

---

**REDUCCIÓN COSTO-EFECTIVA DE EMISIONES INDUSTRIALES  
EN CONCEPCIÓN METROPOLITANO, CHILE: GAS NATURAL VS  
TECNOLOGÍAS DE ABATIMIENTO**

---

Cristian Mardones, Jorge Jiménez y Marcela Alegría

*RESUMEN*

*La contaminación atmosférica por material particulado respirable (MP10) es un problema que afecta a Concepción Metropolitana, Chile, de manera considerable por su elevada actividad industrial. Existen zonas en que los niveles de concentración de MP10 se encuentran muy cerca de superar la norma nacional de calidad de aire y otros en que la superan, afectando la salud de sus habitantes. Por lo tanto, resulta de interés evaluar alter-*

*nativas para mejorar esta situación. Las opciones analizadas en este estudio son el cambio de combustible a gas natural y el uso de tecnologías de abatimiento. Se trata de un análisis económico que busca reducir emisiones al mínimo costo sin importar cual fuente lo hace. Se concluye que la opción de cambio de combustible es atractiva para las fuentes industriales pero depende de la disponibilidad y precios del gas natural.*

**Introducción**

La contaminación atmosférica por material particulado respirable (MP10) es un problema que afecta a la zona urbana denominada Concepción Metropolitana, cuya población proyectada al 2012 alcanza los 1.027.299 habitantes, lo que la convierte en la segunda área metropolitana más poblada de Chile. Esta zona se caracteriza por una fuerte actividad industrial asociada a la producción de acero, generación de electri-

cidad, aserraderos e industria maderera, industria pesquera, producción de cemento, refinación de petróleo, entre otras. Existen seis estaciones de monitoreo donde los niveles de concentración de MP10 se encuentran en nivel de latencia, es decir, sobre un 80% de la norma de calidad primaria (Minsegres, 1998) que corresponde a un promedio aritmético trianual  $\geq 50\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , otras cuatro estaciones de monitoreo superan la norma y una estación en que se cumple la nor-

mativa (Figura 1). Esta situación afecta la salud de los habitantes dado que diversos estudios han mostrado que altas concentraciones de MP10 generan incremento en las visitas al médico, hospitalización por enfermedades respiratorias y/o cardiovasculares, ausentismo laboral y muertes, entre otras (Pope *et al.*, 1995).

Por lo anterior, resulta interesante evaluar alternativas para mejorar esta situación. Las opciones analizadas en este estudio son el cambio de combusti-

ble a gas natural y el uso de tecnologías de abatimiento. Se trata de un análisis económico que busca reducir el total de emisiones al mínimo costo mediante alguna de las dos alternativas. Estas alternativas no son las únicas para reducir el nivel de emisiones, también existe la opción de un cambio de localización de las empresas o una reducción del nivel de producción, entre otras. Sin embargo, en este estudio sólo se analizan las opciones indicadas debido a la falta de infor-

---

**PALABRAS CLAVE / Contaminación Atmosférica / Economía / Emisiones Industriales / Energía / Tecnologías limpias /**

Recibido: 01/04/2011. Modificado: 25/09/2012. Aceptado: 01/10/2012.

**Cristian Mardones.** Magíster en Economía de Recursos Naturales y del Medioambiente, y Doctor en Economía, Universidad de Chile. Profesor, Universidad de Concepción (UdeC),

Chile. Dirección: Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción. Edmundo Larenas 215, 4° Piso, Concepción, Chile. e-mail: crismardones@udec.cl

**Jorge Jiménez.** M.Sc. en Ciencias Ambientales y Ph.D. en Ingeniería Civil, Washington State University, EEUU. Profesor, Departamento de Ingeniería Industrial, UdeC, Chi-

le. e-mail: jorgejimenez@udec.cl

**Marcela Alegría.** Programa Magíster en Ingeniería Industrial, UdeC, Chile. e-mail: marcealegría@udec.cl

## COST-EFFECTIVE REDUCTION OF INDUSTRIAL EMISSIONS IN THE METROPOLITAN CONCEPCION, CHILE: NATURAL GAS VS END-OF-PIPES TECHNOLOGIES

Cristian Mardones, Jorge Jiménez and Marcela Alegría

### SUMMARY

The air quality of Metropolitan Concepcion, Chile, has been affected significantly due to the high local industrial activity. There are populated areas where the concentration of ambient PM10 (particulate matter with aerodynamic diameter  $<10\mu\text{m}$ ) exceeds current air quality standard of Chile, while other populated areas are close to reach this limit. This condition has a negative impact on the population health. Therefore, there is a need to implement strategies in order to improve the air

quality. The purpose of this study was to evaluate economic scenarios of fuel conversion to natural gas and of use of air pollution control technologies in order to reduce PM10 emissions from the industrial sources. The main focus of the economic analysis was to reduce PM10 emissions at a minimum cost, regardless of the source. It is concluded that the fuel switching option is attractive for industrial sources but depends on the availability and prices of natural gas.

## REDUÇÃO CUSTO-EFFECTIVA DE EMISSÕES INDUSTRIAIS EM CONCEPCIÓN METROPOLITANO, CHILE: GÁS NATURAL VS TECNOLOGIAS DE ABATIMENTO

Cristian Mardones, Jorge Jiménez e Marcela Alegría

### RESUMO

A contaminação atmosférica por material particulado respirável (MP10) é um problema que afeta a Concepción Metropolitana, Chile, de maneira considerável por sua elevada atividade industrial. Existem zonas em que os níveis de concentração de MP10 se encontram muito próximos de superar a norma nacional de qualidade de ar e outras em que a superam, afetando a saúde de seus habitantes. Portanto, resulta de interes-

se avaliar alternativas para melhorar esta situação. As opções analisadas neste estudo são a mudança de combustível a gás natural e o uso de tecnologias de abatimento. Trata-se de uma análise econômica que busca reduzir emissões ao mínimo custo sem importar a fonte que o faz. Conclui-se que a opção de mudança de combustível é atrativa para as fontes industriais, mas depende da disponibilidade e preços do gás natural.

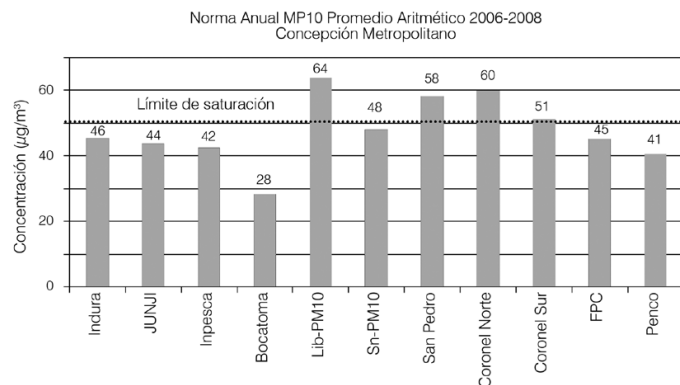


Figura 1. Evaluación del cumplimiento de la norma anual de MP10. Fuente: Secretaría Regional Ministerial del Medio Ambiente, Región del Bío Bío, Chile.

mación disponible para estudiar otras opciones.

En el análisis se utiliza como base de información el Inventario de Emisiones del Concepción Metropolitana 2008 (UDT-PROTERM, 2011) del cual se obtienen las emisiones de MP10 y el tipo de combustible por fuente, para luego estimar los consumos de combustibles de las fuentes utilizando el inverso de los factores de emisión

(AP42 de la Agencia de Protección Ambiental de EEUU).

Luego de estimar los requerimientos energéticos se determinan las fuentes que desde un punto de vista técnico, ambiental y económico, tienen la opción de cambio a gas natural o el uso de tecnologías de abatimiento. Se evalúan ambas opciones por separado, calculando los costos y disminuciones de emisiones para cada fuente.

Posteriormente, se construye un índice de costo-efectividad que indica la opción más económica para cada fuente. Esto permite llevar a cabo un análisis económico que busca reducir el total de emisiones al mínimo costo, sin importar cual fuente lo hace. Finalmente, se evalúa el desempeño de ambas opciones bajo distintos escenarios de disponibilidad de gas natural y de exigencia de reducción por parte de la autoridad reguladora.

Los resultados permiten concluir que el cambio a un combustible 'limpio' como el gas natural es muy atractivo en términos de reducción de emisiones, y además permite generar ahorro de costos, pero a requerimientos crecientes de reducción de emisiones se vuelven más relevantes las tecnologías de abatimiento. También se concluye que la máxima reducción posible con estas dos opciones alcanza el 74% de las emisiones totales de fuentes industriales, pero esta reducción no es suficiente para alcanzar

niveles de concentraciones de MP10 que permitan cumplir con el nivel de concentraciones de latencia ambiental que corresponde al 80% de la norma primaria anual.

El trabajo se estructura de la siguiente manera. Luego de esta introducción se presenta una revisión bibliográfica de estudios relacionados, seguida de la descripción de las opciones existentes para reducir emisiones y la situación actual de disponibilidad de gas natural en Concepción Metropolitana. Luego se describe el inventario de emisiones utilizado, los aspectos metodológicos de cálculo de requerimientos energéticos y los costos de alternativas de reducción de MP10. Tras el análisis de los resultados de los escenarios propuestos, se presentan finalmente las principales conclusiones del estudio.

### Revisión Bibliográfica

El enfoque tradicional de regulación ambiental es cono-

cido como ‘comando y control’, ya que existe poca flexibilidad de las empresas para lograr objetivos de reducción de la contaminación, estableciendo el regulador estándares uniformes o tecnologías específicas a utilizar. Ambas alternativas no consideran la minimización de los costos de reducción. En las últimas décadas han tomado fuerza las regulaciones basadas en instrumentos económicos como los permisos transables o cargos por contaminar, los cuales fomentan a las firmas a reducir la contaminación de una forma costo-efectiva dados ciertos objetivos de reducción (Stavins, 2003).

Experiencias acumuladas del uso de instrumentos de política económica en EEUU, Europa y en países de Latinoamérica se resumen en Sterner y Coria (2012). Estos autores concluyen que distintos instrumentos económicos pueden funcionar en variados contextos, aunque advierten que ello depende de la existencia de diversas instituciones que trabajen con la regulación ambiental en niveles locales, nacionales y supranacionales.

Montero *et al.* (2002), sobre la base de las experiencias del programa de control de material particulado de Santiago de Chile, evaluaron el rendimiento de un mercado ambiental. Señalan que los permisos de emisión crearon incentivos económicos para que las fuentes declararan más fácilmente sus emisiones históricas a fin de obtener permisos. Sin embargo, los autores concluyen que el mercado, hasta esa fecha, no estaba desarrollado plenamente debido a los costos de transacción, incertidumbre regulatoria, y la falta de cumplimiento. El análisis de dicha experiencia en particular, indicó que las políticas basadas en el mercado pueden ofrecer ventajas importantes sobre las políticas tradicionales de comando y control, incluso en virtud de la capacidad institucional limitada.

Existen diversos estudios que evalúan, a través de simulaciones, cómo los mecanismos

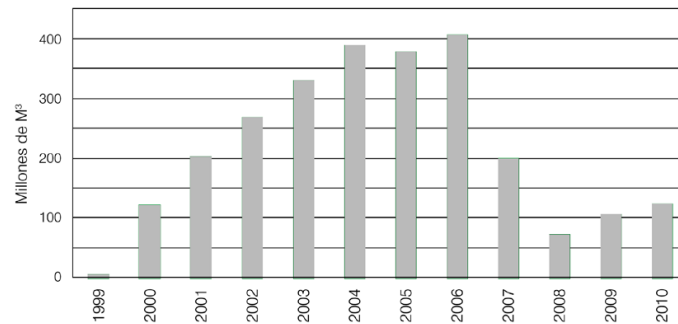


Figura 2. Importaciones de gas natural en la región del Bío Bío. Fuente: Comisión Nacional de Energía, Chile.

de mercado permitirían la reducción de emisiones en la ciudad de Santiago de Chile. Por ejemplo, O’Ryan (1996) evaluó el uso de instrumentos económicos para reducir la contaminación por fuentes industriales puntuales, concluyendo que la aplicación de instrumentos de mercado es más costo-efectivo que los instrumentos de comando y control. O’Ryan y Bravo (2001) consideran dos opciones para reducir las emisiones de fuentes fijas: tecnologías de fin de tubo (*end of pipe*) y el cambio de combustibles a gas natural importado desde Argentina. Coria (2009) muestra que las fuentes industriales fueron más sensibles al costo de la energía (bajo precio del gas) que a la regulación ambiental. O’Ryan y Sánchez (2007) comparan instrumentos económicos pero incluyen los beneficios sobre la salud. Villena *et al.* (2009) estudian la propiedad de costo-efectividad de un sistema de permisos de emisión transferibles frente a un sistema de estándares de emisión, incorporando los costos de abatimiento y los costos de fiscalización para inducir cumplimiento. Ponce y Chávez (2005) concluyen para la ciudad de Talcahuano (la más industrializada de Concepción Metropolitana), utilizando sólo la opción de tecnologías de abatimiento, que reducir el nivel agregado de emisiones de MPI0 por medio de un sistema de permisos de emisión transable es un 55% más económico que utilizar una política de comando y control.

## Opciones para Reducir Emisiones

### *Cambio de combustible actual por gas natural*

De acuerdo a información de la Comisión Nacional de Energía de Chile, Innergy Holdings es la única empresa comercializadora de gas natural que abastece el mercado industrial y a las empresas distribuidoras de gas natural residencial y comercial de Concepción Metropolitana, en la Región del Biobío. Esta empresa nació en 1997 con el propósito de comercializar gas natural importado desde la cuenca de Neuquén, Argentina, el cual es transportado por medio del Gasoducto del Pacífico desde la Cuenca Neuquina en Argentina hasta la Región del Bío Bío en Chile. Cuando se comenzó a importar el gas natural hubo significativos beneficios para el medioambiente, aportando en forma sustancial a la disminución de las emisiones de contaminantes. Sin embargo, a partir del 2004, el gobierno argentino inició restricciones a los envíos de gas natural, hecho que se hizo crítico en junio de 2007, cuando los envíos de este combustible desde Argentina se redujeron al mínimo necesario para abastecer a los clientes residenciales y comerciales de la región (Figura 2).

El Gasoducto del Pacífico fue construido para una cantidad muy superior a la que hoy hay disponible para abastecer al sector industrial. En un comienzo Innergy Holdings realizó contratos con distintas grandes fuentes industriales de Concep-

ción Metropolitana, a las cuales les garantizó que podrían revertir fácilmente el cambio a gas natural ante algún inconveniente instalándoles equipos duales. Las fuentes industriales que realizaron el cambio de combustible debieron en 2007 volver a utilizar los combustibles previos a la llegada del gas, los cuales tenían precios mayores que los del gas natural cuando realizaron la sustitución. Actualmente, todo lo que se recibe por el gasoducto es vendido a las fuentes industriales, pero no hay suficiente gas natural para satisfacerlas a todas.

A contar de 2011 se estudió el proyecto de traer a la región gas natural licuado (GNL) desde la Región de Valparaíso (a una distancia de ~650km). El plan piloto operativo actualmente contempla el traslado del gas en camiones cisterna hasta una planta regasificadora. Este proyecto podría significar en un largo plazo tener una mayor disponibilidad de gas natural para las fuentes industriales de Concepción Metropolitana. Es bajo este nuevo escenario que surge la motivación de realizar el presente estudio, el cual en función de sus resultados puede dar un impulso adicional al proyecto de ampliar la planta regasificadora de GNL, no sólo por sus eventuales beneficios económicos privados sino también por sus impactos medioambientales.

### *Tecnologías de abatimiento*

Otra alternativa disponible para reducir las emisiones atmosféricas son las tecnologías de abatimiento del tipo *end of pipe*. Su elección depende del tipo de contaminante, del tamaño de la fuente, del combustible empleado y de la normativa de emisiones que debe cumplir. A continuación se describen las características de las principales tecnologías de abatimiento para material particulado en base a USEPA (2002).

**Ciclón.** Equipo que realiza la remoción de MP por fuerzas centrífugas e inerciales, inducidas al forzar el cambio de dirección del gas cargado de par-

tículas. Sirve principalmente para MP de diámetro aerodinámico >10µm. Sin embargo, hay ciclones de alta eficiencia, diseñados para ser efectivos con MP de diámetro aerodinámico ≤10µm y ≤2,5µm (MP10 y MP2,5).

**Multiciclón.** Es un equipo de filtración que integra en un único cuerpo múltiples ciclones de pequeñas dimensiones, dispuestos en paralelo, a fin de reducir la altura y volumen, que se requeriría para el mismo caudal con ciclones convencionales.

**Precipitador electrostático.** Se basa en la aplicación de una fuerza eléctrica a las partículas para separarlas del gas o fluido. Un campo eléctrico generado por alto voltaje de los electrodos del aparato carga las partículas eléctricamente cuando pasan cerca del electrodo. Las partículas cargadas eléctricamente son recolectadas en una superficie con carga opuesta mientras el gas sigue fluyendo. El material particulado acumulado es periódicamente removido de los platos de recolección mediante vibración o agua.

**Lavador Venturi.** Son lavadores eficientes para polvos finos y aerosoles. Su eficiencia de remoción de MP10 se debe a la alta velocidad relativa entre el gas que tiene partículas y el líquido de barrido en el cuello del Venturi. Durante el proceso, el gas motriz sufre un descenso de presión, que representa una medida de la eficiencia de la separación.

**Filtros de manga.** Opera bajo el mismo principio que una aspiradora de filtro convencional. El aire que contienen las partículas es forzado a pasar por un filtro de saco. Este filtro está hecho de un material diseñado para recolectar partículas y a medida que éstas se van acumulando va aumentando la capacidad de filtrado. El material particulado acumulado periódicamente es

TABLA I  
EMISIONES DE MP10  
POR SECTOR INDUSTRIAL

Sector industrial	PM10
Productos de hierro y acero	1072
Aserraderos y fabricación de madera elaborada	483
Producción de cemento	338
Generación eléctrica	622
Industria pesquera	405
Producción de vidrios y fritas	196
Producción de combustibles	172
Elaboración de telas	48
Calderas industriales	70
Industria química	10
Producción de bebidas alcoholicas	7
Fabricación y reciclaje de papel	18
Faenamiento de animales	2
Tratamiento de superficies	0
Fabricación de alimentos	7
Procesamiento de feldespatos	9
Productos de aluminio	0
Tratamiento de lodos	0
Astilleros y maestranzas	0
Calderas de calefacción	9
Panaderías	86
Grupos electrógenos	13
<b>Total</b>	<b>3566</b>

Fuente: UDT-PROTERM (2011)

removido del filtro de manga, revirtiendo el flujo de filtrado o bien mediante inyección de aire comprimido.

### Metodología

#### Información de emisiones de fuentes industriales

Se tuvo acceso para este estudio al Inventario de Emisiones de Fuentes Fijas del Concepción Metropolitano año 2008 (UDT-PROTERM, 2011), el cual fue utilizado para determinar las emisiones de cada fuente, sector económico, tipo de combustible utilizado y, además, si la fuente ya tenía instalada alguna tecnología de abatimiento. El inventario incluye 533 fuentes emisoras, de las

cuales 113 fueron medidas directamente, 410 fueron estimadas con un factor de emisión y para 10 fuentes no hubo información. Del total de fuentes incluidas solo 215 registran una emisión >0. Las emisiones anuales de MP10 corresponden a 3566ton (Tabla I); de este total, 30,1% es aportado por la industria de hierro y acero; 17,4% por generación eléctrica; 13,5% por aserraderos y elaboración de madera; 11,4% por la industria pesquera; 9,5% por la industria cementera; 5,5% por la industria del vidrio; 5,1% por la industria petroquímica; 2,0% por calderas industriales; y 5,5% es aportado por otros sectores industriales.

#### Consumo de combustibles

Desde el inventario se tuvo acceso al nivel de emisiones de MP10 de cada fuente y el tipo de combustible utilizado (aunque algunas fuentes generan emisiones por procesos sin combustión), se re-estimaron las emisiones para aquellas firmas que poseían alguna tecnología de abatimiento (cuatro ciclones, dos multiciclones y dos filtros de mangas), por lo cual, con los factores de emisión AP42 de la EPA (Tabla II) por tipo de combustible, equivalencias de unidades y las densidades co-

rrespondientes, se obtuvo los consumos de combustibles en toneladas para las fuentes que utilizan carbón, petróleo N° 2, petróleo N° 5, petróleo N° 6, leña y gas natural.

#### Cambio de combustible

Dada la eventual mayor disponibilidad de GNL en Concepción Metropolitano con la ampliación de la capacidad de la planta de regasificación o bien la instalación de nuevas plantas en los próximos años, surgió la pregunta de qué cantidad de gas natural sería necesaria para suplir las cantidades de energéticos más contaminantes que utilizan las fuentes industriales. Para ello, se expresaron los requerimientos energéticos de cada fuente con el fin de poder realizar comparaciones entre los distintos combustibles. Luego, se determinaron para qué fuentes era factible el uso de gas natural, desde el punto de vista técnico, y cuál era la cantidad de gas natural necesaria para suplir su consumo. Para calcular el consumo de energía, se utilizaron los poderes caloríficos, obtenidos de los respectivos balances energéticos (CNE, 2008)

Así se obtuvo la energía en Kcal/año que consumía cada una de las fuentes con cada combustible actualmente utilizado. Luego, sumando la energía utilizada por los combustibles técnicamente posibles de reconvertir con equipos duales, es decir, combustibles líquidos (petróleo N° 2, 5 y 6) y utilizando el poder calorífico que corresponde al gas natural, se pudo llegar a determinar la cantidad de gas natural necesaria para suplir ese requerimiento

TABLA II  
FACTORES DE EMISIÓN POR TIPO DE COMBUSTIBLE

Combustible	Factor de emisión MP10	Categoría de fuente (AP42)	Unidad factor	Sección AP42
Carbón	0,003000	Bituminous carbon/ Overfeed stoker/ Uncontrolled	kg/kg	1,1
Leña	0,003125	Bark/ Bark and wet wood	kg/kg	1,6
Petróleo N° 2	0,000203	N°2 Oil fired	kg/kg	1,3
Petróleo N° 5	0,000909	N°5 Oil fired	kg/kg	1,3
Petróleo N° 6	0,000866	N°6 Oil fired	kg/kg	1,3
Gas natural	0,000171	Natural gas combustion	kg/kg	1,4

Elaboración propia a partir de AP42 (US EPA, 2009).

calórico. Los costos anualizados de los equipos duales fueron obtenidos por comunicación directa con un representante de una empresa distribuidora de gas a nivel nacional.

En consecuencia, el análisis de cambio de combustible se realizó sólo para las fuentes que utilizaban un combustible líquido, puesto que esto garantiza que pueden instalar el equipo necesario para hacer uso del gas natural.

#### *Tecnologías de abatimiento factible de utilizar*

Las tecnologías de abatimiento que se supusieron factibles de utilizar para que las fuentes industriales reduzcan sus emisiones de MP10 fueron las apli-

TABLA III  
PRECIOS DE COMBUSTIBLES  
AÑO 2008 Y AÑO 2012

Combustible	Precios 2008 (\$/kcal)	Precios 2012 (\$/kcal)
Carbón	0,0091	0,0074
Leña	0,0197	0,0220
Petróleo 2	0,0349	0,0396
Petróleo 5	0,0238	0,0358
Petróleo 6	0,0198	0,0332
Gas natural	0,0194	0,0302

Fuentes: Comisión Nacional de Energía, Chile.

cadadas a fuentes fijas en O’Ryan y Bravo (2001), Ponce y Chávez (2005) y Villena *et al.* (2009). Las funciones de costo utilizadas para cada tecnología provienen de Ponce y Chávez (2005), actualizadas de acuerdo al IPC a precios del año 2008, dado que los datos del inventario de emisiones son de ese año, y a precios de 2012 para obtener una estimación más actual.

#### *Construcción de índices de costo-efectividad*

Para realizar los análisis se estimó un indicador de costo-efectividad para cada fuente analizada por tipo de

TABLA IV  
REDUCCIÓN DE EMISIONES Y COSTOS AGREGADOS DE ACUERDO  
A DISPONIBILIDAD DE GAS NATURAL (MM\$ AÑO 2008)

Disponibilidad de gas	Reducción de Emisiones							
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	74%
0%	1426,5	2922,8	4551,3	6353,8	8399,8	10992,6	17264,6	23177,9
10%	333,9	1816,0	3456,4	5268,9	7334,3	10089,4	16455,2	22497,5
20%	-763,9	706,7	2310,9	4146,6	6218,8	9157,9	15625,3	21672,7
30%	-1861,9	-402,5	1177,5	2961,5	5066,4	8193,4	14771,9	20845,4
40%	-2953,1	-1506,2	44,0	1782,1	3848,9	7180,8	13891,4	20008,9
50%	-4037,4	-2604,2	-1089,3	610,1	2569,2	6082,8	12982,6	19166,0
60%	-5109,5	-3702,2	-2214,8	-553,6	1351,5	4822,6	12049,2	18323,2
70%	-6080,2	-4800,3	-3324,1	-1704,1	151,6	3297,2	11047,2	17472,3
80%	-7045,9	-5898,3	-4433,4	-2841,8	-1033,9	1492,7	9872,4	16604,2
90%	-8006,8	-6996,0	-5542,6	-3975,2	-2218,2	-56,6	7720,6	15688,5
100%	-8966,0	-8080,4	-6640,6	-5108,6	-3392,3	-1401,3	4643,9	14490,0

combustible y para cada una de las cinco tecnologías de abatimiento. La estimación del indicador corresponde al costo total por tonelada emitida de MP10, con estos índices de costo-efectividad calculados se escogió el menor índice por fuente. Esto permitió determinar si era más conveniente utilizar alguna tecnología o el cambio de combustible para abatir las emisiones de cada fuente.

No obstante lo anterior, según un análisis de factibilidad técnica por cada fuente se determinó que existen 884ton de MP10 que no pueden ser reducidas por tecnologías de abatimiento o por cambio de combustible, debido a las características propias de los proce-

sos. Entre estas fuentes se incluyen principalmente las emisiones de la batería de coque de una fábrica de acero y procesos productivos de una fábrica de cemento.

#### **Análisis y Resultados de las Simulaciones**

En esta sección se presenta una serie de simulaciones con el objetivo de obtener el costo agregado de la reducción de emisiones de MP10, considerando factibilidad técnica, distintos porcentajes de disponibilidad de gas natural, porcentajes de reducción de emisiones totales, y precios de combustibles para los años 2008 y 2012 (Tabla III).

Específicamente, se buscaron los menores índices de costo-efectividad, tanto de gas natural como del uso de sistemas de abatimiento, y se estableció la máxima disminución de emisiones que se puede hacer por

TABLA V  
REDUCCIÓN DE EMISIONES Y COSTOS AGREGADOS DE ACUERDO  
A DISPONIBILIDAD DE GAS NATURAL (MM\$ AÑO 2012)

Disponibilidad de gas	Reducción de Emisiones							
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	74%
0%	1616,9	3312,9	5158,7	7201,8	9520,8	12459,7	19568,7	26271,2
10%	376,5	2065,7	3959,5	6037,8	8489,1	11769,1	19059,8	25901,6
20%	-869,1	816,8	2693,7	4843,6	7431,1	11043,2	18514,2	25388,1
30%	-2114,8	-432,4	1431,1	3562,3	6317,7	10270,9	17934,3	24859,5
40%	-3360,6	-1681,5	168,4	2281,3	5140,6	9462,4	17328,8	24322,1
50%	-4606,3	-2930,6	-1094,2	1001,7	3930,2	8597,2	16695,2	23777,5
60%	-5852,1	-4179,8	-2352,1	-275,2	2629,3	7594,1	16034,1	23232,3
70%	-7097,9	-5429,0	-3608,8	-1552,0	1217,6	6298,2	15302,6	22666,8
80%	-8343,7	-6678,2	-4865,5	-2828,9	-182,9	4564,7	14377,7	22079,4
90%	-9589,5	-7927,4	-6122,2	-4105,8	-1561,3	2802,4	12347,5	21403,0
100%	-10835,3	-9176,5	-7378,9	-5382,7	-2916,0	1300,0	9249,6	20443,6

fuentes hasta completar el monto total de toneladas a reducir exigidas por la autoridad ambiental en cada simulación. Luego, la disminución de emisiones en cada fuente se multiplicó por su costo-efectividad y se obtuvo el mínimo costo total necesario para la reducción (a precios de 2008 y 2012).

La Tabla IV muestra el costo agregado que tendría la selección de fuentes que deberían ser reducidas en base al índice de costo-efectividad frente a distintos porcentajes de disponibilidad de gas natural y exigencias de reducción, considerando los precios de combustibles y de tecnologías de abatimiento del año 2008. En este caso se consideró como máxima meta de reducción de emisiones un 74% ya que no es posible obtener un 100% de reducción debido a que ninguna de las alternativas a implementar tiene tal eficiencia y, además, como fue mencionado anteriormente existen emisiones de procesos que no son posibles de reducir con las opciones analizadas. De los resultados obtenidos se observa que a medida que aumenta la disponibilidad de gas natural van disminuyendo los costos agregados. En la mayoría de los casos se obtiene un ahorro de costos debido a la diferencia de precios entre combustibles, lo que se explica porque ante la eventualidad de mayor disponibilidad de gas, los precios de este combustible el 2008 eran más atractivos que los de combustibles competidores. Se debe notar que si existe un ahorro de costos ante la

eventual disponibilidad de gas natural, las fuentes realizarán el cambio de combustible independientemente de la regulación ambiental. Además, se puede notar que a medida que se aumenta la meta de reducción de emisiones los costos van aumentando. Sin disponibilidad de gas natural, los costos agregados tienden a crecer más a partir de exigencias mayores o iguales a 60%. Con total disponibilidad de gas natural, se observan ahorros de costos tan importantes que permiten reducir emisiones sin un costo agregado positivo hasta un nivel de reducción de emisiones de 60%.

El mismo análisis anterior fue realizado con precios del año 2012, esto con el objetivo de evaluar la robustez de los resultados ante los nuevos escenarios de precios de combustibles de ese año, cuando hubo un aumento en el precio relativo del gas respecto a otros combustibles. Sin embargo, a falta de más reciente información industrial, no se pudieron actualizar las emisiones manteniendo el cálculo a partir del inventario de emisiones 2008.

En la Tabla V se pueden apreciar los mismos efectos observados a precios del año 2008, tanto individualmente como en la comparación de cada simulación. Sin embargo, dado el aumento de precios de los combustibles del 2008 al 2012, de los cuales el más notorio fue el gas natural, se observa que existen menos casos en los cuales hay ahorro de costos y es menor la disminución de costos agregados a medida que aumenta la disponibilidad de gas natural. Con total disponibilidad de gas natural se observan ahorros que permiten reducir emisiones sin un costo agregado positivo hasta un nivel de reducción de emisiones de 50%.

Adicionalmente, se generó a partir de la información disponible una estimación de la meta de reducción de emisiones con la cual se podría salir del nivel de saturación y latencia por concentraciones de MP10, la cual se describe a continuación. En particular, el escenario base

de emisiones de fuentes industriales y su aporte a las concentraciones en Concepción Metropolitana puede estimarse en función de una relación de tipo *roll-back*. Las emisiones totales de fuentes fijas industriales, residenciales, móviles, de área, quemas agrícolas e incendios forestales según el plan de prevención atmosférica para la región (MMA, 2011) corresponden a 18542ton de MP10 al año. Además, de acuerdo a la Figura 1 las concentraciones anuales promedio en la zona corresponden a  $47,9\mu\text{m}^{-3}$ . Combinando ambos datos es posible establecer una relación de  $0,0025833\mu\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  por tonelada emitida, es decir, para llevar a un nivel de emisiones bajo un nivel de latencia ambiental (que técnicamente corresponde al 80% del valor de la norma primaria anual, menor a  $40\mu\text{m}^{-3}$ ), se requeriría reducir las emisiones de MP10 en al menos 3058ton/año. Esto significaría reducir las emisiones de fuentes industriales en un 85,8% respecto al escenario base representado en el inventario de emisiones 2008.

Por el análisis previo y los resultados de las simulaciones se puede concluir que no es posible alcanzar un nivel de concentraciones para salir del nivel de latencia ambiental en Concepción Metropolitana enfocándose exclusivamente en la reducción de emisiones de fuentes industriales, incluso en el escenario de máxima disponibilidad de gas natural. Ello demuestra la necesidad de incluir medidas principalmente asociadas a la reducción de emisiones residenciales resultantes de la combustión de leña para calefacción.

### Conclusiones

Dada la disponibilidad de gas natural licuado (GNL) en la segunda mayor zona urbana de Chile, luego de restricciones a las importaciones de este combustible desde Argentina, se evaluó en términos económicos cuál sería el impacto en la reducción de emisiones y costos para las fuentes industriales de escenarios con po-

tenciales regulaciones ambientales que exigieran reducir las emisiones de MP10.

De acuerdo a la información del Inventario de Emisiones del Concepción Metropolitan, el total de fuentes industriales para las que se evalúa las alternativas de reducción de emisiones generan un total de 2682ton/año de MP10. Aplicando ambas opciones de reducción y considerando que existe 100% de disponibilidad de GNL para las industrias consideradas en ese análisis se puede lograr una reducción de 1985ton/año. Esta reducción corresponde al 74% del total de emisiones. Si sólo estuviera disponible la opción de sistemas de abatimiento se puede llegar a la misma reducción de las emisiones totales a un costo 60% mayor si consideramos los precios de 2008 y a un costo 28,5% mayor si consideramos los precios de 2012, lo que se explica por el alza en el precio relativo del GNL respecto a otros combustibles.

Finalmente, también se determinó que ante el escenario de máxima reducción posible con las opciones analizadas en la zona bajo estudio no es posible superar el nivel de latencia ambiental, y por lo tanto se requieren medidas regulatorias destinadas a reducir emisiones de otro tipo de fuentes de MP10, principalmente combustión de leña residencial.

### REFERENCIAS

Calfucura E, Coria J, Sánchez JM (2009) Permisos comerciables de emisión en Chile. Lecciones, desafíos y oportunidades para países en desarrollo. *Trim. Econ.* 304: 1027-1069.

CNE (2008) *Balances de Energía*. Comisión Nacional de Energía. Santiago, Chile.

Coria J (2009) Environmental policy, fuel prices and the switching to natural gas in Santiago, Chile. *Ecol. Econ.* 68: 2877-2884.

MMA (2011) *Plan de Prevención Atmosférica del Concepción Metropolitan*. Ministerio del Medio Ambiente. Región del Bio Bio, Chile.

Minseggres (1998) Decreto Supremo N°59. Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República. Santiago, Chile.

Montero J, Sánchez JM, Katz R (2002) A market-based environmental policy experiment in Chile. *J. Law Econ.* 45: 267-287.

O'Ryan R (1996) Cost-effective policies to improve urban air quality in Santiago, Chile. *J. Env. Econ. Manag.* 31: 302-313.

O'Ryan R, Bravo R (2001) Permisos transables frente a la introducción de un combustible limpio: Estudio de caso para PM10 y NOx en Santiago, Chile. *Estud. Econ.* 28: 267-291.

O'Ryan R, Sánchez JM (2007) Comparison of net benefits of incentive-based and command and control environmental regulations: The case of Santiago, Chile. *World Bank Econ. Rev.* 22: 249-269.

Pares & Álvarez (1999) *Estimación del Efecto de la Sustitución de Combustibles Tradicionales por Gas Natural en las Emisiones de Contaminantes Atmosféricos Derivadas de los Procesos Industriales de la Ciudad de Talcahuano*. Pares & Álvarez Ingenieros Asociados. Concepción, Chile.

Pope C, Bates D, Raizenne M (1995) Health effects of particulate air pollution: Time for reassessment? *Env. Health Perspect.* 103: 472-480.

Ponce R, Chávez C (2005) Costos de cumplimiento de un sistema de permisos de emisión. Aplicación a fuentes fijas en Talcahuano, Chile. *Trim. Econ.* 288 LXXII: 847-876.

Stavins R (2003) Experience with market-based environmental policy instruments. En Mäler KG, Vincent J (Eds.) *Handbook of Environmental Economics*. Vol. 1, Ch. 9. Elsevier. pp. 355-435.

Stern T, Coria J (2012) *Policy Instruments for Environmental and Natural Resource Management*. 2ª ed. RFF Press. Nueva York, EEUU.

UDT-PROTERM (2011) *Evaluación de Medidas para Reducir la Contaminación Atmosférica en Complejos Industriales y Grandes Fuentes del Gran Concepción*. Informe Final para CONAMA. Bio Bio, Chile.

US EPA (2009) *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*. Vol. 1: *Stationary Point and Area Sources*. Emission Factors and AP 42. 5ª ed. US Environmental Protection Agency, EEUU.

Villena M, Chávez C, Clergel G, Gómez W (2009) Costos de cumplimiento de regulación ambiental con información incompleta. Aplicación a fuentes fijas del PCE de Santiago de Chile. *Estud. Econ.* 36: 165-190.