



PERMISOS TRANSABLES FRENTE A LA INTRODUCCION DE UN COMBUSTIBLE LIMPIO: ESTUDIO DE CASO PARA PM-10 Y NO_x EN SANTIAGO, CHILE

RAÚL O'RYAN
RODRIGO BRAVO

Abstract

Beginning in 1990 a compensation system for PM-10 emissions from point sources was implemented in Santiago, equivalent to a suboptimal emission permit system (EPS). The objective of the system was to reduce compliance costs and to prevent emissions from new sources, forcing them to compensate all emissions with existing sources. The system basically did not operate until 1997, year in which natural gas –a clean fuel– was introduced into Santiago. In this context, this paper examines the following questions: What is the impact of the introduction of natural gas in the applicability of tradeable permits for PM-10 and NO_x? Are they justified or are the efficiency gains so small that direct regulation is preferable? The efficiency gains associated to an optimal ambient permit system (APS) are quantified and compared to the simpler EPS. Finally control cost functions are developed for Santiago for fixed point sources and presented in detail.

Resumen

A partir de 1990 se introdujo en Santiago un sistema de compensación de emisiones para controlar las emisiones de PM-10 de fuentes fijas, en principio equivalente a un sistema de permisos de emisión (EPS), instrumento económico subóptimo. Se buscaba con este sistema reducir los costos de cumplimiento e impedir el crecimiento de las emisiones de fuentes fijas al obligar a fuentes nuevas a compensar todas sus emisiones. El sistema básicamente no operó hasta 1997, año en que se introduce el gas natural en Santiago, combustible considerado limpio. En este contexto, este trabajo aborda las siguientes preguntas: ¿Qué impacto ha tenido la introducción del gas natural sobre la aplicabilidad de permisos transables para PM-10 y NO_x? ¿Se siguen justificando o las ganancias en eficiencia disminuyen a tal nivel que se puede considerar el uso de instrumentos de regulación directa? También se cuantifican las ganancias en eficiencia asociadas a aplicar un sistema de permisos ambientales (APS) que, a diferencia de un EPS, es óptimo. Finalmente en este trabajo se presentan en detalle las funciones de costos de control para las diversas fuentes fijas de Santiago.

Clasificación JEL: Q2, Q25, Q28.

Key word: *Natural Resource. Pollution in Air.*





I. INTRODUCCIÓN

Numerosos estudios establecen la magnitud de los posibles beneficios que se obtienen a través de la utilización de instrumentos de mercado. El trabajo realizado por Plott (1983) y Hahn (1983) revela que la simulación teórica de este tipo de instrumentos conduce a incrementos sustanciales de los niveles de eficiencia con respecto a los instrumentos de regulación directa. El trabajo basado en simulaciones que usan costos reales e información medioambiental arroja un resultado parecido. Investigaciones empíricas han sustentado la versión teórica de los incentivos basados en el mercado. Se reporta que el ahorro de costos puede ser significativo frente a la alternativa de comando y control. Tietenberg (1988) revisa nueve estudios donde los incentivos basados en el mercado son calibrados para alcanzar el mismo nivel ambiental que los métodos de comando y control aplicados. En siete de estos estudios, la razón del costo de MBI sobre los costos de CAC es de 1:4 o menor. Por otra parte, en algunos casos la ventaja de los permisos no es sustancial. En dos de los estudios citados por Tietenberg la razón es de 1:14 o menor.

Existen además resultados de diversas experiencias aplicadas que señalan que transar emisiones puede permitir significativos ahorros de costos para las empresas afectadas. Estos ahorros se han observado en el sistema de cuotas utilizado para controlar la lluvia ácida en Estados Unidos y NO_x y SO_x en la ciudad de Los Angeles. También han sido importantes para sistemas de créditos aplicados para controlar la eliminación del plomo en la gasolina en Estados Unidos. Otras aplicaciones no han logrado cumplir las expectativas que dieron origen a su puesta en marcha, particularmente en Dinamarca, Holanda y Alemania [Klaassen, G. y Andries Nentjes, 1997].

La experiencia de aplicación de estos instrumentos en países en desarrollo es escasa. Para Chile, O'Ryan (1996) evalúa el uso de instrumentos económicos para reducir la contaminación por fuentes puntuales en Santiago. El estudio presenta una evaluación de cuatro instrumentos, dos de ellos de comando y control (STD y PER¹) y dos de incentivo económico (APS y EPS) para el año 1994. Las principales conclusiones de este estudio confirman la costo-efectividad de la aplicación de instrumentos de mercado en el caso de la contaminación en Santiago, en oposición a los instrumentos de comando y control, en particular cuando se requieren reducciones de concentración atmosférica superiores al 35%.

Además concluye que en Santiago es necesario tomar en consideración el problema de distribución espacial de los contaminantes si se pretende controlar el problema de calidad de aire con la máxima eficiencia económica, ya que de lo contrario no se obtendrá la máxima reducción de costos para una meta de calidad específica. Por otro lado, se establece que la utilización de APS se justifica cuando los niveles de reducción de concentraciones son superiores al 35%, es decir cuando hay una mayor exigencia en términos de calidad de aire, ya que el diferencial de costo entre APS y STD es bajo cuando la meta de calidad es menos exigente.

¹ Corresponde a igual porcentaje de reducción de emisiones en cada una de las fuentes. En el presente estudio no se evalúa este instrumento por ser inaplicable en las condiciones específicas de simulación.





En el desarrollo del estudio se observan costos de reducción de concentraciones negativos solamente en un tramo pequeño (para APS entre 20% y 40%), si se toma en consideración que el nivel máximo de reducción alcanzado supera el 95%. La magnitud de estos beneficios no supera los 2.300 millones de pesos². Esta reducción de los costos se justifica en la posibilidad de cambio a petróleo 6 y 5 que tenían las fuentes que en ese momento operaban con carbón o madera. Este trabajo fue desarrollado para PM-10 y no considera la opción de cambio a gas natural, ya que en ese momento no era una alternativa disponible.

Desde la realización de ese estudio han pasado 6 años. En este período se han controlado las emisiones de particulado de las fuentes mayores por medio de normas de emisión. Además en 1997 se introdujo gas natural como fuente energética, el que ha comenzado a ser utilizado en forma creciente en la industria. En un trabajo desarrollado por Villena y Villena (1998) se realiza un análisis de los costos de control para diferentes niveles de exigencia, considerando un instrumento de comando y control (STD) y dos instrumentos de incentivo económico (APS y EPS), considerando la existencia de gas natural. En este sentido es bastante similar al presente trabajo. Sin embargo, ese estudio presenta algunas limitaciones importantes. Considera solamente 560 fuentes puntuales, la mitad de las consideradas en el presente trabajo. Las fuentes son analizadas considerando los mismos cinco rangos utilizados por O'Ryan (1996), a diferencia de lo realizado en el presente trabajo, el cual desarrolla el análisis para 1.098 fuentes una a una, sin considerar categorías de agrupación. Esto da mayor precisión a los resultados. Adicionalmente, cabe destacar que las funciones de costos en las cuales basan su trabajo Villena y Villena, provenientes del estudio de Aranda (1996), contienen algunos errores que se corrigieron en el desarrollo del presente trabajo. Se utiliza una base de información de emisiones más reciente. Finalmente, en el caso particular del instrumento de comando y control los resultados que se presentan no parecen correctos, y las simulaciones realizadas en este trabajo entregan resultados bastante diferentes.

En este contexto, este trabajo aborda las siguientes preguntas: ¿Qué impacto ha tenido la introducción del gas natural y las mejoras técnicas introducidas sobre la aplicabilidad de permisos transables para PM-10? ¿Se siguen justificando o las ganancias en eficiencia disminuyen a tal nivel que se puede considerar el uso de instrumentos de regulación directa? O quizás se justifica el uso de un sistema de permisos transables subóptimo que no considere diferenciación espacial. Otro tema importante es examinar la aplicabilidad de permisos transables para controlar las emisiones de NO_x .

Por otra parte, en este trabajo se pone gran énfasis en mejorar las funciones de costo de reducción de cada opción de control. Este es un aporte valioso, y, como se discute en las conclusiones, vital para la toma de decisiones de las autoridades respecto de las metas de reducción a exigir, debido a que pequeñas variaciones en la meta tienen implicancias de costo muy significativas.

En el capítulo II se presenta una visión general del problema de contaminación en Santiago, así como una descripción de las principales fuentes emisoras. El tercer capítulo presenta en detalle las opciones de control aplicables a las fuentes fijas en Santiago. Se distingue entre las tecnologías de fin de tubo y los

² En el trabajo de O'Ryan la cifra se presenta en dólares norteamericanos, se realizó una conversión con un tipo de cambio de 460 \$/US\$.



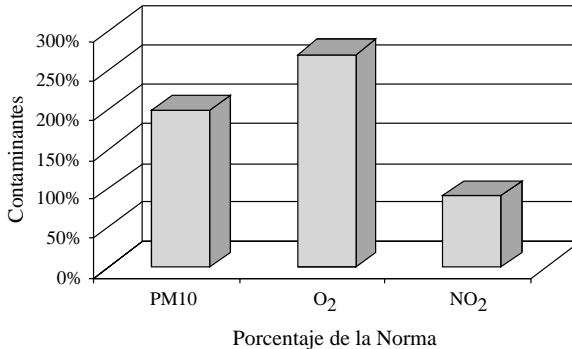
cambios de combustible. Se presentan las curvas de costo aplicables para cada categoría de fuente, en función de su tamaño. El capítulo IV, en base a las funciones de costo, establece el costo para el total de 1.098 fuentes de alcanzar diversas metas de calidad ambiental en la ciudad. Para ello considera tres instrumentos diferentes, uno de comando y control y dos instrumentos económicos. El capítulo V presenta las principales conclusiones del estudio.

II. EL PROBLEMA DE CALIDAD DEL AIRE EN SANTIAGO DE CHILE

La ciudad de Santiago, Chile, así como muchas de las grandes ciudades de países en desarrollo, sufre graves problemas de contaminación atmosférica. Las normas de calidad del aire se sobrepasan en forma rutinaria. En el caso del material particulado respirable, la norma diaria de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para el ozono, la media aritmética horaria³ de $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el caso del dióxido de nitrógeno, los valores medidos se encuentran entre un 80% y un 100% de la norma, que equivale a una media aritmética anual de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La Figura II.1 presenta los valores máximos de contaminantes medidos en Santiago durante el año 1995, como porcentaje de la norma que representan.

Ello motivó que las autoridades decretaran la ciudad Zona Saturada en junio de 1996, para cuatro contaminantes atmosféricos: PTS, PM10, CO y O_3 y como Zona Latente para el NO_2 . Al decretar una Zona como Saturada o Latente, la legislación establece la necesidad de elaborar planes de descontaminación o prevención (según sea el caso). En el particular, la ciudad de Santiago⁴ requirió la elaboración de ambos, programa conocido como Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana, 1997 (PPDA).

FIGURA II.1
PORCENTAJE DE NORMA, VALORES MAXIMOS PARA CADA CASO



Fuente: Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana, 1997.

³ Este valor no puede ser sobrepasado más de una vez por año.

⁴ En estricto rigor, la declaración de Zona Saturada y Latente afecta a la Región Metropolitana, cuya capital regional corresponde a la ciudad de Santiago.





La contaminación presenta una distribución tanto espacial como temporal, pero los mayores problemas en el caso del material particulado y los NO_x se presentan en el centro de la ciudad y en el período de invierno, fundamentalmente debido al fenómeno de inversión térmica que dificulta la dispersión de los contaminantes, actuando como una “tapa” sobre la ciudad, que impide a los contaminantes alcanzar una altura que permita su salida de la cuenca. El ozono en cambio es un problema en los meses de mayor calor, concentrándose principalmente en la zona oriente y nororiente de la ciudad, alcanzando en Las Condes niveles que son casi el doble a los del centro, lo anterior debido tanto a la alta concentración de automóviles que emiten COV's y NO_x ⁵, como al régimen de viento predominante que favorece la acumulación de los gases en esta zona, sin perjuicio de lo cual también se observan superaciones de la norma en el centro de la ciudad.

A partir de los resultados de un análisis químico⁶, a nivel agregado se puede concluir que en términos generales los agentes contribuyentes al PM10 son en un 50% las partículas de “tierra”, representadas por partículas levantadas en caminos principales, un 25% de partículas de combustión generadas por vehículos, cerca de un 10% de partículas generadas por la industria y un 15% de partículas posiblemente generadas por las fundiciones de cobre emplazadas fuera de Santiago u otras fuentes de “background”. Cabe señalar que el particulado se genera tanto por emisiones directas como en forma secundaria por reacciones entre gases precursores: SO_2 , NO_x y amoníaco. Por lo tanto, para controlar el material particulado en Santiago, también es importante controlar los gases.

El marco legal para fuentes fijas

El marco legal que regula las emisiones de las fuentes fijas puntuales busca responder a un programa integral que pretende, en el caso de Santiago, reducir las emisiones de material particulado y otros contaminantes, con metas, plazos y procedimientos definidos.

Actualmente se encuentra en vigencia un sistema de compensación, cuya concepción busca el cumplimiento de dos grandes objetivos:

- i. Congelar el total de emisiones de material particulado originado por las fuentes fijas puntuales, tanto calderas como procesos; y
- ii. Flexibilizar el cumplimiento de las normas de emisión definidas por éste (tanto intermedias como final), para las fuentes existentes.

El procedimiento a seguir para materializar las compensaciones⁷ fue dictado en 1995 a través de un decreto. Las definiciones vertidas en este decreto indican que sólo podrán participar del sistema de compensación las calderas

⁵ Precursores de ozono.

⁶ Este apartado se basa en el Trabajo “Contaminación del Aire en Santiago: Estado Actual y Soluciones”, O'Ryan, Raúl y Larraguibel, Luis, *Documento de Trabajo* N° 75, Serie Economía, Centro de Economía Aplicada, Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Abril 2000.

⁷ Forma de transacción de emisiones en que dos partes acuerdan el monto que una cederá a la otra, debiendo presentar esta decisión frente a la autoridad para la respectiva autorización. Esta puede rechazar la transacción, fundada en razones técnicas.



(de calefacción e industriales), en tanto no se realicen los estudios que permitan definir los parámetros técnicos necesarios para determinar la emisión de procesos. Es así como éstos quedaron explícitamente excluidos del sistema de compensación. Inicialmente, toda fuente nueva debía compensar el 100% de sus emisiones. Hasta mayo del 2001 se las obligaba a compensar el 120% de sus emisiones, pero a partir de esa fecha se ha aprobado subirlo al 150%. No se realizan consideraciones espaciales en los intercambios, correspondiendo en principio a un sistema tipo EPS.

Este sistema –por diversas razones, muchas de carácter administrativo y de diseño– no ha funcionado bien, observándose sólo un mínimo de transacciones⁸.

Emisiones de fuentes fijas

Del total de fuentes existentes en la región, menos del 20% contribuye con más del 90% de las emisiones de material particulado (PTS), el cual puede ser considerado en su mayoría como material particulado respirable (PM10) ya que la disminución en el uso de combustibles sólidos eliminó prácticamente toda la fracción gruesa del material particulado producido por las industrias (Bravo, 2000).

El presente estudio se concentra en un total de 1.098 fuentes fijas puntuales⁹, las cuales emiten 2.554 kg/día de PM10 y 16.908 kg/día de NO_x, correspondientes al 66% y 46% del total de emisiones de fuentes fijas, respectivamente. El resto de las emisiones de fuentes fijas corresponde en su gran mayoría a fuentes difusas, para las cuales no es interesante aplicar un sistema de permisos transables.

Las fuentes puntuales pueden a su vez ser divididas en cuatro subcategorías que corresponden a las indicadas en el Plan de Prevención y Descontaminación de la Región Metropolitana. Estas subcategorías son: Procesos Industriales, Calderas Industriales, Calderas de Calefacción y Panaderías.

Los *procesos industriales* incluyen procesos relacionados con la industria de los alimentos, minerales metálicos y no metálicos, industria química, molienda de granos, producción de cerámica, vidrio y refractarios, etc. Se pueden mencionar procesos de granallado, barnizado, fundición de metales, cocción, secado, molienda y traslado de granos, plantas de asfalto, fabricación de ladrillo, etc. Estas fuentes pueden a su vez ser divididas en dos grandes grupos, los que utilizan hornos y el resto de los procesos, los cuales presentan una gran diversidad. Las *calderas industriales* son utilizadas para producir vapor o para calentar otros fluidos. Cabe destacar que entre las calderas industriales se consideran las tres fuentes principales pertenecientes a la Central Renca¹⁰, la Turbina de Ciclo Combinado y dos Calderas que funcionan con petróleo-2. Las

⁸ A pesar de que han ingresado al sistema sobre 300 fuentes, las que deberían compensar sus emisiones, sólo ha habido 18 transacciones hasta fines del 2000. Para una evaluación, ver O’Ryan (1999) y Montero (2001).

⁹ Fuentes que presentan un caudal efluente superior a los 1.000 m³N/hr a través de una chimenea.

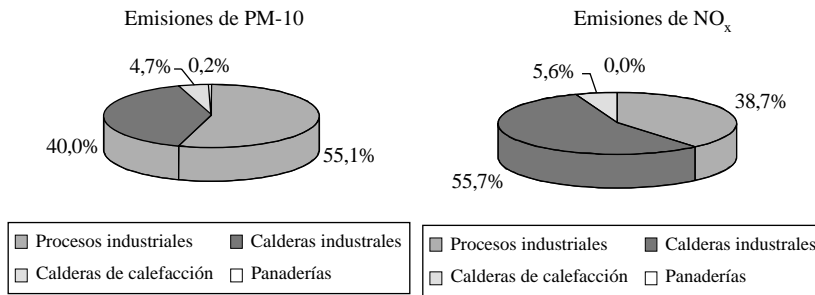
¹⁰ Megafuente ubicada al interior de la ciudad. Se trata de un central termoeléctrica.



calderas de calefacción son utilizadas para calentar agua que permite calefaccionar dependencias del sector público, comercial y residencial. No forman parte de las fuentes del sector industrial y son de menor tamaño que las anteriores. Finalmente las panaderías deben sus emisiones a los procesos desarrollados en sus hornos de cocción de pan¹¹.

En Santiago en el año 1998 existían registradas en el inventario de emisiones del Sesma 582 procesos industriales, 380 calderas industriales, 121 calderas de calefacción y 15 panaderías. La importancia relativa de las emisiones de PM-10 y NO_x de cada categoría se observa en la figura siguiente, siendo los procesos y las calderas industriales los más importantes.

FIGURA II.2
 IMPORTANCIA RELATIVA DE CADA CATEGORIA DE FUENTE EN LAS EMISIONES DE PM-10 Y NO_x, SANTIAGO, 1998



III. COSTOS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES PARA FUENTES FIJAS EN SANTIAGO

Para reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos existen dos opciones conceptualmente distintas para fuentes fijas. Por un lado, el abatimiento de emisiones se puede lograr a partir de la utilización de equipos de control de efluentes, en que los contaminantes son capturados (o inactivados) desde el flujo de salida a la atmósfera. Esta alternativa se conoce como tecnologías de fin de tubo (“end of pipe”). Utilizando estos dispositivos, los contaminantes son capturados y posteriormente depositados para su eliminación. Estos equipos son típicamente utilizados para la captura de material particulado.

La segunda alternativa para el control de las emisiones atmosféricas corresponde a la introducción en el proceso productivo de tecnologías no contaminantes, vía cambio de combustibles, reemplazo de materias primas o modificaciones al proceso mismo. Esta opción se conoce como “producción limpia”. En el caso particular de este estudio, se utiliza como alternativa de producción limpia el cambio de combustible, considerando entre ellos al gas natural, combustible de especial interés en el desarrollo de este trabajo debido a su particular estructura de costos y su cualidad de ser un combustible “limpio”.

¹¹ En el primer inventario resultaron ser fuentes importantes al utilizar leña y carbón. En la actualidad la gran mayoría usa gas, por lo que su importancia relativa ha disminuido notablemente.



A continuación se presentan las opciones de control aplicables para cada tipo de fuente y sus eficiencias de reducción. Se ha hecho un esfuerzo por utilizar las mejores fuentes de información disponibles y opinión experta. Como resultado, los valores que se presentan son un aporte para quienes buscan tener estimaciones de costos y de eficiencia de reducción aplicables a la realidad nacional.

(a) Tecnologías de control de fin de tubo

A continuación se detallan las tecnologías aplicables, costos y eficiencias de reducción tanto para PM-10 como para NO_x.

Costos y eficiencias de control para PM-10

Basados en la literatura, y de acuerdo a la opinión de expertos¹², las tecnologías aplicables a las fuentes puntuales en Santiago corresponden a: Ciclones, Multiciclones, Precipitadores Electroestáticos, Lavadores Venturi y Filtros de Mangas.

Utilizando metodología EPA y valores y costos de la realidad nacional, se obtuvieron relaciones funcionales que representan los costos anuales (totales) de la utilización de un determinado equipo de control, de acuerdo al caudal de efluente que debe ser tratado. El Cuadro III.1 muestra las funciones de costo anual para cada uno de los equipos de control aplicables a las fuentes fijas de Santiago. La función de costo total corresponde a la suma de los costos de inversión anualizados, los costos directos de operación y los costos indirectos de operación. Los costos totales son función del caudal de efluente Q (en m³N/hr) y de las horas de operación de la fuente (HRS).

CUADRO III.1
FUNCIONES DE COSTO PARA SANTIAGO

Opción de Control	Costo de Inversión anualizado [\$/año]	Costos Directos de Operación [\$/año/hora]	Costos Indirectos de Operación [\$/año]
Ciclones	$62,34Q + 64.496$	$(0,113Q + 115,25)*HRS$	503.729
Multiciclones	$106,46Q + 113.809$	$(0,113*Q + 115,25)*HRS$	503.729
Precipitador Electroestático	$79.566Q^{0,6261}$	$(42,9Q - 357.671)*HRS$	4.336.985
Lavador Venturi	$116.407Q^{0,4037}$	$(110Q + 390.990)*HRS$	6.214.271
Filtro de Mangas	$3.560Q^{0,7449}$	$(23Q + 386.720)*HRS$	6.912.527

Fuente: Elaboración personal, ver Bravo (2000).

¹² Sr. Luis Larraguibel y Sr. Juan Carlos Bordones.



Para determinar las reducciones en la emisión de material particulado que se logran al aplicar las diferentes opciones de control, se calculan las eficiencias generales de separación para cada alternativa. Dichos cálculos se realizan a partir del tamaño de partícula, información granulométrica, distribución del tamaño de partícula y eficiencias de separación fraccional. Las eficiencias de reducción se presentan en el Anexo 1. Para las emisiones de PM10 en calderas, cuyo combustible es gas natural, se adoptó un criterio conservador y no se estableció alternativa tecnológica de reducción de emisiones para este tipo de fuentes.

Costos y eficiencias de control para NO_x

La formación de óxidos de nitrógeno se produce en los procesos de combustión por la presencia de oxígeno y nitrógeno, además de altas temperaturas que potencian la reacción. Tecnológicamente, una alternativa para reducir la formación de óxidos de nitrógeno es la reducción del exceso de oxígeno en el proceso, de modo evitar la formación de NO_x . Sobre esta base funcionan los quemadores de bajo NO_x (quemador $LoNO_x$ de Johnston Boiler). Los quemadores de bajo NO_x sólo pueden ser utilizados en equipos que utilizan combustibles líquidos y gaseosos.

Los costos incluyen sólo la inversión requerida. No hay diferencial en los costos de operación ya que se sigue utilizando el mismo combustible en la misma cantidad. La inversión depende del tamaño de la fuente, por lo que se distinguen quemadores grandes y pequeños siguiendo la división presentada en la sección anterior. Estos se reseñan en el Cuadro III.2. Las eficiencias de control se presentan en el Anexo 1.

CUADRO III.2

FUNCION DE COSTOS DE INVERSION QUEMADOR $LoNO_x$ (\$ DE 1998)

Cambio Combustible	Costo Quemadores Grandes [M\$/año]	Costo Quemadores Pequeños [M\$/año]
Líquido a Gas	$TC=3.491 \times \log_{10}(VP) - 8.588$	$TC = 0.346 \times VP$

Fuente: Aranda [1996], página 38.

(b) Cambio de combustibles

Las fuentes fijas pueden cambiar a un combustible más limpio, reduciendo las emisiones de material particulado y de óxidos de nitrógeno. Los costos totales de este cambio dependen de la inversión requerida y del diferencial de costo debido a la variación en los gastos de operación por la utilización de un combustible distinto. Este último componente se cuantifica calculando la diferencia entre las cantidades equivalentes de combustible ponderadas por los precios respectivos. Por su especificidad, en la sección siguiente se detalla la forma de estimar los costos operacionales asociados a cambiar a gas natural.



Los costos de inversión dependen solamente de los kilos de vapor hora (KVP) generados por el tipo de combustible utilizado. Estos costos dependen del caudal del efluente, distinguiéndose entre quemadores grandes (caudal efluente superior o igual a los 2.500 m³N/hr) y quemadores pequeños (caudal efluente inferior a los 2.500 m³N/hr). El Cuadro III.3 presenta las funciones de costo de inversión para cambio de combustible tanto para quemadores grandes como para quemadores pequeños.

CUADRO III.3
FUNCIONES DE COSTO DE INVERSION EN QUEMADORES, ANUALIZADAS
(\$ DE 1998)

Cambio Combustible	Costo Quemadores Grandes [M\$/año]	Costo Quemadores Pequeños [M\$/año]
Sólido a líquido	$TC=5.577\log_{10}(VP) - 14.200$	$TC = 1,30VP - 97,33$
Sólido a Gas	$TC=5.681\log_{10}(VP) -$	$TC = 1,72VP - 115,41$
Líquido a Líquido	$TC=3.491\log_{10}(VP) - 19.701$	$TC = 0,32VP$
Líquido a Gas	$TC=3.491\log_{10}(VP) - 8.588$	$TC = 0,35VP$

Fuente: Aranda [1996], página 38.

La eficiencia de reducción de cambiar de combustible se determina directamente a partir de la diferencia en las emisiones generadas por cada tipo de combustible, las que se presentan en el Anexo 1.

(c) Gas natural¹³

En el caso de los combustibles como carbón, petróleo-2 y otros, es posible asignar un valor único en \$/kg o \$/m³ (precio unitario) para determinar los costos totales de utilización de un determinado combustible en una fuente. En el caso del gas natural, el precio unitario no corresponde a un valor único, ya que hay una fuerte incidencia del nivel de consumo en el precio, verificándose una relación de 1:3 entre el rango máximo y mínimo de consumo. Adicionalmente se considera un cargo fijo mensual que depende de la estación de medición y regulación.

¹³ Todos los antecedentes se basan en el documento preliminar de un estudio desarrollado por el Sr. Luis Larraguibel (1998), "Costo-Efectividad del cambio a Gas Natural para Fuentes Puntuales".



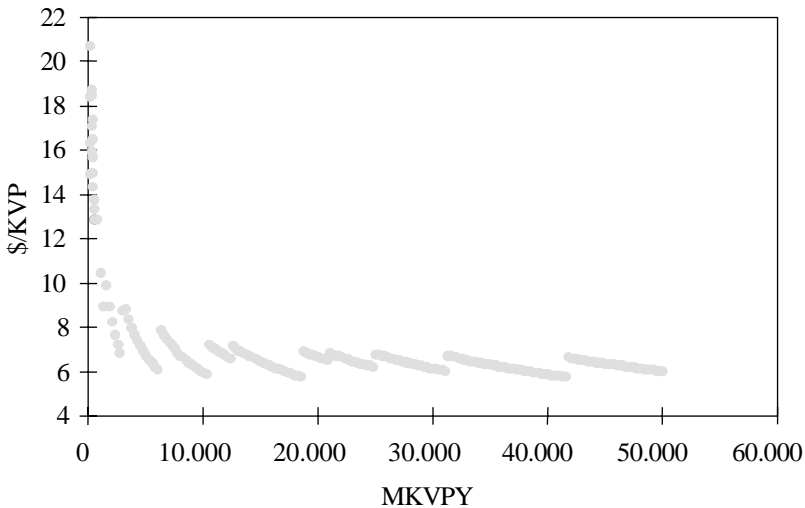
Por ello fue necesario realizar un proceso de simulación que permitió obtener el costo unitario por cada mil kilos de vapor año que consume cada fuente. Este costo unitario incorpora el costo fijo y el rango de precio del combustible que afecta a la fuente de acuerdo a su nivel de consumo. Las Figuras III.1 y III.2 resumen los resultados de este proceso de simulación.

IV. MODELO PARA COMPARAR INSTRUMENTOS REGULATORIOS

Para determinar las ventajas potenciales que se pueden obtener al utilizar instrumentos de incentivo económico para controlar las emisiones de PM10 o de NO_x es necesario examinar la eficiencia estática de estos instrumentos y compararla con los instrumentos de comando y control. La magnitud de esta ganancia depende de las características específicas del problema. Particularmente, y como se menciona en O’Ryan (1993), factores como el número de fuentes involucradas en el estudio, el tamaño relativo de las fuentes, la exigencia de las metas de calidad del aire, los diferenciales de costo marginal de abatimiento y los factores de transferencia entre las distintas zonas condicionan la eficiencia relativa entre los diversos instrumentos.

Por esta razón, se desarrolló un modelo capaz de evaluar diferentes instrumentos, de modo de comparar los resultados obtenidos para cada uno de ellos en las condiciones específicas del problema de contaminación de Santiago.

FIGURA III.1
COSTO UNITARIO PARA CONSUMO MENOR QUE 50.000 MKVPY

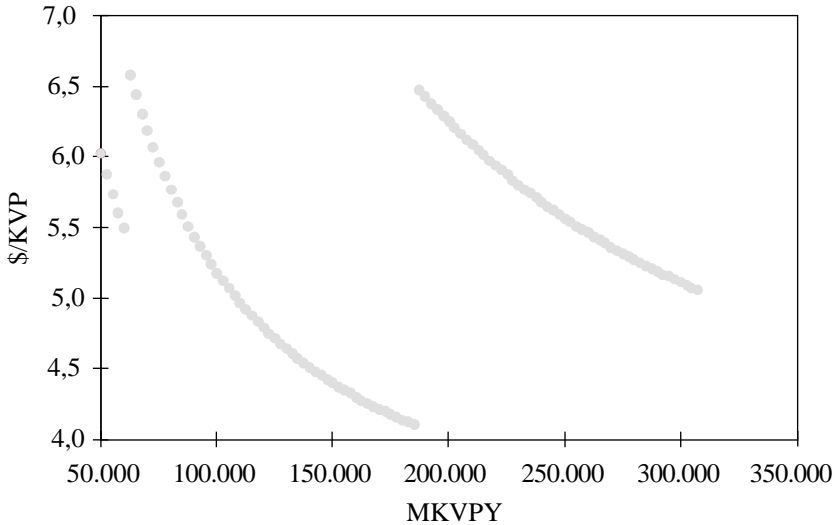


Fuente: “Costo-Efectividad del cambio a Gas Natural para Fuentes Puntuales”, Luis Larraguibel.





FIGURA III.2
COSTO UNITARIO PARA CONSUMO MAYOR QUE 50.000 MKVPY



Fuente: "Costo-Efectividad del cambio a Gas Natural para Fuentes Puntuales", Luis Larraguibel.

El modelo general

El problema que enfrenta el regulador es obtener la calidad de aire deseada en cada uno de los receptores a un mínimo costo. Suponiendo la existencia de N fuentes puntuales y K zonas en las cuales son generadas las emisiones, que a su vez representan la ubicación de los receptores, el problema a resolver es el siguiente:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N C^i(e^i)$$

sujeto a:

$$Q = f(e^1, \dots, e^N)$$

$$Q \leq Q^*$$

$$e^i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, N$$

donde:

- e^i : emisión para la fuente i después de aplicada la política de reducción;
- $C(e^i)$: costo total de reducción (abatimiento) de la fuente i para llegar a un nivel de emisión e^i ;
- Q : corresponde a un vector con la concentración ambiental en cada uno de los K receptores;





- $f(e^1, \dots, e^N)$: modelación que relaciona los niveles de emisión de todas las fuentes con las concentraciones en cada uno de los K receptores;
- Q^* : vector con las concentraciones deseadas en cada una de las K zonas.

Se subdividió la ciudad en 289 zonas, utilizando una grilla de 17×17 celdas cada una de 2 km^2 . De esta forma $K=289$, y cada fuente pertenece a una zona específica (o celda). Para determinar la ubicación de las fuentes se recurrió a información de coordenadas UTM de cada una de ellas; se supuso la fuente ubicada en el centro de gravedad de la celda correspondiente.

Para resolver el problema anterior es necesario conocer:

- (i) La ubicación de las fuentes, horas de operación diarias de cada una y caudal efluente. Estas se obtuvieron de la base de dato PROCEFF para 1998. En total se consideran $N = 1.098$ fuentes.
- (ii) Las emisiones horarias de cada fuente. Para PM-10 se obtienen de la base de datos de PROCEFF. Para NO_x , se estiman a partir de los antecedentes del punto anterior y factores de emisión específicos a cada tipo de fuente.
- (iii) La función de costos de abatimiento para cada tecnología de control que permite determinar $C(e^i)$. Estas fueron discutidas en la sección III, considerando un total de 10 opciones de control para el PM-10 y 6 para el NO_x . El análisis de las alternativas tomó en consideración las características específicas de cada fuente y la existencia de algún equipo de control instalado.
- (iv) La relación entre emisiones y concentraciones. Estas se obtienen utilizando factores de transferencia, que relacionan las emisiones de una fuente con el aumento de la concentración del contaminante en las celdas de su entorno. Los factores considerados se presentan en el Anexo 2.

Instrumentos de regulación considerados

Se considera la evaluación de tres instrumentos, dos económicos y uno de regulación directa: EPS, APS y STD. El EPS corresponde a un sistema de permisos de emisión. Se trata de un instrumento de incentivo económico, en el cual se fija como meta un nivel agregado de emisiones, y las fuentes reciben permisos de emisión que son transables. Se transa una unidad de emisión en cualquier zona con una unidad de emisión en cualquier otra zona.

El APS corresponde a un sistema de permisos ambientales. Presenta un funcionamiento similar al EPS, pero, a diferencia de éste, el APS busca asegurar una meta de calidad ambiental. Si bien permite el intercambio de permisos entre las fuentes, estos intercambios están condicionados al efecto de las emisiones sobre las concentraciones de la zona específica en que se encuentra la fuente que pretende comprar los permisos. Es el instrumento de mínimo costo.

El STD corresponde a un estándar de concentración en el efluente que es un instrumento de comando y control. Bajo STD se establece un límite a las concentraciones del contaminante en el caudal efluente.





Implementación de cada instrumento

Para los tres instrumentos considerados existe una base común del modelo implementado, modificando solamente la restricción principal de acuerdo a las características del instrumento evaluado. Por esta razón, se presenta primero la formulación general del modelo y luego se describe la restricción asociada a cada instrumento.

El modelo general implementado corresponde a:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{1089} \sum_{t=1}^{10(6)} CT_{i,t} X_{i,t}$$

Sujeto a:

$$(i) \quad \sum_{t=1}^{10(6)} X_{i,t} = 1 \quad \forall i = 1 \dots 1098$$

(ii) Restricciones específicas a cada instrumento

donde:

$CT_{i,t}$: costo anual de aplicación de la tecnología t a la fuente i .
 $X_{i,t}$: variable de decisión que determina el tipo de tecnología que se aplica a la fuente tipo i . Toma el valor 1 si la tecnología t se aplica a la fuente i , y cero si no.

El límite superior de la sumatoria sobre i corresponde al número total de fuentes, mientras que el límite superior para la sumatoria sobre t corresponde al número de alternativas de control de emisiones para cada uno de los contaminantes, 10 en el caso del PM10 y 6 el caso del NO_x . La simulación se realiza utilizando un modelo de programación lineal, con variable binaria, el cual se formula utilizando el software GAMS y se resuelve con el solver CPLEX.

Al modelo planteado falta incorporar la restricción específica para cada tipo de instrumento de control de emisiones. La restricción específica para cada restricción es:

i. Sistema de permisos de emisión (EPS):

$$\sum_{i=1}^{1098} \sum_{t=1}^{10(6)} E_i OP_i (1 - EFF_{i,t}) X_{i,t} \leq E$$

donde:

E_i : emisiones totales de la fuente i en kilos/hora.
 OP_i : horas de operación de la fuente i .
 $EFF_{i,t}$: eficiencia de reducción de emisiones de la tecnología t aplicada a la fuente i .
 E : meta total de emisiones.





ii. Sistema de permisos ambientales (APS):

$$\sum_{i=1}^{1098} \sum_{t=1}^{10(6)} \sum_{k=1}^{289} E_i O P_i \alpha_{k',k} U B_{i,k} (1 - EFF_{i,t}) X_{i,t} \leq Q_k \quad \forall k = 1 \dots 289$$

donde:

- $\alpha_{k',k}$: factor de transferencia para las emisiones originadas en la zona k y que afectan a k'.
- $UB_{i,k}$: 1 si la fuente i se encuentra en la celda k, cero si no.
- Q_k : meta de calidad de aire para la zona k (la simulación se realizó con meta única para todas las zonas).

iii. Estándar de concentración en el efluente (STD):

$$\sum_{t=1}^{10(6)} \Omega_i (1 - EFF_{i,t}) X_{i,t} \leq \Omega \quad \forall i = 1 \dots 1098$$

donde:

- Ω_i : concentración en el efluente de la fuente i, calculado como la razón entre emisión y caudal, expresada en mg/m³.
- Ω : estándar de concentración en el efluente, en mg/m³.

En el caso particular de esta simulación se ha supuesto que las fuentes que no tienen opción de control, o que al incorporar la tecnología menos contaminante siguen superando la norma impuesta, son fuentes con la mejor tecnología disponible. Por ello pueden seguir emitiendo con esta mejor tecnología, aun cuando superen la norma.

Para efectos de programación de los modelos, las metas de cada uno de los instrumentos se imponen a través de E, Q_k y Ω . En el caso de EPS se impone una reducción porcentual sobre el total de emisiones, para APS se impone una reducción porcentual de las concentraciones en la peor celda, y para STD se impone un nivel de concentración de efluente.

V. RESULTADOS: COMPARACIÓN DE COSTOS ENTRE INSTRUMENTOS PARA SANTIAGO

En esta sección se comparan los costos de aplicar cada instrumento para reducir emisiones de PM-10 y de NO_x. Para hacer esta comparación se considera la concentración del contaminante en la peor celda, y compara cuánto disminuye esta concentración al aplicar el instrumento con niveles crecientes de exigencia de reducción. Los costos considerados sólo incluyen los costos de cumplimiento para las fuentes. No se consideran los costos de monitoreo, fiscalización ni de transacción.





Costos para PM-10

En la Figura V.1 se observan las curvas de costos totales de abatimiento de PM10 para los tres instrumentos analizados. Desde la perspectiva del regulador queda claramente establecido que el instrumento más costo-efectivo corresponde a APS, seguido en gran parte del rango de reducción porcentual por EPS y en tercer lugar se encuentra STD. Es interesante destacar que en los tramos inferiores de reducción los costos de utilizar EPS y STD son muy similares, incluso con un pequeño tramo en que STD es más costo-efectivo que EPS.

Varios otros resultados llaman la atención. Primero, que existe un amplio rango de reducción con valores negativos de costos. Es decir, en el agregado, las fuentes en realidad obtendrían beneficios si se reducen sus emisiones¹⁴. En particular, este beneficio es máximo para una reducción de 32% de la concentración en la peor celda, llegando a \$ 12.000 millones de pesos¹⁵. Ello se explica por el hecho de que muchas de las fuentes, al cambiar a gas natural, gastan menos dinero para producir la misma energía.

En principio, entonces, existe un conjunto de fuentes que tendrían los incentivos para cambiar su combustible (ya que reducen sus costos operacionales), y con ello mejorar la calidad del aire, incluso sin aplicar instrumentos de regulación. Frente a este resultado surge la pregunta ¿por qué estas fuentes no han cambiado su combustible? La respuesta a esta pregunta tiene dos rutas. La primera es que la tasa de descuento utilizada por cada empresa es significativamente mayor a la social utilizada en este caso (12%). Alternativamente, tienen proyectos de mayor rentabilidad que la reducción de la contaminación. Por otro lado, el acceso a gas natural no está abierto a todas las fuentes en la actualidad. En esta modelación no se ha considerado esta restricción, y se ha supuesto que el gas está disponible para todos los que quieran utilizarlo. Considerando ambos factores, es probable que los beneficios de aplicar permisos transables sean algo menores.

Un segundo resultado es que el máximo nivel de reducción de concentraciones alcanza sólo al 48%. Esto se debe a la existencia al interior de la ciudad de una megafuente (Central Termoeléctrica Renca), la cual dado su nivel de emisiones condiciona la concentración de PM10 alcanzable, limitando el nivel de reducción posible. Aun cuando aplique la mejor tecnología disponible, no puede reducir sus emisiones más allá de este valor.

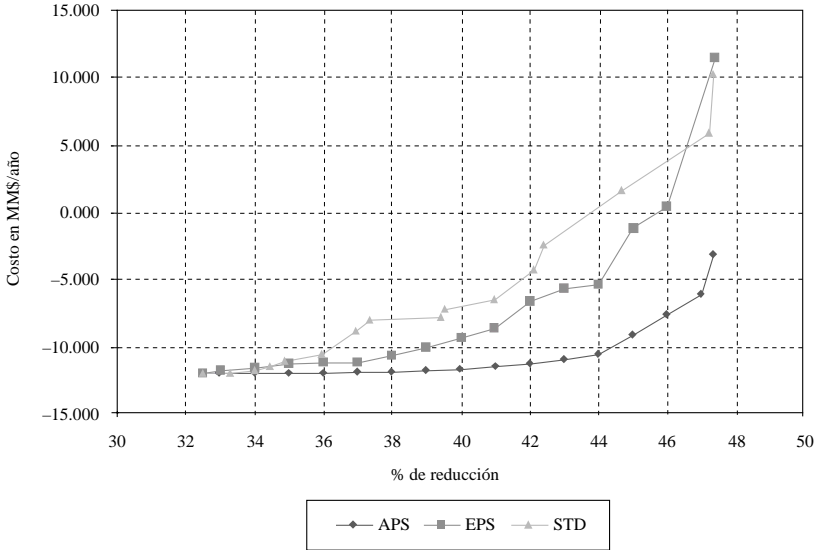
Tercero, los costos aumentan fuertemente cuando se superan reducciones de 40%. Esto se debe a que fuentes que con una meta de reducción menos exigente reemplazan combustible por gas natural (con la consiguiente reducción de costos operacionales), a medida que el nivel de exigencia aumenta, deben optar por una tecnología de fin de tubo, la cual significa una inversión mayor y un aumento de costos operacionales.

¹⁴ Por cierto habrá fuentes específicas que incurren en un costo.

¹⁵ Al considerar un precio del dólar de \$ 460 esto equivale a cerca de US 26 millones.



FIGURA V.1
COSTOS TOTALES DE ABATIMIENTO PARA PM-10



Fuente: Elaboración personal, ver Bravo (2000).

En función de los instrumentos actualmente utilizados en Santiago y tomando en consideración que la próxima meta de concentración en el efluente será de 32 mg/m³, es interesante analizar lo que sucede en el nivel de reducción 36% (punto en el cual el instrumento STD impone una meta de 32 mg/m³). Se observa que si bien APS mantiene su calidad de instrumento más costo-efectivo, el diferencial de costo con los otros instrumentos es cercano a los 1.000 millones de pesos al año. Por otro lado, al comparar EPS con STD, se observa que los costos asociados a cada uno de ellos son prácticamente iguales. Este resultado es bastante poderoso ya que indica en primer lugar que frente a las dificultades de implementación asociadas a un sistema APS parece más razonable desechar su utilización puesto que el diferencial de costo entre este instrumento y los otros dos es pequeño para el nivel de reducción de 36%.

Además, si las metas propuestas por la autoridad se mantienen, no tiene sentido continuar en el intento de establecer un sistema EPS ya que con un sistema STD bien establecido se puede alcanzar la meta propuesta sin gran pérdida de eficiencia económica. Sin embargo, a medida que el nivel de exigencia aumenta se hace mayor la ganancia en eficiencia económica que permite un sistema APS.

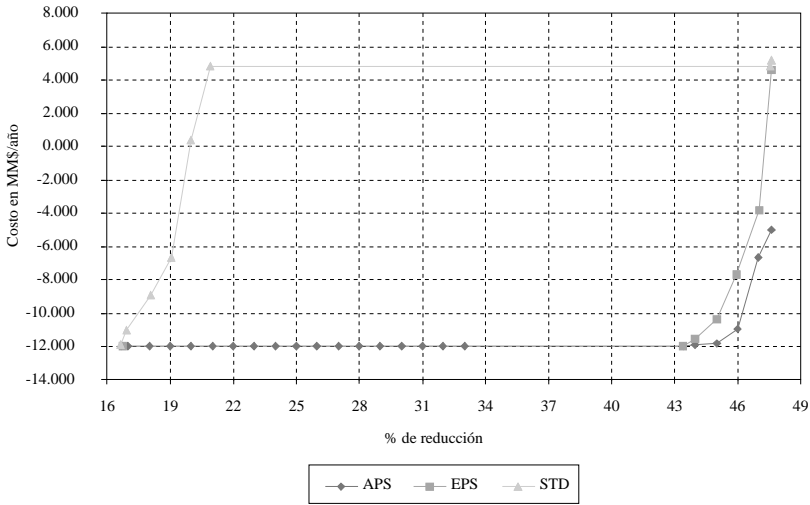
Comparación de costos para NO_x

En la Figura V.2 se observan las curvas de costos totales de abatimiento de NO_x para los tres instrumentos analizados. Al igual que en el caso del PM-10, se observan beneficios netos para las firmas a nivel agregado de aplicar control a sus emisiones. Específicamente, las fuentes pueden lograr un máximo benefi-

cio neto de \$ 16 mil millones por año a un nivel de reducción cercano al 13%. En forma similar al PM-10, la presencia de la megafuente limita las posibilidades de reducción a sólo un 50% del valor inicial.

Un resultado de gran importancia para este contaminante es la similitud de costos entre los instrumentos APS y EPS, los cuales se mantienen con iguales costos hasta cerca de un 45% de reducción, nivel bastante alto si se considera que el máximo nivel de reducción no alcanza el 50%. Este hecho permite desechiar la utilización de un sistema APS, ya que la ganancia de eficiencia económica en comparación con EPS es escasa y la complejidad de implementación del mismo es muy superior.

FIGURA V.2
COSTOS TOTALES DE ABATIMIENTO BAJO DIFERENTES POLITICAS PARA NO_x



Fuente: Elaboración personal, ver Bravo (2000).

El caso del instrumento STD es bastante particular, ya que se puede observar que los costos crecen rápidamente hasta una reducción del 21%, y luego “saltan” a una reducción del 48% al verse obligadas todas las fuentes a gas a aplicar LoNo_x. Lo costoso de aplicar un estándar uniforme plantea la necesidad de imponer estándares específicos por categoría de fuente, en el caso de que se decida no aplicar permisos transables.

Cabe señalar además que la autoridad regulatoria debe fijar con gran cuidado las metas ambientales a lograr. Si impone una restricción de 43% en la concentración en el peor receptor, utilizando EPS, las fuentes en el agregado perciben beneficios por \$ 12 mil millones por año. En cambio, si impone una restricción tan sólo de un 5% mayor, los costos se disparan a \$ 4 mil millones por año.

Se puede concluir que tanto para el PM-10 como para los NO_x, la incorporación del gas natural no solamente permite un mejoramiento de la calidad del aire, sino que además logra una reducción en los costos de operación de mu-



chas de las fuentes puntuales. En el agregado e independientemente del instrumento considerado, se obtiene una situación *win-win* al regular las emisiones para un amplio rango de reducción, mejorando la calidad del aire y obteniendo ahorros en los costos de operación de las fuentes. Por cierto los beneficios son mayores en el caso de aplicar APS.

VI. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La reciente disponibilidad de gas natural ha aumentado notablemente el rango de reducción de emisiones posibles de lograr a bajo costo en Santiago. Se puede reducir la concentración de PM-10 en la peor celda a casi la mitad aplicando instrumentos económicos, incluso con beneficios netos en el agregado. Algo similar ocurre para los NO_x .

Las ganancias en eficiencia de aplicar instrumentos económicos dependen de la meta específica que se busca alcanzar. En efecto, la aplicación de estándares de concentración uniformes similares a los vigentes en la actualidad para PM-10, tiene un costo que no presenta una diferencia sustancial con un sistema de permisos transables. Por ello su aplicación no se justifica. Para metas más exigentes de reducción, un sistema APS es significativamente menos costoso, y claramente se justifica la aplicación de un sistema de permisos transables. Respecto de la necesidad de hacer una diferenciación espacial de los permisos para PM-10, se concluye que sólo es necesario en el caso de exigir una reducción superior al 38% en las concentraciones de la peor celda.

En el caso de los NO_x la situación es distinta, ya que si bien nuevamente la posibilidad de utilizar gas natural permite a algunas fuentes reducir sus costos operacionales y con ello además disminuir sus emisiones, en este caso los permisos ambientales no son sustantivamente mejores que los permisos de emisión. Con ello, y debido a la mayor complejidad que significa el diseño de permisos ambientales, se establece como mejor alternativa la utilización de permisos de emisión sin diferenciación espacial para el caso de los óxidos de nitrógeno.

Por otro lado, es importante destacar que frente al estrecho rango en que se desarrollan las reducciones de concentración, y la importancia en términos de impacto económico que tiene la definición de una determinada meta, la falta de un análisis exhaustivo de costos aumenta la probabilidad de exigir innecesariamente reducciones muy costosas. Este resultado respalda la necesidad realizar estudios empíricos antes de fijar las metas de reducción, para de ese modo no terminar exigiendo reducciones innecesariamente onerosas. En particular, en este estudio se ha realizado un esfuerzo significativo para precisar funciones de costo apropiadas a las diferentes fuentes de Santiago.

Finalmente cabe señalar que en este estudio no se consideran los costos de monitoreo, fiscalización y transacción. Estos pueden determinar que, a pesar de las potenciales ganancias en eficiencia de utilizar permisos transables, los costos de implementación sean mayores a los de regulación directa. Si son significativamente mayores, puede suceder que estos costos más que compensen las ganancias en eficiencia, y como resultado sean de mayor costo para la sociedad. Otra limitación importante del estudio es que no se considera el impacto dinámico de aplicar permisos transables, en particular la ventaja de congelar las emisiones.



BIBLIOGRAFÍA

- Aranda, Paula (1996). "Costos y Efectividades de Opciones de Control para la Contaminación del Aire en Santiago". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Chile.
- Borregaard, Claro y Larenas (1995). "Uso de Instrumentos Económicos en la Política Ambiental: Análisis de Casos para una Gestión Eficiente de la Contaminación en Chile", *CONAMA*.
- Bravo, Rodrigo (2000). "Proposición y Evaluación de Instrumentos de Incentivo Económico para Mejorar la Calidad del Aire en Santiago: Aplicación al Caso de las Fuentes Fijas". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- CADE-IDEPE (1988). "Universo de Fuentes Emisoras de Contaminantes Atmosféricos e Inventario Real de Emisiones para Santiago".
- Cifuentes, L.; Vega, J.; Lave, L.B. (2000). "Mortalidad diaria por causa y nivel socioeconómico en Santiago, Chile". Entregado para su publicación.
- Coase, R.H. (1960). "The Problem of Social Cost", *The Journal of Law & Economics*, Volume III, pp. 1-44.
- CONAMA (1995). "Fundamentación Técnica Ley de Permisos de Emisión Transables".
- CONAMA-BIRF (1997). "Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana".
- Environmental Protection Agency (EPA) (1991). Handbook "Control Technologies for Hazardous Air Pollutants".
- Hahn, R. (1983). "Designing markets in transferable property rights: A practitioner's Guide". In: Joeres, E. and M. David (eds.). *Buying a better Environment: Cost Effective Regulation through Permit Trading*. Madison: University of Wisconsin Press, 83-97.
- Klaassen, Ger y Nentjes Andries (1997). "Creating Markets for Air Pollution Control in Europe and the USA", *Environmental and Resource Economics* 10: 125-146.
- Kolstad, Charles D. (2000). "Environmental Economics", New York, Oxford, Oxford University Press.
- Larraguibel, Luis (1998). "Costo-efectividad del cambio a Gas Natural", *Documento de Trabajo, PROGEA*.
- Montero, J.P.; Sánchez, J.M. y R. Katz (2001). "Análisis del Mercado de Emisiones de Material Particulado en Santiago", *Estudios Públicos* 81.
- Muñoz Magnino, Ricardo (1993). "Desarrollo de un Modelo de Celdas Múltiples para la Simulación de la Dispersión de Contaminantes en la Atmósfera: Aplicación a la Ciudad de Santiago", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- O'Ryan, Raúl (1993). "Cost Effective Policies to Improve Urban Air Quality in Developing Countries: Case Study for Santiago, Chile". Tesis para optar al grado de Doctor of Philosophy in Economics, Universidad de California, Berkeley.
- O'Ryan, Raúl (1996). "Cost-Effective Policies to Improve Urban Air Quality in Santiago, Chile", *Journal of Environmental Economics and Management* 31, 302-313, Article N° 0046.



- O’Ryan, Raúl (1999). “Actualización y Aplicación de Permisos de Emisión Transables a la Contaminación Atmosférica de la Región Metropolitana en el contexto del Plan de Descontaminación”. Informe Final, preparado para CONAMA.
- O’Ryan, Raúl y Larraguibel, Luis (2000). “Contaminación del Aire en Santiago: Estado Actual y Soluciones”, *Documento de Trabajo* N° 75, Serie Economía, Centro de Economía Aplicada, Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- O’Ryan, Raúl (1999). “Actualización y Aplicación de Permisos de Emisión Transables a la Contaminación Atmosférica de la Región Metropolitana en el contexto del Plan de Descontaminación”, *Informe Final*, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile.
- Pigou, Arthur C. (1962). “The Economics of Welfare”, 4ª edición, Macmillan, Londres.
- Pascó-Font, Alberto (1998). “Cuando Contaminar No Cuesta: Economía del Medio Ambiente”, *Consortio de Investigación Económica*.
- Perry, Robert H. y Chilton, Cecil H. (1973). “Chemical Engineering Handbook”, fifth edition. McGraw-Hill.
- Plott, C. (1983) “Externalities and corrective policies in experimental markets”, *Economic Journal*, 93, 106-127.
- Radian International LLC, TESAM S.A. (1999). “Desarrollo de un Programa Costeable de Control de Emisiones para CONAMA R.M.”, *Informe Final*, CONAMA R.M.
- Sanhueza, P.; Vargas, C.; Jiménez, J. (1999). “Mortalidad diaria en Santiago y su relación con la contaminación atmosférica”, *Rev Med Chil* 127(2): 235-42.
- Tietenberg, T. H. (1985). “Emissions Trading, an Exercise in Reforming Pollution Policy”, *Resources for the Future*.
- Tietenberg, T. H. (1988). “Environmental and Natural Resources Economics”, 2° ed, Glenview, Scott, Foresman.
- Tietenberg, T. H. “Applying Emissions Trading to the Control of Air Pollution in Santiago: Lessons From the U.S. Experience”.
- US EPA (1995) “Air Pollution Emissions Factors, Document AP42”, U.S. Environmental Protection Agency (disponible en sitio Web)
- Vatavuk, William M. (1990). “Estimating Costs of Air Pollution Control”, Lewis Publishers.
- Villena, M. y Villena, M. (1998). “Analysing Economic Strategies for Air Pollution Control in Santiago, Chile: An Empirical Study”. Department of Land Economy, University of Cambridge.



ANEXO 1

**EFICIENCIAS DE REDUCCION PARA DIVERSAS
OPCIONES DE CONTROL**

CUADRO A1.1
EFICIENCIAS DE REDUCCION DE EMISIONES DE PM-10 PARA
TECNOLOGIAS DE FIN DE TUBO

Proceso	Ciclón	Multiciclón	Filtros de Manga	Lavador Venturi	Precipitador Electrostático
Calefactores y Calderas a Carbón	33	70	99	96	97
Calefactores y Calderas a Leña	15	50	99	89	95
Calefactores y Calderas a Pet-6	5	30	99	86	94
Calefactores y Calderas a Pet-5	5	30	99	86	94
Calefactores y Calderas a Pet-2	5	30	99	86	94
Hornos a Carbón	40	82	99	98	99
Hornos a Leña	15	50	99	89	95
Hornos a Pet-6	5	30	99	86	94
Hornos a Pet-5	5	30	99	86	94
Hornos a Pet-2	5	30	99	86	94
Fundiciones de Al, Cu, Br	31	80	99	95	90
Chancado de Piedra y Grano	41	85	99	98	91
Limpieza de Piedra y Grano	35	60	99	98	98
Plantas de Asfalto	40	89	99	97	94

Fuente: Aranda [1996], página 33.

CUADRO A1.2
EFICIENCIA DE REDUCCION QUEMADORES LoNO_x

Combustible	Eficiencia de Reducción de NO _x
Petróleo-5 y 6	30%
Petróleo-2	45%
Gas Natural	50%

Fuente: Informe de Radian International.

CUADRO A1.3
 EFICIENCIA DE REDUCCION DE EMISIONES PARA PM-10,
 EXPRESADA EN PORCENTAJE, PARA CAMBIO DE COMBUSTIBLES

Proceso	Cambio a Petróleo 6	Cambio a Petróleo 5	Cambio a Petróleo 2	Cambio a Gas
Calefactores y Calderas a Carbón	65	80	94	99
Calefactores y Calderas a Leña	63	79	94	99
Calefactores y Calderas a Pet-6	-	43	83	97
Calefactores y Calderas a Pet-5	-	-	69	94
Calefactores y Calderas a Pet-2	-	-	-	86
Hornos a Carbón	-	-	-	-
Hornos a Leña	-	-	-	-
Hornos a Pet-6	-	43	83	97
Hornos a Pet-5	-	-	69	94
Hornos a Pet-2	-	-	-	88
Fundiciones de Al, Cu, Br	-	-	-	-
Chancado de Piedra y Grano	-	-	-	-
Limpieza de Piedra y Grano	-	-	-	-
Plantas de Asfalto	-	-	-	-

Fuente: Aranda [1996], página 33.

CUADRO A1.4
 EFICIENCIA DE REDUCCION DE EMISIONES PARA NO_x,
 EXPRESADA EN PORCENTAJE, PARA CAMBIO DE COMBUSTIBLES

Combustible actual	Cambio a Petróleo 6	Cambio a Petróleo 5	Cambio a Petróleo 2	Cambio a Gas
Carbón	60	61	77	86
Leña	-	-	-	24
Petróleo-5 y 6	-	-	61	77
Petróleo-2	-	-	-	41

Fuente: Aranda [1996], página 42.



ANEXO 2

FACTORES DE TRANSFERENCIA PARA SANTIAGO

La metodología para el cálculo de los factores de transferencia fue la siguiente¹⁶:

- Se trabajó con emisión en una sola celda, ubicada en el centro de la malla de cálculo, de tal forma que el efecto del borde del dominio tenga poca relevancia. La emisión fue definida arbitrariamente en 10 g/s, con un ciclo diario simple, consistente en emisiones uniformes entre las 6:00 y 18:00 horas (12 horas de emisión) y emisiones nulas en el resto de las horas.
- Se corrió el modelo con estas emisiones para 28 días de episodio entre 1989 y 1990. Siendo estos días de alta contaminación, se supone que los factores calculados son representativos de condiciones de episodio.
- Las concentraciones obtenidas sobre el dominio de modelación, promediadas para los 28 días simulados, pueden interpretarse como los factores de influencia de la celda central sobre las demás cuadrículas.

Los coeficientes de transferencia obtenidos reflejan el impacto de una unidad de emisión en los niveles de concentración de cada celda de la grilla, para condiciones meteorológicas negativas.

Los resultados se presentan en la Figura A2.1. El nivel 100 indica la zona de máximo impacto, y corresponde a la celda en que se ubica la fuente de emisión. El resto de los números representa la influencia relativa de la celda central sobre las celdas que se encuentran a su alrededor. Los resultados muestran que la mayor influencia promedio se encuentra hacia el suroeste de la celda donde se ubica la fuente de emisión.

Es necesario mencionar la independencia que estos factores de dispersión presentan frente a variaciones espaciales en la grilla. Los factores son válidos para cualquier celda al interior de la grilla ya que los campos de viento simulados son bastante uniformes espacialmente, debido a que el área incluida en el dominio (34 km x 34 km) no incorpora relieve significativo. Por lo tanto, los factores de dispersión no cambian en forma importante entre un sector y otro de la ciudad. Además, los puntos con mayores emisiones se encuentran al oeste de la ciudad, lejos de la Cordillera de los Andes.

¹⁶ Muñoz Magnino, Ricardo, 1993, "Desarrollo de un Modelo de Celdas Múltiples para la Simulación de la Dispersión de Contaminantes en la Atmósfera: Aplicación a la Ciudad de Santiago", páginas 130-131.





FIGURA A2.1
COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA PARA SANTIAGO
(Valores en % referidos a la celda 100)

					6,16		
				5,39	12,71	5,93	
5,10	7,93	12,41	20,50	34,96	100,00	14,14	7,13
5,84	8,01	11,18	15,49	20,37	26,88	7,65	5,25
5,06	6,35	7,96	9,90	11,06	11,86	5,83	
		5,07	5,79	5,94	5,89		

Fuente: “Cost-Effective Policies to Improve Urban Air Quality in Santiago, Chile”, Raúl O’Ryan [1996], Article N° 0046 “Journal of Environmental Economics and Management”.

Los factores fueron calculados para una emisión de 10 g/s por 12 horas, para días de episodio en Santiago. La celda 100% corresponde a 30,9 µg/m³. Se incluyen solamente los valores mayores al 5%.

