

EFECTO DIRECTO E INDIRECTO DE LA DISPERSION DE LAS EMISIONES INDUSTRIALES SOBRE LA REGULACION AMBIENTAL

DIRECT AND INDIRECT EFFECT OF THE DISPERSION OF INDUSTRIAL EMISSIONS ON ENVIRONMENTAL REGULATION

GABRIEL RIOSECO VALLEJOS*

Universidad de Concepción

CRISTIAN MARDONES POBLETE**

Universidad de Concepción

JORGE JIMENEZ DEL RIO***

Universidad de Concepción

Abstract

The Concepción Metropolitan Area in Southern Chile has been showing high ambient concentrations of fine particulate matter due to its significant industrial activity. Therefore, this study analyzes various regulatory scenarios in order to help reduce the atmospheric emissions from the industrial activities. Unlike the standard methodology, the source location and the atmospheric conditions were included in the analysis to establish the contribution of these sources to the ambient levels of $PM_{2.5}$ observed in the populated Concepción Metropolitan Area. The results show that if only the direct impact of emissions is considered, the potential reduction in $PM_{2.5}$ concentration is underestimated and the total reduction costs are overestimated. We conclude that if the indirect impacts of the industrial

* Programa de Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción. Dirección: Edmundo Larenas 215, Concepción, Chile. E-mail: grioseco@udec.cl

** Profesor Asistente. Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción. Dirección: Edmundo Larenas 215, Concepción, Chile. E-mail: crismardones@udec.cl. Tel.: 56-41-2203614 (autor de correspondencia).

*** Profesor Asistente. Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción. Dirección: Edmundo Larenas 215, Concepción, Chile. E-mail: jorgejimenez@udec.cl

emissions are not considered in the analysis, there will be an excessive or insufficient regulation on the industrial activities in the air pollution strategies implemented in the Air Pollution management plans of Chile.

Keywords: *Pollution, concentrations, $PM_{2.5}$.*

JEL Classification: *Q50, Q52, Q53.*

Resumen

Concepción Metropolitano en Chile presenta altas concentraciones de material particulado fino, atribuible en parte a su importante actividad industrial. Por lo anterior, se analizan diversos escenarios regulatorios que ayudarían a reducir la contaminación generada por las industrias. A diferencia de la metodología estándar, se estudia cómo la localización de las fuentes emisoras y condiciones de dispersión del contaminante en el aire generan un impacto indirecto relevante sobre las concentraciones de otras comunas aledañas. Los resultados arrojan que cuando se considera solo el impacto directo de las emisiones, se subrepresenta el potencial de reducción en las concentraciones de material particulado fino y se sobreestiman los costos totales de reducción. Así, es posible concluir que existiría exceso o falta de regulación sobre las industrias si no se incorporan en los análisis los impactos indirectos de las emisiones en las medidas evaluadas en los planes de descontaminación aplicados en Chile.

Palabras clave: *Contaminación, concentraciones, $MP_{2.5}$.*

Clasificación JEL: *Q50, Q52, Q53.*

1. INTRODUCCION

Concepción Metropolitano es un área geográfica localizada en la zona centro sur de Chile. Su actividad económica se centra en una fuerte presencia de industrias que se encuentran distribuidas en nueve de las diez comunas que constituyen esta conurbación: Concepción, Coronel, Chiguayante, Hualpén, Lota, Penco, San Pedro de la Paz, Talcahuano y Tomé. La comuna de Hualqui se caracteriza por ser principalmente rural.

Un problema que surge en torno a la actividad industrial está asociado a los contaminantes que se liberan por la quema de combustibles, principalmente material particulado respirable (MP_{10}) y material particulado fino ($MP_{2.5}$). La participación de las emisiones de $MP_{2.5}$ generado por las fuentes industriales de Concepción Metropolitano es de un 22%, el resto del aporte proviene principalmente de la combustión residencial a leña y en menor medida del tránsito vehicular (IIT, 2012).

La principal forma de reducir el $MP_{2,5}$ en las fuentes industriales es mediante la implementación de tecnologías de fin de tubo. Esto se logra con dispositivos que capturan las partículas antes de ser emitidas a la atmósfera, reduciendo considerablemente las emisiones. Para relacionar la reducción de las emisiones en las fuentes industriales con la disminución de las concentraciones en cierta localización o comuna, se utilizan Factores de Emisión-Concentración (FEC). Estos se determinan usando modelos de dispersión y transporte de sustancias en el aire, los que están basados principalmente en ecuaciones matemáticas que simulan el comportamiento de una sustancia en la atmósfera, al incorporar dinámicas de transporte de aerosoles, geografía del lugar, relieves, así como también el patrón de comportamiento de los vientos y los procesos físicos y químicos en el ambiente. Con estos datos de entrada, se determinan los FEC que permiten relacionar las emisiones de $MP_{2,5}$ con los niveles de concentración que se generan en los receptores de interés.

Sin embargo, la gran mayoría de los estudios realizados hasta ahora en Chile para apoyar los planes de descontaminación han evaluado solo el impacto directo de la contaminación, es decir, que las emisiones de las fuentes afectan o aportan con niveles de concentraciones solo en la zona o comuna donde esta se localiza, sin considerar que pueden tener un impacto indirecto de contaminación en otras comunas. De hecho la metodología que propone usar el Ministerio del Medio Ambiente para la elaboración de Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) en la evaluación de normas y planes ambientales, establece que el cálculo de los FEC se realice considerando que las emisiones de las fuentes generen concentración solo en su propia comuna, sin considerar que puede afectar a otras. Resulta relevante el análisis de levantar este supuesto si se tiene en cuenta que las partículas de $MP_{2,5}$ son muy pequeñas y pueden transportarse cientos de kilómetros antes de ser removidas del aire, por lo que las emisiones pueden afectar muchas zonas o comunas que pudiesen estar muy alejadas de la fuente emisora.

En el caso de la literatura científica que evalúa instrumentos regulatorios en Chile, algunos estudios solo analizan la reducción de emisiones, pero no cómo estas se dispersan en el ambiente (San Martín, 2003; Ponce y Chávez, 2005; Villena *et al.*, 2009; Alegría *et al.*, 2013; Mardones *et al.* 2015), mientras otros trabajos abordan la dispersión de contaminantes en concentraciones como O’Ryan (1996), O’Ryan y Bravo (2001), O’Ryan y Sánchez (2007), y Mardones y Jiménez (2015). La diferencia de este estudio con los previamente mencionados es que la presente investigación evalúa cómo el impacto directo e indirecto de la dispersión de contaminantes afecta las políticas regulatorias, en términos de costos y la estimación del potencial de reducción de las fuentes industriales.

En particular este estudio compara los impactos ambientales y económicos considerando el escenario regulatorio, en el cual se asume que las emisiones de fuentes generan y reducen concentraciones solo en su propia comuna (impacto directo), así como también el escenario en el cual pueden generar y reducir concentraciones en todas las comunas (impacto directo e indirecto). La magnitud de la diferencia estará dada por los FEC que permite relacionar las emisiones de $MP_{2,5}$ en una determinada comuna, con las concentraciones de este contaminante que se generan en el resto de las

comunas. Dichos FEC fueron determinados en un estudio previo (EULA, 2014) para la zona de estudio usando el modelo de dispersión de contaminantes CALPUFF¹. Así, es posible generar diferentes escenarios de exigencias de reducción de concentraciones por comuna para obtener los costos totales de abatimiento y determinar qué política debería implementar la autoridad medioambiental para alcanzar las exigencias de reducción al menor costo posible y proteger la salud de la población.

2. DESCRIPCION DE LA SITUACION ACTUAL

La principal fuente de información de este estudio es el Inventario de Emisiones del Concepción Metropolitano, elaborado por EULA (2014), el que contiene información de 200 fuentes industriales emisoras distribuidas en nueve comunas, identificando el nombre, la ubicación, el tipo de combustible y el nivel de emisiones de MP_{10} y $MP_{2,5}$ de cada una de ellas.

Dentro de las nueve comunas que se consideraron en este estudio, algunas de ellas se caracterizan por tener zonas industriales, concentrando una gran cantidad de fuentes emisoras, mientras otras comunas son más bien residenciales. Es por esto que existe bastante diferencia en el total de emisiones de $MP_{2,5}$ entre una comuna y otra. Como se observa en el Gráfico 1, en las comunas de Coronel y Talcahuano se concentran las mayores emisiones de $MP_{2,5}$ por el mayor número de fuentes industriales, en contraposición a comunas más residenciales, como Concepción, Chiguayante o San Pedro de la Paz.

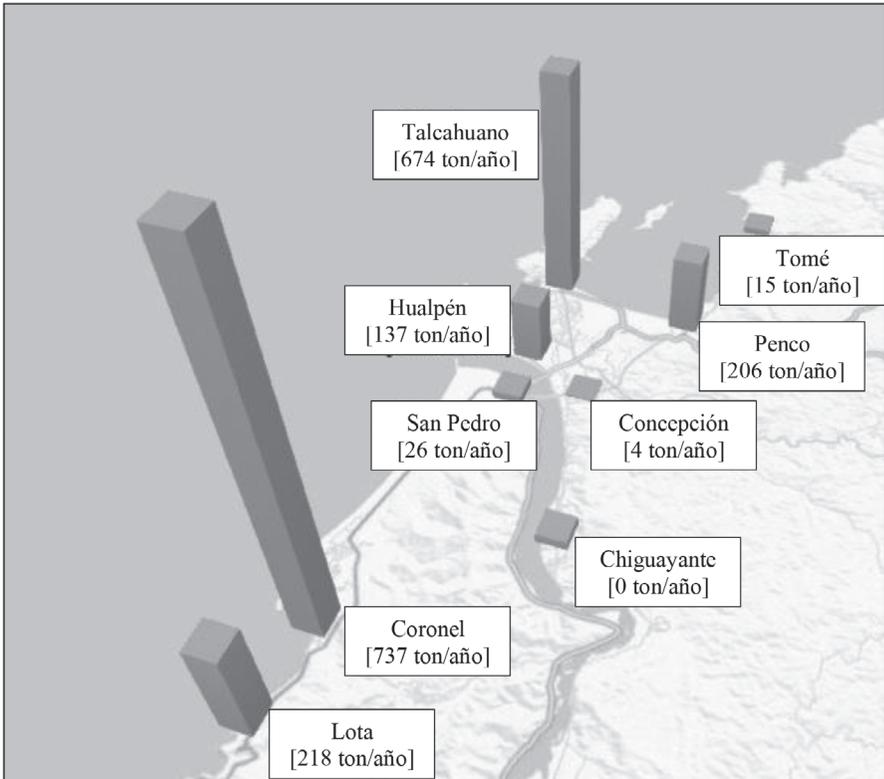
Específicamente, Talcahuano y Coronel aportan 33,4% y 36,6%, sobre el nivel de emisiones totales en Concepción Metropolitano, mientras que otras comunas como Concepción y Chiguayante aportan 0,2% y 0,000001%.

Debido a las altas concentraciones registradas en los últimos años en esta y otras zonas de Chile, en el año 2012 comenzó a regir una normativa ambiental para material particulado fino que establece un límite máximo para las concentraciones ambientales de $MP_{2,5}$ ². Esta norma primaria de calidad del aire establece que las concentraciones promedio anual no pueden superar los 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante tres años consecutivos en cualquier estación de monitoreo con representatividad poblacional, rige para todo el territorio nacional y tiene por objetivo proteger a las personas de los efectos agudos y crónicos del contaminante.

¹ Es un modelo de dispersión atmosférico desarrollado por Sigma Research Corporation (parte de Earth Tech, Inc.) con la finalidad de elaborar un sistema de modelación de calidad de aire para uso regulatorio. Este *software* incluye un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos, un modelo de meteorología, además de módulos fotoquímicos.

² <http://www.mma.gob.cl/transparencia/mma/doc/D12.pdf>

GRAFICO 1

EMISIONES DE $MP_{2,5}$ EN LAS COMUNAS DE CONCEPCION METROPOLITANO

Fuente: Elaboración propia.

3. METODOLOGIA

3.1. Tecnologías de abatimiento

En este estudio se considera como tecnologías de abatimiento apropiadas técnicamente para reducir emisiones de $MP_{2,5}$ el uso de filtro de manga, precipitador electrostático o *scrubber* del tipo lavador Venturi.

3.2. Costos y eficiencias de las tecnologías de abatimiento

Se consideran las funciones de costos para cada tecnología usadas por Ponce y Chávez (2005), las que se fundamentan en una estimación econométrica de la relación

positiva que existe entre el caudal (g/hr) de cada fuente respecto del costo anualizado de la fuente f para cada tecnología de fin de tubo que pueda abatir ese caudal. Sin embargo, como las funciones anteriores representan el costo total anualizado para caudales de MP_{10} fueron ajustadas y actualizadas por Mardones y Jiménez (2015), quienes incluyen factores que relacionan caudales y emisiones de MP_{10} y $MP_{2,5}$ para cada fuente ($t_{MP_{2,5}f}^{MP_{10}}$). Así, en la Tabla 1 cada función finalmente representa el costo anualizado debido a la cantidad inicial de emisiones de $MP_{2,5}$ (ton/año) de una fuente particular.

TABLA 1

FUNCIONES DE COSTOS EN PESOS CHILENOS DE LAS TECNOLOGIAS DE ABATIMIENTO

Tecnología	Costo Total Anualizado (\$ 2015/año)
Precipitador electrostático	$CT_f = 189110 * (4.213,7 * E_{MP_{2,5}} * t_{MP_{2,5}}^{MP_{10}})^{0,628} + 1062,2 * (4.213,7 * E_{MP_{2,5}} * t_{MP_{2,5}}^{MP_{10}}) + 14924140$
Lavador Venturi	$CT_f = 78111 * (4.213,7 * E_{MP_{2,5}} * t_{MP_{2,5}}^{MP_{10}})^{0,56} + 903,5 * (4.213,7 * E_{MP_{2,5}} * t_{MP_{2,5}}^{MP_{10}}) + 26816018$
Filtro mangas	$CT_f = 2526 * (4.213,7 * E_{MP_{2,5}} * t_{MP_{2,5}}^{MP_{10}})^{0,914} + 1033,1 * (4.213,7 * E_{MP_{2,5}} * t_{MP_{2,5}}^{MP_{10}}) + 21736544$

Fuente: Actualización de Mardones y Jiménez (2015), basado en Ponce y Chávez (2005).

Al aplicar alguna de estas opciones, las emisiones de material particulado fino se reducen considerablemente, según el tipo de tecnología instalada y el combustible que usa la fuente industrial. Las eficiencias de abatimiento presentadas en la Tabla 2 se basan en los resultados de la ingeniería de diseño descritos por Cooper y Alley (2002) para sistemas de control de la contaminación.

TABLA 2

EFICIENCIAS DE LAS TECNOLOGIAS DE ABATIMIENTO PARA $MP_{2,5}$

Combustible	Precipitador electrostático	Filtro de mangas	Lavador Venturi
Carbón	0,90	0,96	0,92
Leña	0,90	0,99	0,92
Petróleo N° 2	0,95	0,99	0,89
Petróleo N° 5	0,95	0,99	0,89
Petróleo N° 6	0,95	0,99	0,89

Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos de Cooper y Alley (2002).

3.3. Estimación de factores de emisión-concentración (FEC)

Para conocer la relación que existe entre las emisiones de $MP_{2,5}$ y las concentraciones ambientales que estas generan, se utilizan los FEC. Este indicador permite estimar cambios en la concentración ambiental en función de cambios en las emisiones de $MP_{2,5}$ estableciendo una relación lineal entre las emisiones de un contaminante y el aporte a la concentración ambiental mediante la siguiente aproximación:

$$FEC_{i,j} = \frac{C_j}{E_i} \quad (1)$$

donde

$FEC_{i,j}$ = Factor de emisión concentración de la fuente i sobre el receptor j .
 C_j = Concentración ambiental de $MP_{2,5}$ en el receptor j .
 E_i = Emisión de $MP_{2,5}$ de la fuente i .

Para incluir los FEC se utilizan los valores obtenidos por EULA (2014), que los determina a partir de los registros de vientos, temperatura, humedad relativa, presión y pluviometría de las estaciones meteorológicas ubicadas en Concepción, Talcahuano y Coronel. También incluye la meteorología de altura utilizando una combinación de perfiles verticales de la atmósfera registrados dos veces al día en la estación de sondeo ubicada en Santo Domingo y las predicciones del modelo meteorológico MM5 (Modelo de Mesoescala de Quinta generación). Además, el modelo considera los datos de la calidad de aire para $MP_{2,5}$ de las estaciones de monitoreo existentes para las comunas de Concepción Metropolitano.

3.4. Modelación de las políticas regulatorias

La regulación ambiental a la cual están sometidas las fuentes industriales se puede representar con un modelo de optimización que busca minimizar los costos de implementar un sistema de permisos transable de concentraciones (también llamado sistema de permisos ambientales o APS), considerando un escenario donde las emisiones de las fuentes afecten solo su propia comuna (impacto directo) y otro en que además puedan afectar el resto de las comunas (impacto directo e indirecto). Así, en el primer escenario al exigir reducciones de concentraciones en cada comuna, solo las fuentes ubicadas ahí pueden generar dicha reducción (omitiendo el hecho de que existe un efecto indirecto en la reducción de otras comunas), mientras que en el segundo escenario las fuentes ubicadas en otras comunas también pueden aportar a la reducción.

A continuación se muestra la notación usada en el modelo:

i = Representa las 200 fuentes que pueden implementar una tecnología de abatimiento.
 t = Representa el uso de tecnologías de abatimiento (lavador Venturi, precipitador electrostático y filtro de mangas). Además, se incluye la alternativa de no usar ninguna tecnología.

$X_{i,t}$ = Variable binaria que determina si una fuente i utiliza una alternativa del tipo t para la reducción de emisiones.

$C_{i,t}$ = Costo anualizado en millones de pesos chilenos de utilizar una tecnología t en una fuente i .

Considerando lo anterior, la función objetivo es de la siguiente forma:

$$Z = \text{Min} \sum_i \sum_t C_{i,t} X_{i,t} \quad (2)$$

Sujeta a las siguientes restricciones:

$$\sum_t X_{i,t} = 1, \quad \forall \text{ fuente } i \quad (3)$$

$$\sum_i \sum_t E_i \alpha_{i,k} R_{i,t} X_{i,t} \geq RED_k, \quad \forall \text{ comuna } k \quad (4)$$

Donde,

E_i = Representa las emisiones de $MP_{2,5}$ en toneladas por año de una fuente i .

$R_{i,t}$ = Representa la eficiencia de reducción de emisiones de una tecnología de tipo t para una fuente i .

$\alpha_{i,k}$ = Representa los factores de emisión-concentración que relaciona las emisiones de una fuente i con niveles de concentración sobre la comuna k (se mide en microgramos/metro cúbico/toneladas/año).

RED_k = Representa la exigencia de reducción de concentraciones en microgramos por metro cúbico impuesto sobre la comuna k por la autoridad medioambiental.

La Ecuación 3 está asociada a la restricción que indica que cada tipo de fuente i debe escoger solo una alternativa t para controlar sus emisiones. La Ecuación 4 corresponde a los dos posibles escenarios del APS que se detallan a continuación.

- a) Sistema de permisos ambientales (APS), con las emisiones de las fuentes generando concentraciones solo en su propia comuna (impacto directo): Esta restricción considera que las concentraciones reducidas por las fuentes i solo en la comuna k (en la cual están localizadas) al implementar tecnologías de abatimiento, deben ser mayores o iguales a la exigencia de reducción de concentraciones exigida en esa comuna. Esto significa asumir que será cero si la fuente i no está ubicada en la comuna k .
- b) Sistema de permisos ambientales (APS), con las emisiones de las fuentes generando concentraciones en todas las comunas (impacto directo e indirecto): La restricción considera que las fuentes puedan afectar al resto de las comunas y no solo a aquella en la cual se localiza. Los FEC se modifican para determinar el impacto o concentraciones que generan las emisiones de una fuente sobre cada una de las nueve comunas.

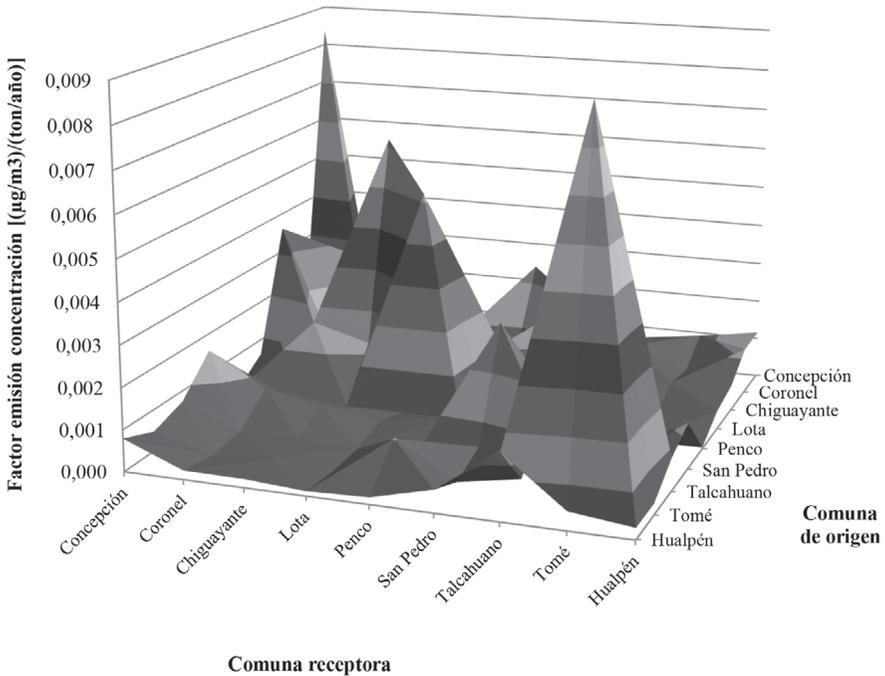
4. RESULTADOS

4.1. Factores de emisión-concentración (FEC)

El Gráfico 2 muestra los factores emisión-concentración calculados por comuna. Para el escenario donde las emisiones de las fuentes generan concentraciones solo en su comuna, se utilizan solo los FEC en la diagonal del Gráfico 2 y el resto de los valores asumen un valor cero. Por otro lado, en el escenario donde las emisiones de las fuentes afectan todas las comunas, se consideran todos los datos del Gráfico 2, es decir, las fuentes si pueden contaminar el resto de las comunas. Así, al multiplicar estos valores por las emisiones de cada fuente, se conoce su aporte a los niveles de concentraciones en cada comuna.

GRAFICO 2

FACTORES DE EMISION-CONCENTRACION AMBIENTAL PARA LAS COMUNAS DE CONCEPCION METROPOLITANO



Fuente: EULA (2014).

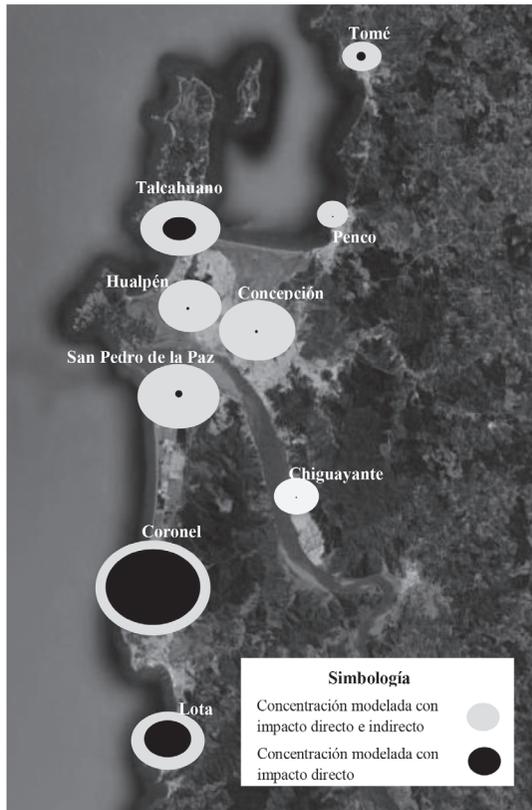
4.2. Concentraciones de $MP_{2,5}$ a partir del Inventario de Emisiones del Concepción Metropolitano

A partir del Inventario de Emisiones del Concepción Metropolitano y los FEC modelados se calculan las concentraciones aportadas por las fuentes industriales en cada una de las comunas. En primer lugar se considera que las emisiones de las fuentes generan concentraciones solo en la comuna donde se ubica y, en segundo lugar, se considera que las emisiones de las fuentes generan concentraciones en su propia comuna y en las demás.

En el Gráfico 3 se muestra la distribución geográfica de las concentraciones por comuna, considerando tanto el impacto directo como el indirecto de las emisiones de $MP_{2,5}$.

GRAFICO 3

CONCENTRACIONES MODELADAS DE $MP_{2,5}$ POR COMUNA CONSIDERANDO IMPACTO DIRECTO E INDIRECTO DE LAS EMISIONES



Fuente: Elaboración propia.

4.3. Costos de reducción considerando solo impacto directo de las emisiones

En este caso, las emisiones de las fuentes de una comuna en particular se multiplican únicamente por los FEC de la misma comuna, por lo que esas emisiones se traducen en concentraciones solo en ese lugar. Así, la Tabla 3 muestra los costos totales en millones de pesos chilenos en que incurren las comunas por alcanzar diferentes exigencias de reducción de concentraciones. Obviamente, algunas comunas no pueden alcanzar ciertas metas de reducción, ya que las fuentes industriales contribuyen menos que la meta exigida; en estos casos se considera solo el costo de la máxima meta abordable en cada comuna. También se muestra en paréntesis el costo marginal en cada comuna por aumentar las concentraciones en $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$; este costo marginal se puede interpretar como el precio sombra de incrementar $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en esa comuna.

TABLA 3

COSTO TOTAL EN MILLONES DE PESOS CHILENOS EN ALCANZAR LAS EXIGENCIAS DE REDUCCION CONSIDERANDO SOLO LOS IMPACTOS DIRECTOS³

Comuna	Unidades de concentración reducidas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)									Concentración total modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
	0,02	0,22	0,43	0,65	0,87	1,08	1,30	1,51	1,73	
Chiguayante	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,00
Concepción	120,7 [–]	–	–	–	–	–	–	–	–	0,03
Coronel	43,7 [21,9]	480,7 [21,9]	939,6 [21,9]	1420,4 [21,9]	1920,3 [26,0]	2477,0 [27,2]	3188,3 [34,9]	3944,7 [41,0]	5756,2 [139,0]	1,94
Hualpén	485,8 [242,9]	–	–	–	–	–	–	–	–	0,04
Lota	23,1 [11,5]	253,7 [11,5]	496,0 [11,5]	749,7 [11,5]	1003,4 [11,5]	1899,2 [98,2]	–	–	–	1,13
Penco	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,00
San Pedro	70,4 [35,2]	–	–	–	–	–	–	–	–	0,08
Talcahuano	119,6 [59,8]	1315,9 [59,8]	2618,0 [79,3]	5318,2 [167,5]	–	–	–	–	–	0,96
Tomé	33,8 [16,9]	–	–	–	–	–	–	–	–	0,15

Fuente: Elaboración propia.

³ El símbolo – refleja que no es técnicamente factible alcanzar la meta de concentración en esa comuna, mientras el símbolo [] muestra el precio sombra de transar un certificado que permita contribuir a las concentraciones en $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Algunas comunas por tener una mayor concentración de $MP_{2,5}$ pueden reducir más unidades que otras. La comuna que más concentraciones atribuibles al sector industrial posee es Coronel con $1,94 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La siguen Lota y Talcahuano, con un aporte de $1,13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Por otro lado, San Pedro de la Paz, al tener una concentración total modelada de $0,08 \mu\text{g}/\text{m}^3$, no puede alcanzar metas superiores. En el caso de Chiguayante y Penco el aporte de las concentraciones industriales es prácticamente nulo.

A medida que aumentan las exigencias de reducción, los costos tienden a aumentar, ya que es necesario que más fuentes instalen alguna tecnología de abatimiento para lograr la reducción. Además, se observan importantes diferencias de costos entre comunas por disminuir las mismas unidades de concentraciones. Esto se debe principalmente a las diferencias entre los FEC de las comunas, por lo que en algunas comunas se deben abatir más emisiones que en otras para reducir las mismas concentraciones.

Por otro lado, la cantidad de fuentes industriales que hay en cada comuna impacta los costos totales de cumplimiento, ya que al haber más fuentes en una comuna que en otra, hay una cartera más amplia de fuentes en donde el modelo de optimización puede buscar para instalar alguna tecnología de abatimiento que sea menos costosa. Así por ejemplo, para reducir $0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Coronel tiene un costo de 43,7 millones de pesos chilenos, mientras que el costo de Concepción para la misma reducción es de 120,7 millones de pesos chilenos.

Cuando solo se considera el impacto directo, el precio sombra de $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ es distinto en cada comuna, ya que existen tantos mercados de permisos como comunas en las cuales se puedan comprar o vender estos permisos. Como es lógico, también se observa que el precio de los permisos es más alto, cuando la meta exigida se va acercando al máximo nivel de reducción posible en cada comuna.

4.4. Costos de reducción considerando el impacto directo e indirecto de las emisiones

Los costos totales de cada una de las nueve comunas para alcanzar las exigencias de reducción de concentraciones, asumiendo que las emisiones de las fuentes afectan y reducen concentraciones en todas las comunas se presentan en la Tabla 4.

Cuando se permite que las emisiones de las fuentes afecten todas las comunas, los niveles totales de concentración en cada comuna son mayores, en consecuencia se pueden reducir más unidades de concentración debido al impacto indirecto de los FEC. Es necesario destacar que la única comuna que alcanza a reducir el máximo de concentraciones ($2,38 \mu\text{g}/\text{m}^3$) es Coronel, con un costo anual para esta comuna de 9.196 millones de pesos chilenos.

Similar a la Tabla 3, al aumentar las exigencias de reducción la tendencia general en este caso es que aumenten los costos, ya que más fuentes industriales deben instalar tecnologías de abatimiento para alcanzar las reducciones. Sin embargo, acá aparecen algunas situaciones en que los costos no son siempre crecientes, sino que también se mantienen constantes, aparecen costos cero o inclusive disminuyen.

Que los costos se mantengan constantes a pesar de aumentar las exigencias de reducción, se explica porque algunas comunas reducen sus concentraciones debido a

TABLA 4
COSTO TOTAL EN MILLONES DE PESOS CHILENOS EN ALCANZAR LAS EXIGENCIAS DE REDUCCION
CONSIDERANDO IMPACTOS DIRECTOS E INDIRECTOS DE LAS EMISIONES

Comuna	Unidades de concentración reducidas (µg/m ³)												Concentración total modelada (µg/m ³)
	0,02	0,22	0,43	0,65	0,87	1,08	1,30	1,51	1,73	1,95	2,16	2,38	
Chiguayante	0 [0,0]	0 [0,0]	0 [0,0]	0 [0,0]	0 [0,0]	-	-	-	-	-	-	-	1,09
Concepción	0 [0,0]	0 [0,0]	58,3 [0,0]	164,6 [0,0]	164,6 [0,0]	164,6 [0,0]	164,6 [0,0]	164,6 [0,0]	164,6 [1,1]	-	-	-	1,90
Coronel	195,4 [0,0]	2215,8 [0,0]	4212,8 [0,0]	8949,1 [0,0]	8949,1 [0,0]	8949,1 [0,0]	8949,1 [0,0]	8949,1 [0,0]	9196,0 [0,0]	9196,0 [0,0]	9196,0 [0,0]	9196,0 [25,0]	2,46
Hualpén	0 [0,0]	0 [0,0]	136,6 [0,0]	816,4 [0,0]	816,4 [0,0]	816,4 [0,0]	816,4 [0,0]	816,4 [0,0]	-	-	-	-	1,56
Lota	0 [2,4]	0 [0,0]	217,5 [0,0]	2235,6 [0,0]	2235,6 [0,0]	2235,6 [0,0]	2235,6 [0,0]	2235,6 [0,0]	2269,7 [0,0]	-	-	-	1,83
Penco	0 [0,0]	0 [0,0]	206,5 [0,0]	0 [963,4]	-	-	-	-	-	-	-	-	0,71
San Pedro	0 [0,0]	0 [0,0]	25,9 [0,0]	356,1 [0,0]	356,1 [0,0]	356,1 [0,0]	356,1 [0,0]	356,1 [0,0]	380,2 [0,0]	-	-	-	2,05
Talcahuano	0 [0,0]	0 [0,0]	0 [0,0]	6350,7 [0,0]	6350,7 [0,0]	6350,7 [0,0]	6350,7 [0,0]	6350,7 [0,0]	7832,7 [-]	-	-	-	1,98
Tomé	10,3 [18,3]	130,4 [24,2]	15,2 [10,7]	406,9 [0,0]	-	-	-	-	-	-	-	-	0,83

Fuente: Elaboración propia.

que en otra comuna se están reduciendo las emisiones, es decir, por efecto indirecto. Para el caso de las comunas de Lota y Hualpén, ambas tienen una sola fuente que explica sobre el 90% de sus emisiones, por lo que cuando la exigencia de reducción es de $0,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ o superior, el modelo asigna una tecnología de abatimiento a estas fuentes grandes, porque ya no hay ninguna alternativa menos costosa. Así, para dicha exigencia y algunas siguientes, se mantiene el costo de 816,4 millones de pesos chilenos en Hualpén y 2.235,6 millones de pesos chilenos en Lota, luego de instalar estas tecnologías de abatimiento.

Aparecen costos cero cuando la comuna no incurre en costo alguno por alcanzar la exigencia de reducción, ya que otra comuna le está ayudando a reducir las concentraciones. Así, al considerar que las fuentes puedan generar y reducir concentraciones en todas las comunas, la tendencia es a intensificar la reducción en las fuentes que tienen el mayor impacto indirecto hacia el resto de las comunas, ya que permite reducir más unidades de concentraciones en más comunas a la vez.

Algo similar explica el porqué en algunos casos los costos de una comuna disminuyen al exigir mayor reducción de concentraciones. Por ejemplo, la comuna de Tomé disminuye sus costos de 130,4 a 15,2 millones de pesos al aumentar la exigencia de reducción de $0,22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $0,43 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto ocurre porque bajo la nueva meta otras comunas están aportando indirectamente con esa reducción, entre ellas Penco, Coronel, Lota, Concepción o San Pedro de la Paz, ya que estas aumentan sus costos bajo estas mismas exigencias.

Otro resultado interesante a destacar, es que cuando se considera una misma exigencia de reducción, los costos totales de las nueve comunas son menores al incluir el impacto indirecto de los FEC. Por ejemplo, para un nivel de exigencia de 0,02, en la Tabla 3 todas las comunas que pueden cumplir la meta incurren en costos por alcanzar la reducción, no así en la Tabla 4, donde aparecen comunas como Concepción, Hualpén, Lota, Penco, San Pedro de la Paz y Talcahuano con costos de reducción igual a cero. Esto se explica porque al considerar el impacto indirecto de los FEC, las reducciones de emisiones de $\text{MP}_{2,5}$ de las fuentes en Coronel y Tomé generan reducciones de concentraciones de $\text{MP}_{2,5}$ necesarias para esa meta en todas las comunas. Así, el costo total de las siete comunas que pueden alcanzar la exigencia de $0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el primer escenario es de 897,1 millones de pesos chilenos, mientras que para el segundo escenario es de 205,7 millones de pesos chilenos. Es necesario destacar que esta comparación de costos totales se puede realizar solo cuando se considera la misma meta de reducción de ambos escenarios, es decir, cuando las comunas en ambos escenarios pueden alcanzar las mismas reducciones, lo que no ocurre para metas más exigentes, porque no todas las comunas pueden alcanzar dichas metas.

Para la gran mayoría de los casos, el precio sombra de reducir $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en una comuna específica es cero. Esto se explica porque la manera más costo-efectiva para que algunas comunas poco sensibles al aporte indirecto cumplan con la meta de concentración es que las fuentes pertenecientes a la comuna que más concentraciones aporta al resto (por ejemplo, Coronel) esté abatiendo muchas emisiones. Así, se genera un exceso de reducción de concentraciones en otras comunas más sensibles,

por lo cual el costo marginal de reducir $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en esas comunas es cero, ya que no se requiere que ninguna fuente genere reducciones extras de emisiones.

5. CONCLUSIONES

Se comparan dos escenarios de sistema de permisos transable de concentraciones (APS). En el caso de un APS que incorpora tanto los impactos directos como indirectos, las concentraciones estimadas son mayores respecto de un APS en el que se consideran solo los impactos directos. Así, el potencial de reducción de concentraciones es mayor en el primer caso, puesto que se permite que fuentes industriales de otras comunas aporten con reducciones. Se concluye que se subestiman significativamente las concentraciones cuando el impacto indirecto no es utilizado. Para el peor de los casos, en San Pedro de la Paz se subestiman 1,97 microgramos por metro cúbico, y en el mejor de los casos, en Coronel se subestiman 0,52 microgramos por metro cúbico.

Bajo una misma meta de reducción de concentraciones, los costos de un APS con el impacto indirecto incluido son considerablemente menores a un APS sin este impacto. Además, se amplía la cartera de fuentes a la cual asignar la reducción, ya que se puede buscar la reducción en fuentes de otras comunas, que pudiesen tener costos menores de abatimiento. Principalmente, las fuentes ubicadas en las comunas que tienen un impacto indirecto más fuerte hacia el resto (mayores FEC), incrementan sus aportes y costos individuales de reducción, ya que es más eficiente en términos económicos que abatan contaminación por su propia comuna y también por las otras comunas.

La principal conclusión del estudio es que si la autoridad regulatoria no es capaz de cuantificar los efectos indirectos de las emisiones, podría exigir metas de reducción de concentraciones que no se condicen con el aporte real de las fuentes industriales. En este sentido, se podría exigir a las fuentes de cada comuna que alcancen una determinada meta de concentraciones elevando los costos de regulación, cuando la meta podría ser obtenida simplemente con la instalación de tecnologías de abatimiento en fuentes industriales de algunas comunas que tenga un importante efecto indirecto sobre las otras comunas. Por otro lado, si las fuentes industriales aportan a varias comunas no estarían internalizando los costos de su contaminación indirecta a otras comunas. Ambos casos muestran la existencia de sobre o subregulación.

Es importante destacar, que independiente de las conclusiones obtenidas en este trabajo, la implementación de un APS puede ser bastante difícil. Esto se explica porque aparte de los altos requerimientos de información sobre la dispersión de los contaminantes, los certificados emitidos en diferentes localizaciones no serán intercambiados a una tasa de uno a uno. Más bien, existirían mercados para cada localización, y cada fuente emisora cuya contaminación llegue a múltiples localizaciones tendría que transar certificados en cada localización afectada. Esto obviamente conlleva a altos costos de transacción y dificulta la implementación práctica de este sistema.

CITAS BIBLIOGRAFICAS

- ALEGRIA, M.; MARDONES, C. y J. JIMENEZ (2013). "Reduction of PM10 emissions under scenarios of regulation and availability of natural gas in the Bío-Bío Region, Chile", *Energy & Environment Journal* 24 (6), pp. 1031-1041.
- COOPER, C.D. y F. ALLEY (2002). *Air Pollution Control – A Design Approach* (3rd ed). Prospect Heights, IL: Waveland Press Inc.
- EULA (2014). Análisis del impacto económico y ambiental del abastecimiento estable de GNL al sector industrial del Concepción Metropolitano. Informe Final.
- IIT (2012). Elaboración del análisis general del impacto económico y social del plan de prevención por MP_{2,5} en el Concepción Metropolitano. Informe Final.
- MARDONES, C. y J. JIMENEZ (2015). "Alternatives for reducing fine particulate matter from industrial activities in Concepción Metropolitan Area, Chile", *Energy & Environment Journal* 26 (3), pp. 445-456.
- MARDONES, C.; C. PAREDES, J. JIMENEZ, O. FARIAS y P. CATALAN (2015). "Tecnologías de control de emisiones y disponibilidad de gas natural como opciones para reducir emisiones de MP_{2,5} en el Concepción Metropolitano", *Revista de Análisis Económico* 30 (1), pp. 3-23.
- O'RYAN, R. (1996). "Cost-Effective Policies to Improve Urban Air Quality in Santiago, Chile", *Journal of Environmental Economics and Management* 31, pp. 302-313.
- O'RYAN, R. y R. BRAVO (2001). "Permisos transables frente a la introducción de un combustible limpio: Estudio de caso para PM10 y NOx en Santiago, Chile", *Estudios de Economía* 28, pp. 267-291.
- O'RYAN, R. y J.M. SANCHEZ (2007). "Comparison of Net Benefits of Incentive-Based and Command and Control Environmental Regulation: The Case of Santiago, Chile", *The World Bank Economic Review* 22 (2), pp. 249-269.
- PONCE, R. y C. CHAVEZ (2005). "Costos de cumplimiento de un sistema de permisos de emisión. Aplicación a fuentes fijas en Talcahuano, Chile", *El Trimestre Económico* 288 LXXII (4), pp. 847-876.
- SAN MARTIN, R. (2003). "Marketable emission permits with imperfect monitoring", *Energy Policy* 31 (13), pp. 1369-1378.
- SISTEMA DE INFORMACION NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE (SINCA). Chile. En: <http://sinca.mma.gob.cl/> Revisado de enero 2010 a diciembre 2014.
- 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.
- VILLENA, M.; C. CHAVEZ, G. CLERGEL y W. GOMEZ (2009). "Costos de cumplimiento de regulación ambiental con información incompleta. Aplicación a fuentes fijas del PCE de Santiago de Chile", *Estudios de Economía* 36, pp. 165-190.

ANEXO

A continuación se presenta la demostración que el problema que resuelve el planeador social para mantener estándares de concentración ambiental es idéntica a la solución descentralizada que resuelve cada firma si existe un sistema de permisos ambientales.

Si consideramos un área geográfica en la cual existen i fuentes emisoras (e_1, e_2, \dots, e_I) que afectan la concentración del contaminante q_j sobre j receptores, mediante la siguiente relación (aproximación lineal de primer orden):

$$q_j = \sum_i a_{ij} e_i + B_j$$

donde B_j es el background y a_{ij} es el coeficiente de transferencia (dq_j/de_i), también llamado factor de emisión-concentración.

El costo de controlar las emisiones de la fuente i es $C_i(e_i)$, entonces desde el punto de vista del planeador social debe minimizar los costos sujetos a mantener niveles de concentración ambiental q_j^* .

$$\text{Min } \sum_i C_i(e_i), \text{ sujeto a } \sum_i a_{ij} e_i + B_j = q_j^* \quad \text{con } j = 1, \dots, J$$

$$L = \sum_i C_i(e_i) + \sum_j \lambda_j (\sum_i a_{ij} e_i + B_j - q_j^*)$$

Derivando respecto de e_i , las condiciones de primer orden implican que

$$C_i'(e_i) = - \sum_j \lambda_j a_{ij} \quad \forall i$$

Para analizar el problema descentralizado por medio de un sistema de permisos ambientales, se asume que el regulador entrega $L_j = q_j^*$ permisos para cada receptor. Después del comercio de permisos, l_j son los permisos que finalmente tiene cada firma. Por lo tanto, $L_j \geq \sum_i l_i$.

Si todos los permisos son usados y ninguno se pierde o destruye, la ecuación anterior se cumple con igualdad. La firma i emite e_i por lo que su contaminación en el receptor j será $a_{ij} e_i$, pero la firma solo tiene l_i^j permisos, entonces:

$$a_{ij} e_i \leq l_i^j \quad \forall j$$

$$e_i \leq l_i^j / a_{ij} \quad \forall j$$

La ecuación anterior implica que $e_i^* = \min_j \{l_i^j / a_{ij}\}$. Esto significa que las emisiones de cada firma serán limitadas por aquel receptor más sensible debido al número de permisos de la firma.

En un sistema de permisos ambientales existirá un precio diferente en cada receptor. El precio por unidad de concentración ambiental será π_j , a su vez, el precio por unidad de emisión en el receptor j es $a_{ij}\pi_j$, y además, el precio por unidad de emisión en todos los receptores es $\sum_j a_{ij}\pi_j$.

La demostración se puede obtener al resolver el problema descentralizado de cada firma. En este caso los costos totales para la firma i son:

$$CT_i(e_i) = C_i(e_i) + \sum_j \pi_j(l_j - L_i)$$

$$CT_i(e_i) = C_i(e_i) + \sum_j \pi_j(a_{ij}e_i - L_j)$$

Minimizando los costos respecto de e_i se cumple que

$$CT'_i(e_i) = C'_i(e_i) + \sum_j \pi_j a_{ij} = 0$$

$$C'_i(e_i) = -\sum_j \pi_j a_{ij}$$

Así, con $\pi_j = \lambda_j$ en cada punto de control, se obtiene de forma descentralizada la misma solución del planeador social que minimiza los costos.