industriales, solo 166 son consideradas como capaces de implementar alguna tecnología de abatimiento; pues poseen un tipo de combustible compatible con las tecnologías propuestas y no tienen implementada ninguna de las medidas de abatimiento a evaluadas, o bien son procesos industriales sin combustión que pueden instalar filtro de mangas. El resto de las fuentes industriales son consideradas solo para calcular el total de emisiones y concentraciones.

Finalmente, respecto a las emisiones de las fuentes industriales, éstas dependen principalmente del tipo de combustible utilizado. Las emisiones según tipo de combustible se presentan en la tabla 5-2. En la cual se puede observar que la mayor cantidad de emisiones la generan las fuentes que utilizan leña y la menor aquellas que utilizan Petróleo N°2; en cuanto al combustible más utilizado, es el Petróleo N°6 y lo utilizan 64 fuentes.

Tabla 5-2 Emisiones de MP_{2,5} de fuentes industriales según tipo de combustible

Combustible	Nº Fuentes	Emisiones (ton/año)
Carbón	14	20
Leña	36	921
Petróleo N°2	40	1
Petróleo N°5	7	138
Petróleo N°6	64	351
Gas Natural	20	10
Sin Combustible (Proceso)	10	437
No identificado	9	139
Total	200	2.017

Fuente: Elaboración propia

5.2 Modelo de Optimización

Varias simulaciones fueron realizadas con el modelo de optimización, a modo de obtener los costos, emisiones, concentraciones y tecnologías asociadas a los distintos escenarios, esquemas regulatorios y metas de reducción. Los escenarios evaluados se diferencian en la disponibilidad de opciones de recambio para las fuentes residenciales.

El primer escenario, considera que las fuentes residenciales pueden disponer de cualquiera de las opciones de recambio de calefactores; las que corresponden a 6 calefactores a kerosene, 3 a gas licuado de petróleo (GLP), 3 a electricidad, 3 a pellet y 5 a leña de mayor eficiencia, además hay que recordar que esta la opción de no hacer un recambio. Mientras que el segundo escenario consiste en eliminar aquellos equipos con costo superior a \$200.000, quedando como opciones de recambio 5 calefactores a kerosene, 3 a GLP y 2 a electricidad.

El primer esquema regulatorio en análisis se basa en un sistema de permisos de emisiones transables (SPET) que busca reducir un porcentaje de las emisiones totales. Los resultados bajo el primer escenario se presentan a continuación.

Tabla 5-3 Resultados SPET con todas las opciones de recambio

		Meta de Reducción de Emisiones							
		Base	0%	20%	40%	60%	80%	96%	97%
Costos (MM\$)		-	-4.386	-4.386	-4.386	-3.431	4.175	27.590	31.516
Emisiones (ton/año)		6.596	3.655	3.655	3.655	2.639	1.319	264	198
Concentraciones por Comuna (µg/m3)	Concepción	19,2	16,2	16,2	16,2	15,4	14,3	13,2	13,2
	Coronel	20,9	17,4	17,4	17,4	16,2	14,4	13,2	13,1
	Chiguayante	16,3	15,0	15,0	15,0	14,4	13,6	13,1	13,0
	Lota	18,2	15,9	15,9	15,9	15,2	13,8	13,1	13,0
	Penco	16,5	15,1	15,1	15,1	14,2	13,6	13,1	13,1
	San Pedro	17,6	15,9	15,9	15,9	15,5	14,1	13,2	13,1
	Talcahuano	20,0	16,5	16,5	16,5	15,6	14,5	13,3	13,3
	Tomé	15,6	14,3	14,3	14,3	14,1	13,7	13,1	13,1
	Hualpén	19,1	17,0	17,0	17,0	15,3	14,2	13,2	13,2
Cambios Fuentes Residenciales	Ninguno	165.551	66.144	66.144	66.144	22.120	0	0	0
	GLP	0	0	0	0	0	0	124.806	165.551
	Pellet	0	67.992	67.992	67.992	86.160	114.667	40.745	0
	Leña	0	31.415	31.415	31.415	57.271	50.884	0	0
	Kerosene	0	0	0	0	0	0	0	0
	Electricidad	0	0	0	0	0	0	0	0
Cambios Fuentes Industriales	Ninguno	200	200	200	200	200	192	122	105
	Lavador Venturi	0	0	0	0	0	6	15	0
	Filtro de Mangas	0	0	0	0	0	2	63	95
	Precipitador E.	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Es posible observar que existe una clara diferencia entre la situación base y la meta de reducción del 0%, lo cual se atribuye básicamente a que la situación base no involucra ninguna tecnología de abatimiento ni recambio tecnológico, mientras que en la meta del 0%, aunque no existe ninguna exigencia de reducción, el modelo arroja que las fuentes que pueden obtener ahorros por cambiar sus equipos de calefacción o por implementar alguna tecnología de abatimiento lo hacen, para este caso en particular son solamente hogares. Por otra parte, para metas desde el 0% al 60% de reducción es posible apreciar que se mantiene el ahorro mencionado anteriormente, comenzando a incurrir en algunos costos en la meta del 60%. Estos ahorros se pueden atribuir a la mayor eficiencia de los nuevos equipos a leña y pellet; lo que supondría que con la información y liquidez suficientes los hogares debieran cambiar por sí solos sus equipos de calefacción actuales. Cuanto la meta de reducción exige entre un 60% y 80%, todas las fuentes residenciales realizan recambios, eligiendo calefactores a leña eficientes y calefactores a pellet, mientras las fuentes industriales terminan implementando filtros de mangas, en mayor

medida, y lavadores Venturi. Finalmente, cuando la meta de reducción alcanza un 97% de exigencia (exigencia máxima), todas las fuentes residenciales optan por usar calefactores a gas licuado de petróleo (GLP) y 95 fuentes industriales implementan tecnologías de abatimiento (filtros de mangas). Además, se puede observar que al ir incrementando la meta de reducción de 60% a 97 % los costos aumentan drásticamente cuando se alcanzan las reducciones más altas. Es evidente que en primera instancia los hogares producen la mayoría de las reducciones al cambiarse a nuevos equipos de leña o pellet, luego al aumentar más la meta de reducción la mayoría de los hogares comienza a optar por calefactores a GLP y la mayoría de las industrias por implementar filtro de mangas, ya que estas dos últimas opciones son las que proveen reducciones a más bajo costo para los hogares e industrias. Por otra parte, hay que destacar que incluso con una meta de 0% los niveles de concentración de cada comuna se encuentran alrededor de los $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, quedando en evidencia que las fuentes residenciales prácticamente por si solas y moviéndose entre las opciones de recambio disponibles, pueden disminuir la mayor parte de las emisiones, y que solo cuando la exigencia es realmente alta es necesario que una mayor cantidad de industrias participen.

El ahorro en costos se puede atribuir a la mayor eficiencia de los nuevos artefactos de calefacción utilizados por las fuentes residenciales, lo cual permite a los hogares gastar menos en combustible y obtener un ahorro en comparación a cuando utilizaban su equipo antiguo.

El segundo esquema regulatorio se basa en un sistema de permisos ambientales (SPA) que busca reducir el mismo porcentaje de concentraciones sobre cada comuna, solo considerando la fracción atribuible a las fuentes emisoras (no considera background²³). Si se exigiera la meta porcentual sobre el total de concentraciones solo se podrían alcanzar reducciones bajo el 25% para algunas comunas (la meta se vuelve demasiado exigente), ya que las fuentes emisoras no explican toda la participación de los niveles de concentración, siendo más de la mitad de los niveles de concentración atribuibles al background. Los resultados de esta simulación se presentan a continuación.

²³ El background es el nivel de concentración de contaminante que existiría aún si las emisiones de cada comuna fueran cero, dicho de otra forma, es el nivel de concentración base considerando en este caso $13\mu\text{g}/\text{m}^3$ en cada comuna.

Tabla 5-4 Resultados SPA por porcentaje con todas las opciones de recambio

		Meta de Reducción Porcentual de Concentraciones						
		Base	0%	20%	40%	60%	80%	96%
Costos (MM\$)		-	-4.386	-4.386	-4.376	-2.674	3.338	23.815
Emisiones (ton/año)		6.596	3.655	3.655	3.594	2.692	1.631	514
Concentraciones por Comuna (µg/m3)	Concepción	19,2	16,2	16,2	16,2	15,5	14,2	13,3
	Coronel	20,9	17,4	17,4	17,4	16,2	14,6	13,3
	Chiguayante	16,3	15,0	15,0	15,0	14,3	13,7	13,1
	Lota	18,2	15,9	15,9	15,9	15,1	14,0	13,2
	Penco	16,5	15,1	15,1	15,1	14,4	13,7	13,1
	San Pedro	17,6	15,9	15,9	15,7	14,8	13,9	13,2
	Talcahuano	20,0	16,5	16,5	16,5	15,8	14,4	13,3
	Tomé	15,6	14,3	14,3	14,3	14,1	13,5	13,1
	Hualpén	19,1	17,0	17,0	16,7	15,5	14,2	13,2
Cambios Fuentes Residenciales	Ninguno	165.551	66.144	66.144	64.442	36.926	10.890	0
	GLP	0	0	0	0	0	0	69.437
	Pellet	0	67.992	67.992	68.472	79.813	106.129	94.338
	Leña	0	31.415	31.415	32.637	48.812	48.532	1.776
	Kerosene	0	0	0	0	0	0	0
	Electricidad	0	0	0	0	0	0	0
Cambios Fuentes Industriales	Ninguno	200	200	200	200	199	186	117
	Lavador Venturi	0	0	0	0	1	13	10
	Filtro de Mangas	0	0	0	0	0	1	73
	Precipitador E.	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Al igual que para la meta anterior se puede observar que las fuentes residenciales debieran realizar el recambio tecnológico por sí solas, pues estarían generando ahorros; situación que se da entre el 0% y 60% de exigencia, aproximadamente. Los costos aumentan y se hacen positivos a medida que se alcanza la meta del 80%. Además, se puede apreciar que pese a que la meta exige una reducción porcentual por comuna, lo cual podría aumentar los costos, al momento en que las industrias comienzan a participar se puede ver que los costos aumentan en menor medida que en un SPET (sobre el 60% de exigencia). Lo anterior se explica porque como esta meta exige reducciones sobre las concentraciones y no las emisiones, en una primera instancia son las fuentes residenciales las que participan, pues son más eficientes económicamente e influyen en una mayor medida en los niveles de concentración, ya que generan más emisiones y poseen factores de emisión-concentración mayores a los industriales en la mayoría de los casos. Luego, el ingreso de las fuentes industriales contribuye a obtener menores costos, pues las emisiones de estas influyen en varias comunas, no como en el caso de las emisiones residenciales que

tienen un efecto local. Finalmente, el comportamiento de los hogares e industrias es similar al SPET, implementando primero calefactores a leña y pellet, y a metas más exigentes cambiando a equipos a GLP en el caso de los hogares; y con menos de la mitad de las fuentes industriales implementando tecnologías de abatimiento cuando la meta de reducción es máxima, dando finalmente prioridad al uso de filtro de mangas, dado su mayor capacidad de reducir emisiones.

Por último, el tercer esquema regulatorio consiste en establecer un nivel máximo de concentración de MP_{2,5} para todas las comunas, lo que equivale a implementar un sistema de permisos ambientales (SPA), el cual actúa de forma similar a la norma anual de calidad del aire.

Tabla 5-5 Resultados SPA con todas las opciones de recambio

		Meta de Reducción de Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)						
		Base	22,0	20,0	18,0	16,0	14,0	13,3
Costos (MM\$)		-	-4.386	-4.386	-4.386	-4.149	5.343	20.195
Emisiones (ton/año)		6.596	3.655	3.655	3.655	3.281	1.561	634
Concentraciones por Comuna ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concepción	19,2	16,2	16,2	16,2	16,0	14,0	13,3
	Coronel	20,9	17,4	17,4	17,4	16,0	14,0	13,3
	Chiguayante	16,3	15,0	15,0	15,0	15,0	14,0	13,3
	Lota	18,2	15,9	15,9	15,9	15,9	14,0	13,3
	Penco	16,5	15,1	15,1	15,1	15,1	14,0	13,3
	San Pedro	17,6	15,9	15,9	15,9	15,9	14,0	13,3
	Talcahuano	20,0	16,5	16,5	16,5	16,0	14,0	13,3
	Tomé	15,6	14,3	14,3	14,3	14,3	13,9	13,3
	Hualpén	19,1	17,0	17,0	17,0	16,0	14,0	13,3
	Cambios Fuentes Residenciales	Ninguno	165.551	66.144	66.144	66.144	52.576	21.548
GLP		0	0	0	0	0	0	39.923
Pellet		0	67.992	67.992	67.992	73.031	106.645	107.749
Leña		0	31.415	31.415	31.415	39.944	37.358	15.198
Kerosene		0	0	0	0	0	0	0
Electricidad		0	0	0	0	0	0	0
Cambios Fuentes Industriales		Ninguno	200	200	200	200	200	186
	Lavador Venturi	0	0	0	0	0	13	16
	Filtro de Mangas	0	0	0	0	0	1	56
	Precipitador E.	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

En este esquema regulatorio se aprecia un comportamiento similar a los dos anteriores, al momento de realizar recambios e implementar tecnologías de abatimiento. Además, es posible observar que hasta una meta de reducción de $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ solo las fuentes residenciales deberían estar interesadas en reducir, pues obtienen ahorros con los recambios. Finalmente, establecer

una meta por nivel permite reducir las concentraciones de $MP_{2,5}$ a un menor costo que en el modelo de SPA con meta porcentual, ya que este último es más exigente. Por ejemplo, exigiendo un nivel de concentración meta de $13,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ solo en Coronel y Talcahuano se alcanza la meta de reducción del 96% para un SPA con meta porcentual, mientras que para la comuna de Tomé solo se logra reducir un 89% de las concentraciones reducibles. Por otra parte, en comparación a un SPET, este último puede reducir en mayor medida los niveles de concentración, pues su meta de reducción se basa en un porcentaje del total de emisiones. Sin embargo, estas últimas reducciones, en el caso de un SPET, presentan costos marginales demasiado altos, los que se ven reflejados en el drástico aumento de los costos totales que presenta el SPET para la meta de reducción más exigente.

Es importante destacar que cuando se controlan las concentraciones y no las emisiones, el aporte de las fuentes industriales toma mayor importancia, ya que debido a la mayor dispersión de sus emisiones, estas influyen en los niveles de concentración de varias comunas. Sin embargo, siguen siendo más relevantes las fuentes residenciales, puesto que a nivel local aportan más emisiones y generan un mayor impacto en las concentraciones en comparación a las fuentes industriales, además de incurrir en menores costos al momento de reducir la contaminación.

A continuación, en las siguientes tres tablas se presentan los resultados para los tres esquemas regulatorios bajo el segundo escenario, que considera una restricción de liquidez, la cual consiste básicamente en restringir el acceso a aquellos equipos que poseen un costo de inversión mayor a \$200.000, quedando como opciones de recambio 5 calefactores a kerosene, 3 a GLP, 2 a electricidad y la opción de no hacer nada. Los resultados de los distintos esquemas regulatorios bajo este escenario serán discutidos en conjunto; ya que las diferencias entre regulaciones son las mismas que se presentaron anteriormente, por lo que es más relevante analizar las diferencias entre ambos escenarios de opciones de recambio.

El objetivo de reducir las opciones de recambio es replicar una situación lo más similar a la situación base, pues en el escenario anterior para una meta del 0% una gran cantidad de hogares realizan recambios (Ver tablas 5-3 a 5-5), cosa que no se observa actualmente en el mercado.

Tabla 5-6 Resultados SPET con restricción de liquidez

		Meta de Reducción de Emisiones							
		Base	0%	20%	40%	60%	80%	96%	97%
Costos (MM\$)		-	-1.069	-796	944	5.974	13.039	27.731	31.516
Emisiones (ton/año)		6.596	6.124	5.277	3.958	2.639	1.319	264	198
Concentraciones por Comuna (µg/m3)	Concepción	19,2	18,7	18,0	16,8	15,5	14,2	13,2	13,2
	Coronel	20,9	20,6	19,4	17,6	16,2	14,2	13,2	13,1
	Chiguayante	16,3	16,1	15,6	14,9	14,4	13,5	13,1	13,0
	Lota	18,2	17,8	16,9	16,3	15,4	13,8	13,1	13,0
	Penco	16,5	16,4	15,9	15,2	14,1	13,5	13,1	13,1
	San Pedro	17,6	17,2	16,9	15,9	15,3	14,1	13,2	13,1
	Talcahuano	20,0	19,4	18,5	17,0	15,5	14,5	13,3	13,3
	Tomé	15,6	15,5	15,2	14,8	14,1	13,6	13,1	13,1
	Hualpén	19,1	18,6	18,2	17,0	15,3	14,2	13,2	13,2
Cambios Residenciales	Ninguno	165.551	147.101	115.118	58.228	29.384	13.505	0	0
	GLP	0	18.450	50.433	107.323	136.167	152.046	165.551	165.551
	Pellet	0	0	0	0	0	0	0	0
	Leña	0	0	0	0	0	0	0	0
	Kerosene	0	0	0	0	0	0	0	0
	Electricidad	0	0	0	0	0	0	0	0
Cambios Fuentes Industriales	Ninguno	200	200	200	200	200	193	129	105
	Lavador Venturi	0	0	0	0	0	6	19	0
	Filtro de Mangas	0	0	0	0	0	1	52	95
	Precipitador E.	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-7 Resultados SPA con porcentaje con restricción de liquidez

		Meta de Reducción Porcentual de Concentraciones						
		Base	0%	20%	40%	60%	80%	96%
Costos (MM\$)		-	-1.069	-769	1.114	6.122	11.918	27.474
Emisiones (ton/año)		6.596	6.124	5.258	3.919	2.759	1.662	490
Concentraciones por Comuna (µg/m3)	Concepción	19,2	18,7	18,0	16,7	15,5	14,2	13,3
	Coronel	20,9	20,6	19,3	17,7	16,2	14,6	13,3
	Chiguayante	16,3	16,1	15,7	15,0	14,3	13,7	13,1
	Lota	18,2	17,8	17,1	16,1	15,1	14,0	13,2
	Penco	16,5	16,4	15,8	15,1	14,4	13,7	13,1
	San Pedro	17,6	17,2	16,6	15,7	14,8	13,9	13,2
	Talcahuano	20,0	19,4	18,6	17,2	15,8	14,4	13,3
	Tomé	15,6	15,5	15,1	14,6	14,1	13,5	13,1
	Hualpén	19,1	18,6	17,9	16,7	15,5	14,2	13,2
Cambios Residenciales	Ninguno	165.551	147.101	112.492	57.537	35.622	16.249	2.899
	GLP	0	18.450	53.059	108.014	129.929	149.302	162.652
	Pellet	0	0	0	0	0	0	0
	Leña	0	0	0	0	0	0	0
	Kerosene	0	0	0	0	0	0	0
	Electricidad	0	0	0	0	0	0	0
Cambios Fuentes Industriales	Ninguno	200	200	200	200	199	190	119
	Lavador Venturi	0	0	0	0	1	9	6
	Filtro de Mangas	0	0	0	0	0	1	75
	Precipitador E.	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-8 Resultados SPA con restricción de liquidez

		Meta de Reducción de Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)						
		Base	22,0	20,0	18,0	16,0	14,0	13,3
Costos (MM\$)		-	-1.069	-1.046	-696	2.826	13.167	25.785
Emisiones (ton/año)		6.596	6.124	6.053	5.407	3.845	1.596	616
Concentraciones por Comuna ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concepción	19,2	18,7	18,7	18,0	16,0	14,0	13,3
	Coronel	20,9	20,6	20,0	18,0	16,0	14,0	13,3
	Chiguayante	16,3	16,1	16,1	16,1	16,0	14,0	13,3
	Lota	18,2	17,8	17,8	17,8	16,0	14,0	13,3
	Penco	16,5	16,4	16,4	16,4	16,0	14,0	13,3
	San Pedro	17,6	17,2	17,2	17,2	16,0	14,0	13,3
	Talcahuano	20,0	19,4	19,4	18,0	16,0	14,0	13,3
	Tomé	15,6	15,5	15,5	15,5	15,5	14,0	13,3
	Hualpén	19,1	18,6	18,6	18,0	16,0	14,0	13,3
Cambios Residenciales	Ninguno	165.551	147.101	145.029	117.476	65.744	24.813	10.684
	GLP	0	18.450	20.522	48.075	99.807	140.738	154.867
	Pellet	0	0	0	0	0	0	0
	Leña	0	0	0	0	0	0	0
	Kerosene	0	0	0	0	0	0	0
	Electricidad	0	0	0	0	0	0	0
Cambios Fuentes Industriales	Ninguno	200	200	200	200	200	189	129
	Lavador Venturi	0	0	0	0	0	11	12
	Filtro de Mangas	0	0	0	0	0	0	59
	Precipitador E.	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Podemos observar que los principales cambios en los costos, emisiones y concentraciones son atribuibles a las fuentes residenciales. Los hogares están eligiendo solo entre dos opciones, no realizar ningún recambio o cambiarse a un equipo a gas licuado de petróleo (GLP). Lo cual reduce los ahorros y aumenta los costos para las fuentes residenciales, incentivando a las industrias a ser un poco más participativas en la reducción. Además, el uso de equipos a GLP provee mejoras en el nivel de contaminación ambiental, pues su combustión genera menos emisiones que los calefactores a pellet y leña; sin embargo, eliminar estas opciones de calefacción más costo-efectivas aumenta los costos de reducir la contaminación residencial.

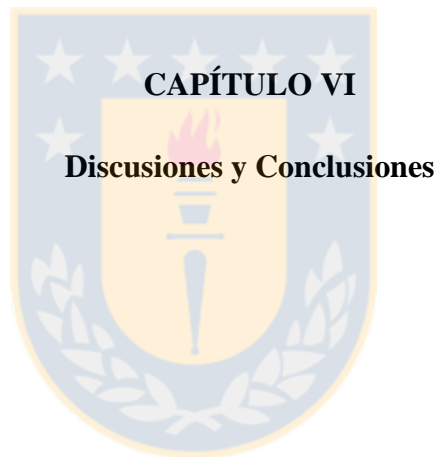
Por otra parte, resulta importante mencionar que a medida que aumentan las exigencias en ambos escenarios de disponibilidad de equipos los resultados comienzan a converger, puesto que en el primer escenario las fuentes residenciales terminan utilizando equipos a GLP cuando las metas de reducción son más exigentes, mientras en el segundo escenario, esta opción ocurre incluso sin exigencia para algunos hogares. Ya que, se puede observar que en una primera

instancia en el segundo escenario los hogares deberían tomar la determinación por si solos de cambiarse a equipos a GLP, puesto que generan ahorros en costos. Aunque, con realizar estos recambios no se logra alcanzar niveles de concentración ambientales de $MP_{2,5}$ bajo la norma anual de calidad del aire ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para todas las comunas (no se cumple en Coronel), lo cual si ocurre para los tres esquemas regulatorios bajo el primer escenario.

Por otro lado, resulta importante mencionar que para cualquier meta y escenario, las fuentes industriales participan de la reducción de la contaminación solo cuando las exigencias regulatorias son más altas, puesto que los hogares son económicamente más eficientes en reducir la contaminación (emisiones y concentraciones).

Además, hay que recordar que la selección de tecnologías de abatimiento y equipos de recambio se basa en el criterio de costo-efectividad, lo cual explicaría que al enfrentar metas de reducción más exigentes, los hogares cambien su elección de equipos a pellet y leña por equipos a gas licuado de petróleo, mientras que las industrias comienzan a preferir la implementación de filtros de mangas en vez de lavadores Venturi, pues para alcanzar metas de regulación más exigentes se debe recurrir a medidas de reducción menos costo-efectivas. En cuanto a los hogares, se determina que mientras menor es la eficiencia del equipo antiguo mayor es la reducción de costos; y en cuanto al consumo de leña, se determinó que un menor consumo favorece la utilización de equipos a pellet, un mayor consumo favorece el uso de equipos a leña más eficientes; y que al hacer las metas de reducción más exigentes aquellos hogares con equipos antiguos menos eficientes y consumos más bajos serían los primeros en cambiarse a equipos a GLP.

Finalmente, es importante destacar que si la intención de los organismos encargados de llevar acabo las políticas ambientales es lograr que se alcance un determinado nivel de calidad ambiental, tal como ocurre con la norma primaria anual de $MP_{2,5}$, el esquema regulatorio más conveniente, desde un punto de vista costo-efectivo, es el sistema de permisos ambientales, pues los costos de cumplimiento al momento de mantener las concentraciones de $MP_{2,5}$ bajo un nivel determinado son más bajos que en los otros dos esquemas; sin embargo, la reducción de la contaminación es menor que en los otros esquemas.



6 DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

Con el fin de evaluar el efecto que tiene la inclusión de hogares en los mecanismos de reducción de la contaminación por material particulado fino en el Concepción Metropolitano, se desarrolla un modelo de optimización con el cual se simulan tres esquemas regulatorios, un sistema de permisos de emisiones transables que busca reducir el porcentaje de emisiones total, un sistema de permisos ambientales que fija un nivel meta de concentración para todas las comunas, y un sistema de permisos ambientales que contrala el porcentaje de la reducción de las concentraciones de $MP_{2,5}$.

En las simulaciones se consideraron dos escenarios de disponibilidad de opciones de recambio de calefactores para reducir la contaminación residencial. La primera, considera el recambio de los equipos de calefacción en base a leña utilizados por las fuentes residenciales por otros que utilicen otro combustible como kerosene, gas licuado de petróleo (GLP), electricidad, pellet, o bien, artefactos a leña que presenten una mayor eficiencia. La segunda excluye las opciones de equipos de calefacción más costosos asumiendo una restricción de liquidez para los hogares con el objetivo de igualar más la situación base.

Para todas las metas de reducción, esquemas regulatorios y escenarios evaluados, se pudo observar que la incorporación de las fuentes residenciales contribuye positiva y significativamente a reducir los costos de cumplimiento, generando ahorros y disminuciones en los costos de reducir la contaminación. Es más, aún en el escenario más restrictivo, el cual considera menos opciones de recambio, si los hogares se cambiaran por si solos a equipos a GLP, aprovechando los ahorros en costos, se lograría cumplir con la norma anual de $MP_{2,5}$ ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en casi todas las comunas del Concepción Metropolitano, menos en Coronel que excedería la norma por tan solo $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otra parte, se hace evidente la mayor costo-efectividad que presentan los hogares al momento de reducir las emisiones, puesto que son las fuentes residenciales las primeras en tomar medidas para reducir la contaminación, siendo necesaria la participación de las industrias solo cuando las metas se tornan demasiado exigentes.

Bajo el contexto del primer escenario, las fuentes residenciales tendieron a preferir los equipos a leña y a pellet, para luego responder a mayores exigencias regulatorias prefiriendo los equipos a GLP. Mientras que las industrias, tal cual ocurre en todos los escenarios y esquemas regulatorios, su participación comienza solo cuando las metas de reducción son altas, la cual va aumentando junto con las mayores exigencias a través de la implementación de filtros de mangas

principalmente. En cuanto al segundo escenario, el comportamiento de las industrias se mantiene y los hogares al ver reducidas sus opciones prefieren equipos a GLP. Cuando las exigencias son más altas los hogares realizan el recambio por equipos a GLP y las industrias prefieren la implementación de filtros de mangas.

En cuanto a los esquemas regulatorios, cabe mencionar que el SPET permite alcanzar los mejores niveles de calidad ambiental, sin embargo, en este punto la exigencia es tan alta que los costos se incrementan significativamente. Luego lo sigue el SPA por porcentaje, el cual logra alcanzar niveles de calidad ambiental más bajos que un SPET incurriendo de igual forma en costos más bajos, esto se debe principalmente a que el SPA por porcentaje al exigir la misma meta porcentual para todas las comunas, no logra generar tanta de reducción como el SPET, ya que al momento de que una comuna no puede seguir reduciendo el resto también lo deja de hacer. Y finalmente, un SPA con meta de concentración, alcanza menores niveles de calidad ambiental a menores costos, ya que al exigir el mismo nivel de concentración meta para todas las comunas no se logra generar tanta de reducción, puesto que cuando en una comuna no puede seguir reduciendo el resto de las comunas deja de hacerlo.

En comparación con uno de los estudios más recientes sobre regulaciones de $MP_{2,5}$ en el Concepción Metropolitano (Mardones y Jiménez, 2015), pareciera ser que la disponibilidad de gas natural puede proporcionar mayores reducciones en los costos que la inclusión de fuentes residenciales en los programas de regulación ambiental, sin embargo habría que considerar una disponibilidad de gas natural mayor al 50%. Pudiéndose observar que los ahorros proporcionados por utilizar gas natural se mantienen a medida que aumentan las exigencias, cosa que no ocurre con la incorporación de fuentes residenciales, pues los ahorros que se lograban en una primera instancia se pierden a medida que aumentan las exigencias regulatorias.

Finalmente, podemos concluir que la hipótesis planteada en este estudio no se sustenta, pues la inclusión de los hogares en las regulaciones ambientales genera ahorros resultando conveniente incluir a los hogares en los programas regulatorios para el control de la contaminación, ya sea exigiéndoles directamente que reduzcan la contaminación, a través de programas públicos de recambio; o bien como compensación de fuentes industriales. Puesto que estos incurren en menores costos que las fuentes industriales.

REFERENCIAS

- Alegría, M., Mardones, C., & Jimenez, J. (2013). Reduction of PM10 Emissions Under Scenarios of Regulation and Availability of Natural Gas in the Bio Bio Region, Chile. *Energy & Environment*, 24(6), 1031-1042.
- CASEN. (2013). *Encuesta de Caracterización Socioeconómica*. Ministerio de Desarrollo Social.
- Celis, J., Morales, R., Zaror, C., Inzunza, J., Flocchini, R., & Carvacho, O. (2003). Chemical Characterization of the Inhalable Particulate Matter in City of Chillan, Chile. *Journal of the Chilean Chemical Society*, Vol. 48, N°2.
- Centro Mario Molina. (2008). *Optimización y análisis de las responsabilidades en las emisiones atmosféricas del área de Concepción Metropolitano para efectos de la revisión del PPACM*. elaborado por Centro Mario Molina para Conama Biobío.
- Chávez, C., & Ponce, R. (2005). Costos de Cumplimiento de un Sistema de Permisos de Emisión: Aplicación a Fuentes Fijas en Talcahuano, Chile. *El Trimestre Económico*, 847-876.
- Cooper, C., & Alley, F. (2002). Air pollution control: a design approach. *Waveland Press*.
- Coria, J., & Sterner, T. (2008). Tradable Permits in Developing Countries: Evidence from Air Pollution in Santiago, Chile. *Resources for the Future*, 08-51.
- Curtis, L., Rea, W., Smith-Willis, P., Fenyves, E., & Pan, Y. (2006). Adverse health effects of outdoor air pollutants. *Environment International*, Vol 32, 815-830.
- Deutsch, F., Vankerkom, J., Janssen, L., Janssen, S., Bencs, L., Van Grieken, R., & Mensink, C. (2008). Modelling concentrations of airborne primary and secondary PM 10 and PM 2.5 with BeIUEUROS-model in Belgium. *Ecological Modelling*, Vol. 217, Pages 230-239.
- DICTUC. (2007). *Diagnóstico y Plan de Gestión de Calidad del Aire VI Región*.
- Dongarra, G., Manno, E., Varrica, D., Lombardo, M., & Vultaggio, M. (2010). Study on ambient concentrations of PM 10, PM 10-2.5, PM 2.5 and gaseous pollutants. Trace elements and chemical speciation of atmospheric particulates. *Atmospheric Environment*, Vol. 44, Pages 5244-5257.
- EULA. (2014). *Analysis of the Economic Impact and Environmental stable supply of LNG to the Biobio region*. Final Report.
- Hartman, R., Wheeler, D., & Singh, M. (2010). The cost of air pollution abatement. *Applied Economics*, 759-774.
- He, K., Yang, F., Ma, Y., Zhang, Q., Yao, X., Chan, C. K., & Mulawa, P. (2001). The characteristics of PM 2.5 in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, Vol. 35, Pages 4959-4970.
- Hellebust, S., Allanic, A., O'Connor, I., Jourdan, C., Healy, D., & Sodeau, J. (2010). Sources of ambient concentrations and chemical composition of PM 2.5-0.1 in Cork Harbour, Ireland. *Atmospheric Research*, Vol. 95, Pages 136-149.
- Holmes, N. S., & Morawska, L. (2006). A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. *Atmospheric Environment*, Vol. 40, Pages 5902-5928.

- IIT-UDEC. (2012). *Elaboración Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) del plan de Prevención Atmosférica de Concepción Metropolitano*. Para Ministerio del Medioambiente Región del Bío Bío.
- IIT-UDEC. (2013). *Estudio de Propuesta de Medidas de Prevención y Reducción de Emisiones de MP2,5 y MP10 para la Zona Latente y Saturada de las Comunas de Chillán y Chillán Viejo*. INFORME FINAL.
- Jorquera, H. (2002). Air quality at Santiago, Chile: a box modeling approach-I. Carbon monoxide, nitrogen oxides and sulfur dioxide. *Atmospheric Environment*, Vol. 36, Pages 315-330.
- Kandlikar, M., Marshall, J., & Grieshop, A. (2011). Health and climate benefits of cookstove replacement options. *Energy Policy*, 7530-7542.
- Kauhaniemi, M., Karppinen, A., Härkönen, J., Kousa, A., Alaviippola, B., Koskentalo, T., & Kukkonen, J. (2008). Evaluation of a modelling system for predicting the concentrations of PM 2.5 in an urban area. *Atmospheric Environment*, Vol. 42, Pages 4517-4529.
- Kim, H. J. (2000). The Cost-effectiveness of Alternative Emission Control Policies in The San Joaquin Valley of California. *Reporte preparado para Office of Environmental Economics US EPA*.
- Lu, F., Xu, D., Cheng, Y., Dong, S., Guo, C., Jiang, X., & Zheng, X. (2015). Systematic review and meta analysis of adverse health effects of ambient PM2,5 and PM10 pollution in the Chinese population. *Environmental Research*, Vol. 136, Pages 196-204.
- Mardones, C., & Jiménez, J. (2015). Alternatives for reducing ambient PM2,5 concentrations from industrial emissions in Concepción Metropolitan Area, Chile. *Energy & Environment*, Vol. 26, Nº3, Pages 445-456.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2011). *Anteproyecto del Plan de Prevención Atmosférico para las comunas del Concepción Metropolitano*.
- Montero, J. (2003). *Tradeable Permits with Imperfect Monitoring: Theory and Evidence, Working Paper*. MIT Center for Energy and Environmental Policy.
- Montero, J. P., Sanchez, J. M., & Katz, R. (2002). A Market-Based Environmental Policy Experiment in Chile. *Journal of Law and Economics*, Vol. 45.
- O'Ryan, R. E. (1996). Cost-Effective Policies to Improve Urban Air Quality in Santiago, Chile. *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 31, Pages 302-313.
- O'Ryan, R., & Sánchez, J. M. (2007). Comparison of Net Benefits of Incentive-Based and Command and Control Environmental Regulation: The Case of Santiago, Chile. *The World Bank Economic Review*, Vol. 22, Nº2, pp. 249-269.
- Palmer, C., Bergauff, M., Ward, T., & Noonan, C. (2009). The effect of a woodstove changeout on ambient levels of PM2.5 and chemical tracers for woodsmoke in Libby, Montana. *Atmospheric Environment*, 2938-2943.
- Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol. 56, Pages 709-742.
- Pope, C. A., Ezzati, M., & Dockery, D. W. (2009). Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States. *The New England Journal of Medicine*, 360: 376-386.

- San Martin, R. (2003). Marketable emission permits with imperfect monitoring. *Energy Policy*, 1369-1378.
- Sánchez, J., Calfucura, E., & Coria, J. (2008). *Permisos Transables de Emisión en Chile: Lecciones, Desafíos y Oportunidades para Países en Desarrollo*. Instituto de Economía, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Sanhueza, L., Mardones, C., & Jiménez, J. (2015). Efectos de la incorporación de fuentes residenciales en mecanismos de compensación de emisiones Industriales de MP10 en Concepción Metropolitana. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, Vol. 31, N°3.
- Schreifels, J. (2008). *Emissions Trading in Santiago, Chile: A Review of Emission Offset Program of Supreme Decree No 4, Documento de Trabajo*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Song, Y., Zhang, Y., & Dai, W. (2011). PM_{2,5} Sources and Their Effects on Human Health in China: Case Report. *Encyclopedia of Environmental Health*, Pages 606-613.
- Stavins, R. N. (2003). Market-Based Environmental Policies: What Can We Learn from U.S. Experience (and Related Research)? *National Bureau of Economic Research (NBER)*, Resources for the Future.
- UDT, Universidad de Concepción. (2005). *Análisis del Mercado de la Leña y Carbón en el Gran Concepción, Etapa I*. Informe Final para CONAMA, Región del Biobío.
- UDT-Proterm. (2011). *Evaluación de medidas para Reducir la Contaminación Atmosférica en Complejos Industriales y Grandes Fuentes del Gran Concepción*. Informe Final desarrollado para CONAMA, Biobío.
- Universidad Católica de Temuco. (2009). *Actualización del Inventario de Emisiones Atmosféricas para Concepción Metropolitana*. Universidad Católica de Temuco, Escuela de Ingeniería Ambiental, Unidad de Calidad del Aire.
- US EPA. (2009). *AP 42, Fifth Edition Compilation or Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources*.
- Villegas, C. I., & Chávez, C. (2004). Costos de Cumplimiento y Poder de Mercado: Aplicación al Programa de Compensación de Emisiones. *Cuadernos de economía*, Vol. 41, N°122.

ANEXOS

Anexo 1: Método de Estimación FEC Residenciales

Con la información disponible sobre emisiones y concentraciones de MP_{10} atribuible a las fuentes residenciales (IIT-UDEC, 2012) se deben establecer las emisiones y concentraciones de $MP_{2,5}$. Para esto hay que calcular las tasas correspondientes entre ambos contaminantes.

Para las concentraciones monitoreadas se establece una tasa entre las concentración de MP_{10} y $MP_{2,5}$, sin tomar en cuenta las concentraciones atribuidas al background²⁴. Esto se hace de la siguiente forma.

$$Tasa_{MP_{10}}^{MP_{2,5}} = \frac{\text{Concentración } MP_{2,5} - \text{background}_{MP_{2,5}}}{\text{Concentración } MP_{10} - \text{background}_{MP_{10}}}$$

Posteriormente, para las emisiones estimadas en los inventarios de emisiones residenciales se establece una tasa entre los factores de emisión de MP_{10} y $MP_{2,5}$, considerados para los artefactos de calefacción (DICTUC, 2007), la cual se calcula como sigue.

$$TasaFE_{MP_{10}}^{MP_{2,5}} = \frac{\text{Factor de emisión } MP_{2,5}}{\text{Factor de emisión } MP_{10}}$$

Ahora con estas tasas es posible calcular las emisiones y concentraciones de $MP_{2,5}$ como se muestra a continuación.

$$\text{Emisiones } MP_{2,5} = TasaFE_{MP_{10}}^{MP_{2,5}} * \text{Emisiones } MP_{10}$$

$$\text{Concentraciones } MP_{2,5} = Tasa_{MP_{10}}^{MP_{2,5}} * \text{Concentraciones } MP_{10}$$

Finalmente, con la información de emisiones y concentraciones de $MP_{2,5}$ es posible calcular los factores de emisión concentración de $MP_{2,5}$ para los hogares.

$$FEC_{MP_{2,5}} = \frac{\text{Concentraciones de } MP_{2,5}}{\text{Emisiones de } MP_{2,5}}$$

²⁴ Las concentraciones fueron obtenidas del SINCA, específicamente de las estaciones Punteras (Chiguayante) y Cerro Merquín (Coronel); <http://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/index/id/VIII>, revisado el 1 de Marzo del 2015. Mientras que para los datos de background se utilizó la información disponible para la ciudad de Chillán (IIT-UDEC, 2013).