

ESTÁNDARES VS SISTEMAS DE PERMISOS TRANSABLES CON COSTOS DE FISCALIZACIÓN

Aplicación al caso de fuentes fijas en Bogotá*

*Germán Darío Fajardo Barreto
y Carlos Chávez Rebolledo***

RESUMEN

Estudiamos la propiedad de costo efectividad de diferentes estrategias de regulación tendientes a mejorar la calidad ambiental. Nuestro análisis prospectivo considera la aplicación de sistema de permisos de emisión transable (SPET), sistema de permisos ambientales transables (SPAT) y estándares (Est) de fuentes fijas en Bogotá, Colombia. Un modelo de simulación numérica permitió obtener costos de cumplimiento de cada sistema de regulación, los cuales fueron comparados con la calidad ambiental inducida. Los resultados permiten concluir que el instrumento de más costo efectivo para cualquier meta de calidad ambiental es el SPET, seguido del SPAT y finalmente los Est. Además, el artículo presenta un nuevo resultado conceptual de la elaboración de estrategias de fiscalización para instrumentos de regulación que consideran la contaminación de forma espacialmente diferenciada. Los

* *Palabras clave:* política ambiental, costo-efectividad, fiscalización, costos de cumplimiento. *Clasificación JEL:* K42, L51, Q52, Q58. Artículo recibido el 8 de septiembre de 2009 y aceptado el 4 de abril de 2011.

** G. D. Fajardo Barreto, programa Magister en Economía de Recursos Naturales y del Medio Ambiente, Universidad de Concepción, Chile (correo electrónico: gedafaba@hotmail.com y gfajardo@udec.cl). C. Chávez Rebolledo, investigador responsable núcleo de investigación en Economía Ambiental y de Recursos Naturales-ICM, investigador responsable, núcleo de investigación de Economía Ambiental y de Recursos Naturales-ICM, departamento de Economía, Universidad de Concepción, Chile (correo electrónico: cchavez@udec.cl).

resultados sugieren que, para cualquier meta de mejoramiento ambiental, inducir cumplimiento en un SPAT es más barato que hacerlo en cualquier otro sistema de regulación considerado.

ABSTRACT

We study the cost effectiveness property of different control strategies for improving environmental quality. Our prospective analysis considers the application of Transferable Emissions Permit System (TEPS), Transferable Ambient Permit System (TAPS) and Standards (Std) applied on fix sources in Bogota-Colombia. A numerical simulation model allowed us to obtain costs of each regulatory system, which were compared with associated environmental quality. The results show that the most cost effective regulation for any environmental quality goal is TEPS, followed by TAPS and finally Std. In addition, the paper presents a new conceptual result on the enforcement strategies for a regulatory instrument that considers a spatially differentiated pollutant. The results suggest that for any goal of environmental improvement, a TAPS induce compliance cheaper than in any other regulatory system under consideration.

INTRODUCCIÓN

Los reguladores ambientales buscan la manera de controlar la contaminación generada por el crecimiento económico y el constante desarrollo de zonas urbanas. El enfoque de política que tradicionalmente ha sido aplicado es el de regulación directa, en el cual las autoridades establecen los estándares por cumplir y fiscalizan su cumplimiento. Sin embargo, otros instrumentos de política basados en incentivos económicos han ganado aceptación en los años recientes, debido a sus potenciales ventajas en costos y al desarrollo de incentivos de innovación tecnológica para el abatimiento. Sin embargo, algunos investigadores han destacado que la aplicación de este tipo de instrumentos requiere voluntad política, desarrollo de un marco normativo acorde y fortalecimiento de la capacidad técnica y de fiscalización del regulador (Hanley *et al*, 1997; Hahn y Noll, 1982).

La elaboración e instrumentación del componente de fiscalización constituye un factor determinante para un esquema de regulación que busque inducir adecuados niveles de cumplimientos. Este aspecto de la elaboración

regulatoria posee posiblemente mayor importancia en los países en desarrollo, en los cuales la vigilancia y el control son tradicionalmente débiles (Blackman, 2009; Palacios y Chávez, 2002), se presenta alta transgresión y los recursos empleados son aportados casi exclusivamente por la autoridad ambiental local, representando recursos públicos valiosos, que de ser sobreestimados pueden poseer un alto costo de oportunidad.

En este artículo estudiamos, mediante simulaciones numéricas, la propiedad de costo efectividad de diferentes estrategias de regulación tendientes a mejorar la calidad ambiental. Nuestro análisis prospectivo considera la aplicación de sistema de permisos de emisión transable (SPET), sistema de permisos ambientales transables (SPAT) y estándares (Est). La información para instrumentar las simulaciones numéricas proviene de fuentes fijas en Bogotá.

El estudio numérico nos permite dilucidar, para el caso considerado, si las potenciales ganancias asociadas a incentivos económicos como base de la regulación ambiental se mantienen cuando se consideran los costos de inducir cumplimiento. El resultado de las simulaciones permite también obtener estimaciones respecto a los órdenes de magnitud de tales posibles ganancias.

Los objetivos específicos del trabajo son: *i*) calcular los costos agregados de cumplimiento (CAC) de estrategias para el control de la contaminación atmosférica basadas en los estándares actuales (Est) y otros esquemas basados en incentivos económicos como los sistemas de permisos de emisión transable (SPET) y los sistemas de permisos ambientales transables (SPAT), y *ii*) cuantificar el efecto en la calidad del aire que produce la aplicación de cada estrategia de control y de esta manera comparar las distintas políticas. Para lograr estos objetivos se construyó un modelo de simulación numérica de costos, el cual permitió obtener para cada política los costos agregados de abatimiento (CAA) y los costos agregados de fiscalización (CAF) que aseguran completo cumplimiento y la calidad ambiental urbana promedio resultante para cada panorama simulado.

En el contexto latinoamericano la aplicación de este tipo de enfoques es escasa; el principal referente es el Programa de Compensación de Emisiones (PCE) de Santiago de Chile, el cual funciona desde 1994 y busca controlar las emisiones de material particulado de las fuentes fijas del área metropolitana. Diversos estudios entre los que destacan O’Ryan, 1996; O’Ryan y Bravo, 2001, y Villena, 1997, han analizado de manera *ex post* la propiedad de costo

efectividad de la aplicación de instrumentos de incentivo económico para el control de la contaminación en Santiago de Chile, encontraron que una política que considere la contaminación de manera espacialmente diferenciada es de más costo efectiva que las regulaciones de comando y control o de sistema de permisos de emisión. Ninguno de estos trabajos consideró los costos de inducir cumplimiento en los análisis de costo efectividad.¹

Al igual que en otras partes del mundo, en Bogotá la regulación directa ha sido la estrategia tradicional para el control de la contaminación atmosférica generada por las industrias. Sin embargo, actualmente se presentan graves problemas de contaminación por material particulado (Gaitán *et al*, 2007; SDA, 2007), el cual ha sido asociado con enfermedades respiratorias en la población (Lozano, 2004) y que tiene como principal origen la utilización de combustibles fósiles por parte de las industrias (fuentes fijas) y el parque automotor (fuentes móviles). A pesar del desarrollo y fortalecimiento del marco regulatorio e institucional en los pasados 20 años, los esfuerzos institucionales para un adecuado control de la contaminación del aire han sido discontinuos, lo que ha generado que la información representativa disponible sea escasa, dispersa y en algunos casos de mala calidad (Uribe, 2004) y, peor aún, los índices de calidad del aire en Bogotá incluso presentan valores superiores a las normas.

Este artículo amplía los elementos para la adecuada elaboración de regulaciones en países en desarrollo, incorporando condiciones de fiscalización que garantizan completo cumplimiento; analiza sus consecuencias, tendientes al mejoramiento de la calidad del aire para el caso de una zona urbana en la América Latina, y propone, a la luz de los resultados, una explicación del porqué la regulación actual no ha permitido mejores resultados de calidad ambiental.

Es importante destacar que este artículo realiza dos tipos de aportaciones respecto a la bibliografía relacionada con el control de la contaminación atmosférica basada en incentivos económicos. Primero, presentamos una nueva condición teórica en relación con la elaboración de la fiscalización en regulaciones que abordan la contaminación de manera espacialmente diferenciada, la cual permite estimar los costos de inducir cumplimiento en este tipo de regulaciones. Segundo, tomando un estudio de caso relevante para la región, se valida y compara numéricamente la condición teórica encon-

¹ En el contexto latinoamericano, algunos trabajos de simulación numérica que han considerado costos de fiscalización son Clerger *et al* (2009) y Ponce y Chávez (2005).

trada, ampliándose de esta manera la evidencia para países en desarrollo respecto a los costos de cumplimiento que incluyen aspectos de fiscalización.

El trabajo se organiza de la siguiente forma: la sección I presenta el marco conceptual relativo a las estrategias de fiscalización que aseguran perfecto cumplimiento y la manera de obtener los costos de cumplimiento según el sistema de regulación considerado. La sección II expone una descripción breve del caso de estudio y la metodología empleada para el desarrollo de las simulaciones numéricas. La sección III presenta los resultados obtenidos para los costos de abatimiento, fiscalización y cumplimiento, además se ofrece un indicador que relaciona la información de costos con la calidad ambiental, con el fin de extrapolar resultados generales para el total de fuentes de la ciudad. Por último, se presenta las conclusiones.

I. MARCO CONCEPTUAL: CUMPLIMIENTO EN POLÍTICA DE EST, SPET Y SPAT

Esta sección presenta para cada instrumento de regulación un modelo general de cumplimiento individual de las empresas y sus consecuencias para la elaboración de fiscalización que permita alcanzar completo cumplimiento. Además, presenta la manera de estimar los costos agregados de cumplimiento por tipo de regulación, los cuales incluyen costos agregados de abatimiento y costos agregados de fiscalización.

1. Modelo de cumplimiento individual

Para el modelo básico, supondremos que existe un conjunto de n empresas heterogéneas indizadas por $i = 1, \dots, n$, neutrales al riesgo. Cada empresa posee costos de control de emisiones (abatimiento) representados por $C_i(e_i)$. La función de costos de abatimiento de la empresa es estrictamente decreciente y convexa respecto a las emisiones, por tanto, $C'_i(e_i) < 0$ y $C''_i(e_i) > 0$. Con el propósito de inducir cumplimiento de la regulación ambiental, consideramos un regulador que cuenta con los instrumentos para realizar vigilancia con el propósito de detectar infracciones e imponer sanciones en el caso que una infracción es detectada. Denotamos π_i como la probabilidad de que una fuente sea auditada, mientras que $f(v_i)$ es la sanción que se le impone a la firma por transgredir las emisiones permitidas; v_i es el tamaño de la infracción. La función de sanción es creciente y convexa en el nivel de

transgresión $f'(v_i) > 0$ y $f''(v_i) > 0$ y toma valores mayores a 0 para transgresiones muy pequeñas, lo cual implica $f'(0) > 0$.

Con base en lo anterior, en una política de Est el regulador establece estándares individuales por cumplir por las fuentes $s_i, \forall i = 1, \dots, n$, con lo cual una unidad de transgresión se establece de acuerdo con $v_i = e_i - s_i$, y la sanción cumple que $f(e_i - s_i) = 0$ para $e_i \leq s_i$. Chávez (2000) expone que el cumplimiento para una fuente en un sistema de estándares, es decir $e_i = s_i$, se basa en una comparación simple entre el costo marginal de abatimiento de cumplir el estándar contra la sanción marginal esperada de transgredir una pequeña unidad de emisión del estándar permitido, con lo cual se obtiene la siguiente condición:

$$-C'_i(s_i) \leq \pi_i f'(0) \quad (1)$$

Para el caso de un SPET competitivo el regulador fija una emisión agregada \bar{E} y las fuentes al final mantienen un número de permisos de emisión l_i cumpliéndose que

$$\sum_{i=1}^n l_i = \bar{E}$$

con estos permisos las fuentes deben cubrir sus emisiones. Así, la transgresión se establece como $v_i = e_i - l_i$ y la función de sanción por emisión se establece de acuerdo con $f(e_i - l_i)$, cumpliéndose que $f(e_i - l_i) = 0$ para $e_i \leq l_i$. Con base en esto y por la condición $-C'_i(e_i) = p, i = 1, \dots, n$, en la cual las fuentes igualan su costo marginal al precio de emisión del permiso p , se obtiene que el cumplimiento de la empresa se basa en la comparación del precio y la sanción marginal esperada por no cubrir sus emisiones con permisos (Malik, 1990, y Stranlund y Dhanda, 1999), ante lo cual se tiene:

$$p \leq \pi_i f'(0) \quad (2)$$

Para el caso de un SPAT en el presente artículo se presenta la extensión teórica necesaria para la aplicación de fiscalización con sanción de emisión, que asegura completo cumplimiento. Dado que este instrumento aborda el problema de la contaminación de manera espacialmente diferenciada, se entiende que existe una relación funcional entre las emisiones de las fuentes ($e_i, i = 1, \dots, n$) y la concentración de contaminante en cada punto recep-

tor de interés ($CA_j, j = 1, \dots, J$), la cual se representa con $f_j(e_1, \dots, e_n)$.² Esta relación se expresa de forma simplificada mediante factores de ajuste denominados coeficientes de transferencia a_{ij} , que representan cómo afecta la emisión de la fuente i a la concentración de contaminante en el punto receptor j (Kolstad, 2001); formalmente, eso implica:

$$a_{ij} = \frac{\partial CA_j}{\partial e_i}, \quad \forall j = 1, \dots, J \tag{3}$$

$$CA_j = f_j(e_1, \dots, e_n) = \sum_{i=1}^n a_{ij} e_i, \quad \forall j = 1, \dots, J \tag{4}$$

Montgomery (1972) establece que el regulador puede crear una cantidad de permisos de calidad ambiental por cada punto receptor de interés L_j , que establece igual número de mercados. En este contexto las fuentes pueden emitir hasta cuando la concentración de contaminante generada por su emisión en cualquier punto receptor no exceda la cantidad de permisos que posea para dicho punto l_{ij} , en el que debe cumplir que $e_i a_{ij} \leq l_{ij}, \forall j \in J$; además, la suma de permisos de todas las fuentes por punto receptor debe ser igual a la cantidad total definida inicialmente, cumpliéndose

$$\sum_{i=1}^n l_{ij} = L_j, \quad \forall j \in J$$

La transgresión en emisión en este instrumento se presenta cuando para algún punto receptor j se tiene $v_{ij} = e_i - l_{ij}/a_{ij} > 0$, cumpliéndose que $f(e_i - l_{ij}/a_{ij}) = 0$ para $e_i \leq l_{ij}/a_{ij}, \forall j \in J$, esto implica que, en caso de cometer una transgresión en varios puntos receptores, la fuente enfrenta un conjunto de sanciones de acuerdo con el número de mercados en los cuales debe participar $f(e_i - l_{i1}/a_{i1}) + f(e_i - l_{i2}/a_{i2}) + \dots + f(e_i - l_{ij}/a_{ij})$, lo que genera un total de sanciones igual a

$$\sum_{j=1}^J f(e_i - l_{ij}/a_{ij})$$

² En muchos casos se puede suponer que esta relación sea lineal, siempre y cuando se tenga contaminantes no reactivos y valores promedio de emisión y calidad del aire (Montgomery, 1972). Lo anterior puede adaptarse al caso del material particulado.

Conforme a lo anterior, la condición de cumplimiento de una empresa surge de comparar para todos los puntos receptores la ganancia marginal y el costo marginal esperado por transgredir en una unidad la calidad ambiental. Así, la fuente estará en cumplimiento si se tiene para cada punto receptor:³

$$p_j \leq \pi_i f'(0)/a_{ij}, \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (5)$$

La ecuación (5) implica que la fuente deberá realizar el análisis de comparación para todos los mercados en los cuales debe participar; sin embargo, el regulador deberá aplicar una única estrategia de supervisión, ya que se fiscaliza la fuente y no los puntos receptores, lo cual conduce a un resultado respecto a la elaboración apropiada de una estrategia de fiscalización que se expone al final de la siguiente sección.

2. Fiscalización para inducir cumplimiento

Debido a las características propias de cada instrumento de regulación, se debe aplicar una estrategia de supervisión diferente que permita alcanzar completo cumplimiento en cada uno. Las estrategias que se muestran a continuación, se basan en sancionar las transgresiones de las fuentes y son obtenidas a partir de los resultados de la sección anterior.

Para una política de Est y de acuerdo con la ecuación (5), la estrategia de supervisión que garantiza perfecto cumplimiento, $e_i = s_i$, al mínimo costo, está dada por:

$$\pi_{iEST} = \frac{-C'_i(s_i)}{f'(0)}, \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

La ecuación (6) indica que la fiscalización debe hacerse de manera selectiva, aplicando mayor (menor) esfuerzo a las fuentes con mayores (menores)

³ La condición expuesta en la ecuación (5) se obtiene cuando la fuente busca minimizar sus costos agregados de control (éstos se componen por gastos en abatimiento, en permisos y sanciones esperadas para cada mercado) y elige el nivel de emisiones y la demanda de permisos para cada punto receptor j .

$$\underset{e_i, l_{ij}}{\text{Mín}} C_i(e_i) + \sum_{j=1}^J p_j (l_{ij} - l_{ij}^0) + \pi_i \sum_{j=1}^J f(e_i - l_{ij}/a_{ij}) \quad \text{s.a.} \quad e_i \geq \frac{l_{ij}}{a_{ij}} > 0, \quad \forall j \in J$$

El término l_{ij}^0 corresponde al número de permisos inicialmente asignados por el regulador a la fuente i para el mercado del punto receptor j .

costos, lo que implica que el regulador debe tener un amplio conocimiento acerca de los costos de control de las fuentes, ya que esta información es relevante.

Para el caso de un SPET, la ecuación (2) permite concluir que para alcanzar perfecto cumplimiento la estrategia de supervisión es de acuerdo con:

$$\pi_{i_{SPET}} = \frac{p}{f'(0)}, \quad i = 1, \dots, n \quad (7)$$

En este caso, si las sanciones se aplican uniformemente, entonces la estrategia de supervisión es igual para todas las fuentes e independiente de la información de sus costos, lo cual implica que no es necesario focalizar esfuerzos de vigilancia.

Para el caso de un SPAT, como se expuso al final de la sección anterior, el regulador sólo tendrá que aplicar una única estrategia de supervisión para cada fuente, con lo cual la ecuación (5) permite concluir que la probabilidad de supervisión necesaria para alcanzar perfecto cumplimiento en cada punto receptor $e_i = l_{ij}/a_{ij}, \forall j \in J$ se logrará con la que garantice el cumplimiento en el punto más exigente:

$$\pi_{i_{SPAT}} = \left[\underset{j}{Máx} \left(\frac{p_j}{f'(0)} a_{ij} \right), j = 1, \dots, J \right], \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

La ecuación (8) implica que la supervisión en un SPAT debe realizarse de manera focalizada con base en características propias de la fuente y al punto receptor donde la fuente tiene el mayor costo marginal de emisión, por afectar la calidad ambiental, lo cual se representa por el producto del coeficiente de transferencia a_{ij} y el precio del permiso de calidad ambiental p_j . Lo anterior es un resultado nuevo que extiende el conocimiento referido a esfuerzos de fiscalización en políticas de incentivo económico y, además, nos permite calcular los costos de fiscalización de una política de SPAT considerada en este artículo.

3. Costos agregados de cumplimiento: Abatimiento y fiscalización

Para cada tipo de regulación ambiental considerada en este estudio se procedió a determinar los CAC como la suma de los CAA y CAF. Los CAA se

obtienen como la suma de los costos incurridos por las fuentes para cumplir una determinada regulación. En el caso de una política de Est se obtienen los costos de alcanzar los estándares permitidos $C_i(s_i)$. Para el caso de un SPET, los costos de abatimiento individual están determinados por la elección, de parte de cada fuente, de un nivel de emisiones con base en el precio de equilibrio de los permisos de emisión $C_i(e_i(p))$. Finalmente, para un SPAT los costos de abatimiento de cada empresa están determinados por la elección del nivel de emisiones individuales con base en la suma de los precios de equilibrio de calidad ambiental de cada punto receptor ponderado por los respectivos coeficientes de transferencia

$$C_i \left(e_i \left(\sum_{j=1}^J p_j a_{ij} \right) \right)$$

Por su parte, los CAF se obtienen como el producto del costo de una unidad de auditoría por fuente w , el cual se mantiene constante entre fuentes, el número de fuentes por regular n y la probabilidad de supervisión para las fuentes que se expuso en la sección anterior y varía en cada instrumento de política.⁴

Los CAC que se muestran a continuación se exponen para cada instrumento de regulación, en los que el primer elemento de las expresiones corresponde a los CAA y el segundo corresponde a los CAF. Para una regulación de Est los CAC están dados por

$$CAC_{EST} = \sum_{i=1}^n C_i(s_i) + w \sum_{i=1}^n \frac{-C'_i(s_i)}{f'(0)} \quad (9)$$

Para una regulación de SPET, los CAC son

$$CAC_{SPET} = \sum_{i=1}^n C_i(e_i(p)) + wn \frac{p}{f'(0)} \quad (10)$$

Para una regulación de SPAT, los CAC son

$$CAC_{SPAT} = \sum_{i=1}^n C_i \left(e_i \left(\sum_{j=1}^J p_j a_{ij} \right) \right) + w \sum_{i=1}^n \left[\text{Máx}_j \left(\frac{p_j}{f'(0)} a_{ij} \right), j = 1, \dots, J \right] \quad (11)$$

⁴ En este artículo hemos supuesto que el valor de w permanece constante entre las fuentes; sin embargo, este podría variar por características propias de las fuentes como la localización, infraestructura de supervisión o equipo de combustión, entre otras; véase por ejemplo Stranlund *et al* (2009).

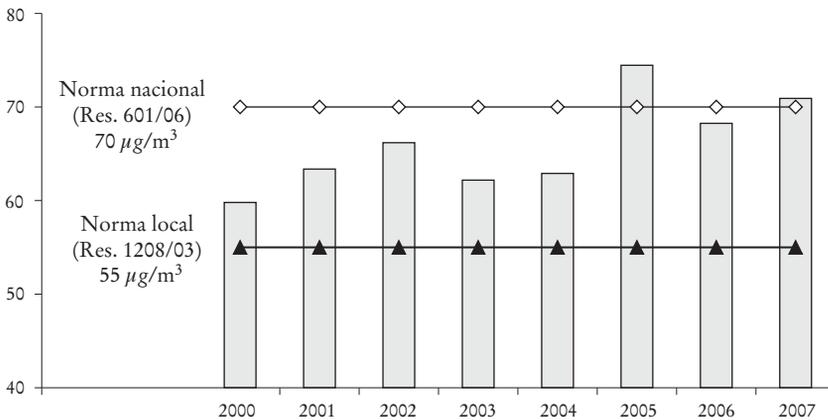
II. DATOS Y CALIBRACIÓN DE MODELO

Esta sección presenta un contexto general del estudio de caso abordado. Inicialmente expone una breve descripción del problema actual de calidad del aire, la normativa y la situación base en relación con la información recabada. En seguida se presenta los modelos de simulación numérica de abatimiento y fiscalización considerados con base en la sección I.

1. Descripción breve del estudio de caso: Fuentes fijas en Bogotá

a) *Calidad del aire.* Actualmente Bogotá presenta un problema de calidad del aire debido al material particulado, principalmente el PM10, como se muestra en la gráfica 1. Los principales generadores son las fuentes fijas y móviles, con una aportación de emisión calculada en 60 y 40%, respectivamente (DAMA/UNIANDÉS, 2004).

GRÁFICA 1. Concentraciones promedio anual de PM10 en Bogotá ($\mu\text{gr}/\text{m}^3$)



FUENTE: Elaboración propia con base en SDA (2008a y 2007).

De los contaminantes que se vigilan en la ciudad de Bogotá, el PM10 es el único para el que se superan de manera continua los estándares de calidad, específicamente en los sectores del centro y occidente de la ciudad (Gaitán *et al*, 2007, y SDA, 2007). Por lo anterior, en 2006 las localidades de Puente Aranda, Fontibón y Kennedy, que han sido las más afectadas y que concentran el mayor número de industrias, fueron clasificadas como áreas fuentes

de contaminación clase 1 por PM10, para lo cual se estableció una norma de estándares de concentración de emisión más estrictos para las fuentes fijas ubicadas en dichas localidades y se ordenó suspender los procesos de combustión que usen combustibles sólidos y crudos pesados que no cumplan con la normativa actual.⁵

b) *Normativa de fuentes fijas*. La normativa para el control de emisiones en Bogotá tiene principalmente una estructura de regulación directa que se basa en estándares de las características de los ductos de emisión, en estándares de concentración de emisión de contaminantes de interés, los cuales especifican los tipos de combustibles y equipos de combustión empleados. Además, las fuentes deben cumplir un límite máximo de emisión por área del predio industrial, el cual se calcula como la suma de las emisiones puntuales de las fuentes que se encuentran por empresa, relacionadas con el área bruta del predio en el cual se encuentran; para dicho valor calculado, no se podrá superar un valor establecido, según el tipo de contaminante (véase apéndice 1).

Por otra parte, las actividades de fiscalización se enfocan en dos aspectos: *i*) en la realización de auditorías a los análisis isocinéticos, los cuales son desarrollados por empresas consultoras acreditadas, y *ii*) en el seguimiento sectorial a los expedientes de las fuentes, lo cual es complementado con visitas y expedición de conceptos técnicos.⁶ Conforme a esto, el incumplimiento para una fuente se presenta cuando no cumple ya sea con las normas de concentración, con el límite de emisión o con los requerimientos técnicos del ducto de emisión.

Las sanciones a fuentes fijas pueden ser multas u otras medidas, las cuales son calificadas y tasadas por la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) que es la autoridad ambiental local; estas multas pueden oscilar entre 7.82 y 70 381 dólares/día, dependiendo del tipo de infracción y de los efectos ambientales. Otras medidas de sanción son la suspensión de actividades de la fuente

⁵ Áreas de contaminación alta clase 1 son las que excede, con una frecuencia mayor a 75% de los casos, la norma anual de calidad del aire para un contaminante dado. En estas áreas deberán tomarse medidas de contingencia, se suspenderá el establecimiento de nuevas fuentes de emisión y se adoptarán programas de reducción de la contaminación que podrán extenderse hasta por 10 años. Lo anterior se realizó con el Decreto Distrital 174 de 2006, “por medio del cual se adoptan medidas para reducir la contaminación y mejorar la calidad del aire en el Distrito Capital”.

⁶ Las labores de seguimiento que se han llevado a cabo en los años recientes han estado focalizadas en fuentes que cumplen los siguientes criterios: *i*) fuentes de combustión externa: calderas; *ii*) potencia superior a 60 caballos de potencia-BHP; *iii*) fuentes que usan combustibles sólidos o líquidos; *iv*) fuentes ubicadas en las localidades del área fuente tipo 1 de Puente Aranda, Fontibón y Kennedy (SDA-2008b).

CUADRO 1. *Caracterización de fuentes fijas según base de datos, Bogotá*

(Porcentaje)

<i>Tipo de fuente/combustible</i>	<i>Número de fuentes</i>	<i>Proporción (porcentaje)</i>	<i>Emisión (ton/año)</i>	<i>Proporción (porcentaje)</i>
1. Calderas	91	59.5	283.9	64.7
2. Fuente en procesos productivos	62	40.5	154.6	35.3
1. Carbón	79	51.6	272.8	62.2
2. ACPM ^a	51	33.3	46.0	10.5
3. Crudo ^b	17	11.1	119.0	27.1
4. Aceite ^c	3	2.0	0.5	0.1
5. Leña ^d	3	2.0	0.3	0.1

FUENTE: Elaboración propia según Base de Datos Seguimiento 2006-2008, SDA.

^a ACPM es el diesel corriente o petróleo núm. 2.^b Crudo es un hidrocarburo pesado con poca refinación y con características similares a petróleo núm. 6.^c Aceite es el combustóleo o petróleo núm. 6.^d Leña incluye retal de madera y bagazo.

o el decomiso de materias primas causantes de la infracción; ambas medidas pueden realizarse de manera temporal o definitiva.⁷

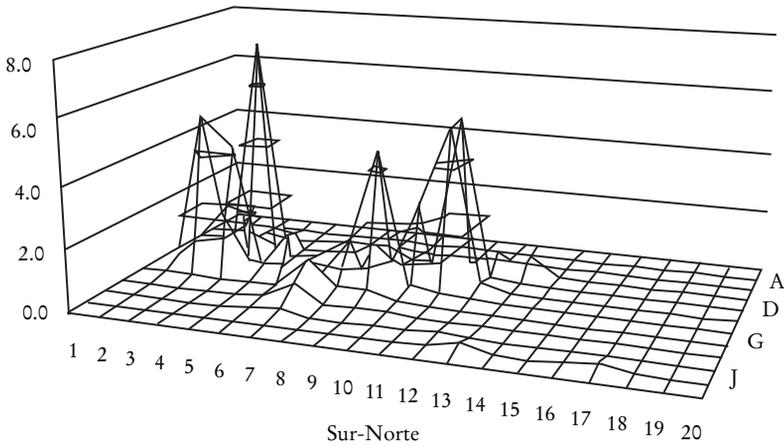
c) *Situación base*. El desarrollo del presente trabajo se basó en información de la SDA correspondiente al seguimiento realizado a fuentes fijas en el periodo 2006-2008, con lo cual se obtuvo un registro de 384 fuentes con información completa. De esta muestra sólo se tomaron fuentes que fueran calderas y fuentes en proceso productivos, ya que éstas representaban más de 99% de la emisión, y por tipo de combustible; se excluyeron las fuentes que consumían gas natural o gas propano, ya que estos son considerados combustibles limpios. El cuadro 1 muestra la información de las fuentes consideradas para los análisis, que corresponden a un total de 153 (ubicadas en 120 empresas, con un máximo de cuatro fuentes por empresa) con una emisión total de 438.5 ton/año y una calidad ambiental máxima, medida como la concentración de contaminante PM10 de 7.37 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$.

Con el propósito de ofrecer una simplificación espacial, la gráfica 2 muestra la línea base de calidad ambiental calculada y la cuadrícula de celdas en la que se dividió el área de estudio (40 km \times 24 km; 240 celdas de 2 km por lado).⁸

⁷ Ministerio de Medio Ambiente, Decreto 948 de 1995. Los valores se muestran con base en un dólar promedio del año 2008; con un valor de 1 peso colombiano/dólar de 1967.

⁸ Los bajos valores encontrados de calidad ambiental expresados como concentración de contaminante de PM10 se debe a que son valores que representan condiciones anuales promedio y al reducido número de fuentes con el que finalmente se trabajó.

GRÁFICA 2. Línea base concentración de contaminante PM10 anual promedio generada por fuentes fijas, Bogotá



FUENTE: Elaboración propia.

2. Abatimiento

a) *Tecnologías de control.* Con el propósito de abatir material particulado, una fuente cuenta con tres opciones; tecnologías de final de tubo, reducción del tamaño del proceso productivo y producción más limpia. Sin embargo, debido a la limitación de información, este trabajo sólo considera la primera opción, por lo cual se construyeron funciones de costo de abatimiento según distintas tecnologías de control de emisiones disponibles.

Las relaciones de costo se obtuvieron teniendo en cuenta dos componentes, los cuales son las formas funcionales y las metodologías de cálculo. El primero, se tomó de Vatavuk (1990), quien expone que los costos de abatimiento de una fuente están relacionados con el flujo de los gases de combustión Q , las horas de operación anual (HOA) y son independientes del proceso productivo y del equipo de combustión; además, se componen de los costos de inversión y los costos directos e indirectos de operación.⁹ Para el segundo componente se emplearon las metodologías de cálculo de

⁹ Los costos directos de operación representan desembolsos a lo largo de la vida útil del equipo de control. Consideran costos variables y semivariables. Están en función de Q y HOA. Los costos indirectos de operación representan costos fijos y son independientes de Q . Se calculan como una fracción del componente fijo de los costos de operación, el cual es de 60%. Los costos de inversión representan gastos de adquisición e instalación del equipo. Se anualizan con un periodo de pago de la inversión de 20 años y una tasa de interés de 10 por ciento.

CUADRO 2. *Funciones de costo anual de abatimiento según tipo de tecnología, Bogotá*

	Costos directos de operación (dólares/año)	Costos indirectos de operación (dólares/año)	Costos de inversión (dólares/año)
1. No hacer nada	0	0	0
2. Ciclón	$(0.533Q + 2015.6)*HOA/71.8E4$	2 995.2	$0.15Q + 158.9$
3. Multiciclón	$(0.533Q + 2015.6)*HOA/71.8E4$	2 995.2	$0.26Q + 280.3$
4. Lavador Venturí	$(1418.1Q + 4.213E06)*HOA/71.8E4$	28 632.9	$106.0Q^{0.508}$
5. Precipitador electrostático	$(163.3Q + 2.390E06)*HOA/71.8E4$	35 212.9	$49.9Q^{0.778}$
6. Filtro de mangas	$(100.3Q + 3.633E06)*HOA/71.8E4$	28 632.9	$5.4Q^{0.771}$

FUENTE: Elaboración propia con base en Vatavuk (1990), EPA (1991), EPA (2002) y Bravo (2000).

costos de EPA (1991), EPA (2002) y el trabajo de Bravo (2000), con lo cual, se calcularon los distintos tipos de costos enunciados para cada tecnología de control, lo que se realizó para distintos niveles de Q en m³/hr y asumiendo una operación continua por fuente (24 hr).

Con la información obtenida de las formas funcionales y las metodologías de cálculo, se estimaron las funciones de costo para cada tecnología expresadas en dólares de 2008, las cuales se incorporaron al modelo de simulación y se muestran en el cuadro 2.

Cada una de las tecnologías de control presentadas cuenta además con una eficiencia de reducción asociada para el material particulado (véase apéndice 2), con lo cual, cada fuente cuenta con un abanico de seis opciones de control, entre las cuales deberá elegir sólo una, según se aplique cada instrumento de política.

b) *Modelo de costos de abatimiento.* El modelo por emplear en las simulaciones numéricas se toma de O’Ryan (1996), el cual se adapta al presente trabajo y se resuelve mediante el *software* de optimación LINGO 8.0. Formalmente, el problema por programar para la regulación z es:

$$CAA_{(z)} = \left[\underset{i=1}{\text{Min}} \sum_{t=1}^{153} \sum_{i=1}^6 CT_{i,t} X_{i,t} \quad s.a \quad \sum_{t=1}^6 X_{i,t} = 1, \quad \forall i = 1, \dots, 153 \right], \tag{12}$$

$$\forall z = EST, SPET, SPAT$$

en el que:

$CAA_{(z)}$ = costo agregado de abatimiento anual para la regulación z ;

$CT_{i,t}$ = costo total anual de aplicación de la tecnología t a la fuente i ;

$X_{i,t}$ = variable que selecciona el modelo y determina el tipo de tecnología de control que escoge la fuente i ; toma el valor de 1 si la fuente elige la tecnología t o 0 en otro caso.

Para la aplicación del modelo a cada política ambiental, simplemente se inserta la restricción específica o meta ambiental a cada regulación considerada. Para la regulación Est, las restricciones se construyen con base en lo expuesto en la subsección II.1.b:¹⁰

$$\sum_{t=1}^6 CE_{e,i} (1 - EF_{e,i,t}) X_{e,i,t} \leq s_{e,i} \quad \forall e = 1, \dots, 120, \quad \forall i = 1, \dots, 4 \quad (13)$$

y

$$\sum_{i=1}^4 \sum_{t=1}^6 \frac{CE_{e,i} Q_{e,i} HOA_{e,i} (1 - EF_{e,i,t}) X_{e,i,t} K}{A_e} \leq Ea_e, \quad \forall e = 1, \dots, 120 \quad (14)$$

en las que:

$CE_{e,i}$ = concentración de emisión de contaminante de la fuente i de la empresa e (mg/m³);

$Q_{e,i}$ = caudal de emisión de contaminante de la fuente i de la empresa e (m³/hr);

$EF_{e,i,t}$ = eficiencia de control de la tecnología t en la fuente i de la empresa e (%);

$X_{e,i,t}$ = variable que determina el tipo de tecnología de control que se aplica a la fuente i de la empresa e ; si elige la tecnología t toma el valor de 1 y 0 en otro caso;

$s_{e,i}$ = estándar de concentración de emisión de contaminante según el tipo de fuente i de la empresa e (mg/m³);

$HOA_{e,i}$ = horas de operación anual de la fuente i de la empresa e (hr/año);

¹⁰ Una reducción de 100% en esta política representa los valores actuales en la regulación expuestos en los cuadros A1 y A2 del apéndice. Es importante destacar que la normativa actual no aclara si el límite máximo de emisión por predio industrial debe calcularse con base en emisión anual o de manera puntual con los datos de caudal y concentración. Dado que para los demás instrumentos de política analizados se compara de manera anual, se incorpora para la política de Est la variable HOA en la restricción de límite permisible de emisión.

- A_e = área del predio de la empresa e (m^2);
- Ea_e = límite máximo de emisión por área del predio de la empresa e ($kg/hr.m^2$);
- K = factor de ajuste que equipara las unidades de medición de la parte izquierda de la ecuación a las unidades de medición del límite permisible de emisión ($kg.año/mg.hr$).

Para la regulación SPET el modelo por programar queda con la siguiente restricción:

$$\sum_{i=1}^{153} \sum_{t=1}^6 E_i HOA_i X_{i,t} (1 - EF_{i,t}) \leq \bar{E} \tag{15}$$

en la que:

- E_i = emisión total de la fuente i (kg/hr);
- \bar{E} = emisión meta anual $kg/año$.

Para la regulación SPAT el modelo por programar queda con las siguientes restricciones:

$$\sum_{i=1}^{153} \sum_{t=1}^6 \sum_{j'=1}^{240} E_i HOA_i \alpha_{j',j,b_i} UB_{i,j'} X_{i,t} (1 - EF_{i,t}), \quad \forall j = 1, \dots, 240 \tag{16}$$

en las que:

- $\alpha_{j',j,b}$ = factor de transferencia de cómo la emisión de la fuente i ubicada en la celda j' afecta la calidad del aire anual promedio en la celda j ($\mu g/m^3/kg/año$), teniendo en cuenta si la fuente cumple o no con el requisito mínimo de altura b_i del ducto de emisión;
- $UB_{i,j'}$ = variable que determina si la fuente i se encuentra en la celda j' ; toma el valor de 1 de ser positivo y 0 si no se encuentra;
- L_j = calidad ambiental anual promedio deseada de contaminante en el punto j ($\mu g/m^3$).

De los modelos expuestos lo que finalmente se selecciona es la tecnología que debe usar cada fuente para cumplir la regulación que se esté simulando. Con el conjunto de tecnología óptimo se calcula sus costos de operación

y adquisición, los costos de fiscalizar a las fuentes con dicha tecnología, la emisión final y la calidad ambiental resultante. Esta última variable se obtiene empleando los coeficientes de transferencia, lo cual puede realizarse debido a que estos fueron construidos de acuerdo con características atmosféricas locales y condiciones técnicas de las fuentes y no con aspectos de una regulación específica, por lo cual, el mismo grupo de coeficientes pueden ser empleados en cualquier instrumento que se desee simular, y obtener así valores de calidad del aire. Lo anterior permitió levantar el supuesto de trabajos anteriores, en los que se exponía que los coeficientes de transferencia debían ser iguales para toda el área urbana y basarse únicamente en las condiciones de dispersión local; de esta manera se logró que en efecto los coeficientes encontrados fueran acordes conforme al modelo teórico empleado. Véase más pormenores de los coeficientes de transferencia empleados en el apéndice 3.

3. *Fiscalización*

Para obtener los CAF de una política de Est, SPET y SPAT, éstos se calculan empleando el último término en cada una de las expresiones (9), (10) y (11). Sin embargo, dado que el problema para la política de Est es fiscalizar cada fuente de manera focalizada y que las ecuaciones de costo de abatimiento por trabajar no son convexas como supone el modelo teórico, no es posible encontrar el costo marginal de abatimiento de la forma tradicional, por lo cual se empleó el método sugerido por Clerger *et al* (2009), quienes calculan el costo marginal de manera discreta, empleando una relación entre diferenciales de costo y diferenciales de emisión.

Para los CAF del SPET y SPAT, debido a que los problemas de optimación por resolver son de variable entera de tipo binaria, las simulaciones no arrojaban valores sombra, los cuales representarían los precios de los permisos de emisión anual y de calidad ambiental promedio anual que se requerirían para calcular los costos de fiscalización en los instrumentos de regulación. Sin embargo, los precios se obtuvieron de acuerdo con la definición de valor sombra, para lo cual se calculó la variación de los CAA cuando se aumente en alguna unidad el valor de las restricciones. Para evitar comportamientos no adecuados en los precios, debido a que las funciones de costo son discretas, se empleó lo expuesto por Crema (1995), en el que los precios se obtienen con incrementos promedios en las restricciones, por lo cual se trabajó con

aumentos de 3 ton/año y $2 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ en los aumentos de las restricciones del SPET y SPAT, que son las metas ambientales de cada instrumento.

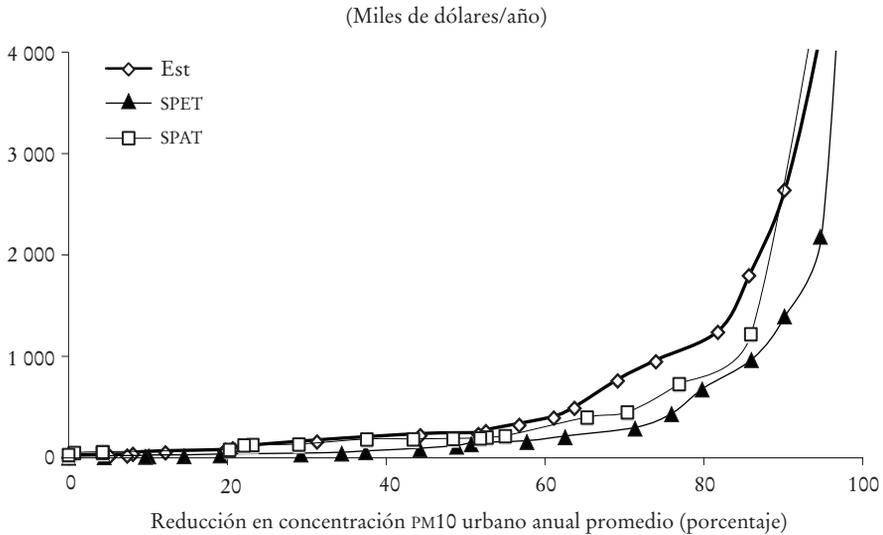
Con el propósito de fijar los valores de sanción marginal por una infracción, dado que la normativa para Bogotá no es suficientemente clara al respecto, se consideró lo expuesto por Stranlund y Chávez (2000) y Ponce y Chávez (2005). Estos autores sugieren utilizar como referencia el SPET y suponer que la sanción marginal es una función lineal del precio del permiso $f' = \alpha p$, en la que $\alpha \geq 1$. Con base en este procedimiento el valor de $f'(0)$ se obtiene con un factor $\alpha = 8.2$ en el panorama base de reducción, el cual permite alcanzar 50% de reducción de la emisión total, arrojando lo anterior un valor de sanción marginal de 15 236.4 dólares/ton/año; así es importante aclarar que dicho valor obtenido se toma fijo para cualquier otra reducción o meta ambiental analizada. Finalmente, los costos de auditoría por fuente w se obtuvieron de acuerdo con consulta con laboratorios acreditados que realizan análisis de emisión en Bogotá, el cual asciende a 762.6 dólares por fuente.

Conforme a lo anteriormente expuesto el modelo de costos de fiscalización empleado permite incorporar aspectos institucionales importantes, lo que obtiene un mayor grado de acercamiento con la realidad. Esto se logra con la elaboración y exigencia de las sanciones por aplicar, el paquete de tecnologías de abatimiento existentes, el tamaño de la población regulada, las tecnologías de supervisión y la exigencia en la meta ambiental buscada, lo cual condiciona el esfuerzo de control del regulador.

III. RESULTADOS

La comparación de los distintos tipos de costos se realiza para distintas reducciones en la variable de concentración de PM10 urbano promedio anual, ya que este es el principal indicador de calidad ambiental y no corresponde a ninguna restricción asociada con alguno de los instrumentos analizados, lo que evita sesgar la comparación de resultados entre instrumentos. Esta variable se considera en términos de reducción porcentual en relación con el valor encontrado para la situación base.

Es importante aclarar que la versatilidad del modelo permitiría igualmente utilizar otras pautas de comparación, como la máxima concentración promedio de contaminante, la mínima concentración promedio o la emisión total, lo que puede arrojar resultados distintos de los expuestos.

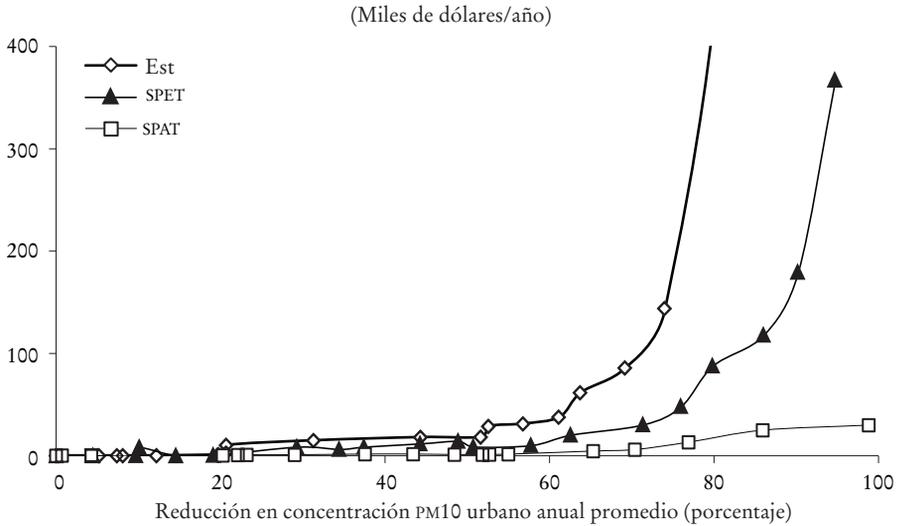
GRÁFICA 3. *Costos agregados de abatimiento en distintas reducciones*

FUENTE: Elaboración propia.

1. *Costos agregados de abatimiento*

Los resultados obtenidos mediante las simulaciones sugieren que para el caso de Bogotá los instrumentos de incentivo económico son los que presentan los costos más bajos para toda reducción en la concentración de PM10 urbano promedio. Específicamente, los instrumentos de más costo efectivos en abatimiento fueron el SPET, seguido del SPAT y finalmente Est, como se muestra en la gráfica 3.

La costo de efectividad observada para los instrumentos de incentivo económico se debe a que estos exigen más abatimiento a las fuentes con mayores aportaciones de emisión y de efecto en la calidad ambiental, logrando distribuir de mejor manera los esfuerzos de abatimiento entre las fuentes, otorgando más flexibilidad para encontrar la solución que permite lograr las respectivas metas ambientales al menor costo. Por su parte, para reducciones altas, la política de Est sobreexige al conjunto de fuentes en general, ya que al restringir individualmente a las fuentes no permite analizar una solución que en el agregado sea la de más costo efectiva, lo que en el caso de Bogotá es evidente, ya que se requiere que las fuentes cumplan con dos estándares, uno de concentración de emisión y otro de emisión máxima de fuentes por predio industrial.

GRÁFICA 4. *Costos agregados de fiscalización en distintas reducciones*

FUENTE: Elaboración propia.

El comportamiento ascendente de los costos obedece a la mayor exigencia en reducción en la calidad ambiental, de esta manera las fuentes son obligadas a adquirir tecnología con mayor poder de reducción, lo que a su vez implica mayores costos. Es importante destacar dos reducciones que marcan diferencias en el comportamiento de los costos, el primero es 20%, a partir del cual se empieza a distinguir una diferencia en los costos de las distintas políticas de regulación consideradas. El segundo es una reducción de 50%, en la que se genera un punto de quiebre a partir del cual los costos de las tres políticas regulatorias aumentan vertiginosamente, y la brecha de costos entre las políticas se incrementa a medida que se exige una mayor meta ambiental. Este aumento en las brechas de costos se genera por lo expuesto líneas arriba, la de costo efectividad de los instrumentos de incentivo económico y la sobreexigencia del instrumento de regulación directa, características que se tornan más evidentes con metas ambientales exigentes.

2. *Costos agregados de fiscalización*

Los resultados de las simulaciones sugieren que los esfuerzos de fiscalización en los instrumentos de incentivo económico son más baratos que en

la política de estándares, siendo mucho menor en un SPAT, y seguida de un SPET, como se muestra en la gráfica 4.

Específicamente, el SPAT es el instrumento de más costo efectivo desde el punto de vista de fiscalización para cualquier exigencia en la meta ambiental. Este resultado llama la atención, pues tanto en la regulación Est como en el SPAT es necesario realizar una supervisión selectiva; sin embargo, los resultados difieren, lo que evidencia que el incorporar características de las condiciones de dispersión, además de características propias de las fuentes, permite lograr cumplimiento a un menor costo.

Al igual que con los CAA, la estructura de comportamiento de la regulación de Est se arrastra a los CAF, destacándose los dos reducciones que marcan una diferencia, específicamente a partir de una reducción mayor de 20 y 50% en la calidad ambiental urbana; esto se debe al aumento de los CAA, el cual se trasmite a las probabilidades de supervisión mínimas necesarias para inducir cumplimiento, aumentando finalmente los CAF.¹¹ En cambio, la fiscalización en las políticas de incentivo económico proporciona un orden diferente de costo efectividad en comparación con los costos de abatimiento, además no aumentan de manera significativa, ya que ésta se realiza con base en características propias de los mercados, como son los precios,¹² e igualmente éstos inciden en el valor de las probabilidades de supervisión que se deben aplicar por cada instrumento, por lo cual una supervisión uniforme para el SPET y una supervisión focalizada sólo a las fuentes con mayor efecto ambiental, como se hace para un SPAT, permite obtener costos más bajos de fiscalización cuando la comparamos en relación con la calidad ambiental urbana promedio.

¹¹ Es importante destacar que permanentemente se consideraron contextos de información completa, tanto para el regulador y las fuentes, ya que la inexistencia de dicha condición puede generar un aumento en los resultados de los costos encontrados para la política de Est. Véase Clerger *et al* (2009) y Chávez *et al* (2009). Esta condición de información completa también se supone para el instrumento SPAT, ya que el cálculo de los coeficientes de transferencia requiere además características de las condiciones de dispersión, características propias de las fuentes. Con base en esto, se supuso que dichos coeficientes eran conocidos por el regulador y las fuentes.

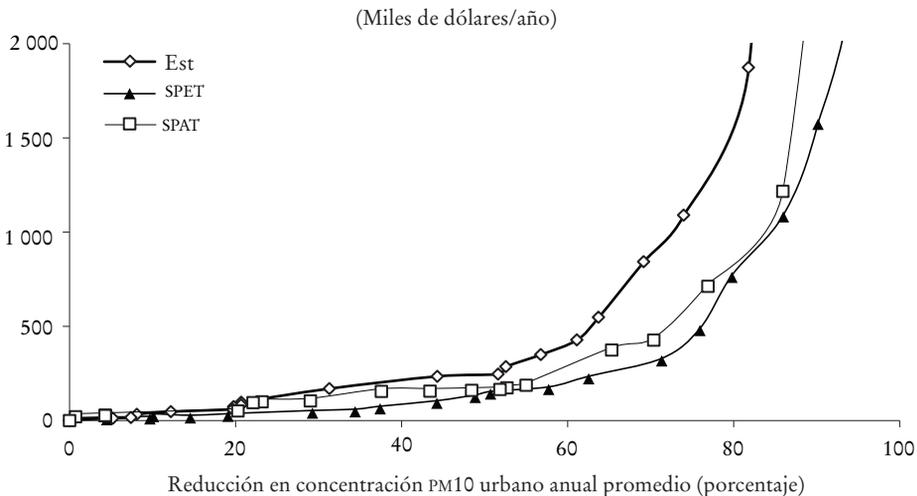
¹² Respecto a los precios del SPET y del SPAT, es importante destacar que a pesar que se trabajó con aumentos mayores a una unidad en las restricciones, éstos no siempre fueron bien comportados, es decir, no siempre aumentaron al exigir mayor reducción en la meta ambiental, debido a dos razones: *i*) eficiencias discretas de las tecnologías de control hacen que el problema de optimación sea de variable binaria, y *ii*) la presencia de fuentes con grandes caudales de emisión. Ambos factores al combinarse generan que los sistemas regulatorios “salten” de manera brusca a diferentes costos, por lo cual, para cierta reducción no fue suficiente el aumento en la(s) restricción(es) para que las fuentes pudieran dar un cambio de tecnología, que les permitiera más emisión o contaminación a un menor costo de abatimiento.

3. Costos agregados de cumplimiento

La gráfica 5 muestra finalmente los CAC, los cuales incluyen abatimiento y fiscalización para inducir perfecto cumplimiento para cada instrumento de regulación considerado. En definitiva, se puede afirmar que para las condiciones de Bogotá, el SPET es el instrumento de más costo efectivo para cualquier reducción, seguido del SPAT y finalmente la política de Est.

Entre los resultados obtenidos destaca el hecho de que las reducciones de 20 y 50% encontrados previamente permanecen aún en los CAC, aunque el orden en costo efectividad de los instrumentos es el mismo que el encontrado para los CAA, lo cual evidencia la significativa aportación que tienen los costos de abatimiento en comparación con los costos de fiscalización para toda reducción. Con base en los resultados obtenidos, es importante destacar que los CAF en comparación a los CAC pueden representar en promedio 20% para una regulación de Est, 12% para un SPET y 1% para un SPAT. Esto confirma la importancia de la estimación de los costos de fiscalización, los cuales pueden incidir significativamente en los costos de cumplimiento de la regulación, además como se expuso líneas arriba la sobreestimación de estos recursos, que provienen casi en su totalidad de los presupuestos de las autoridades locales, puede tener un alto costo de opor-

GRÁFICA 5. Costos agregados de cumplimiento con distintas reducciones



FUENTE: Elaboración propia.

tunidad, por lo cual su estimación es un elemento pertinente para contextos de países en desarrollo.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que el hecho de que la política de Est actual sea la de menos costo efectiva, implica que ésta tenga una alta probabilidad de no poder aplicarse adecuadamente, debido a que las fuentes tienen grandes incentivos a no cumplir por los altos costos que implica adquirir tecnología adecuada a los requerimientos para cumplir la normativa y por los mayores recursos y esfuerzos en fiscalización que el regulador tendría que dedicar para lograr el adecuado cumplimiento. Esto en parte puede explicar el porqué a pesar de contar con una regulación que se ha fortalecido en los últimos años recientes y a los esfuerzos destinados, éstos no han sido suficientes para lograr el cumplimiento adecuado en la regulación.

El resultado obtenido en relación con que el SPET es la política de más costo efectiva, es interesante debido a que este instrumento está elaborado con base en la emisión total y no en la calidad ambiental, como ocurre con el SPAT, por lo cual, se esperaba que este último instrumento sería la mejor opción de política, según los planteamientos teóricos y los resultados anteriores de otros trabajos relacionados. Conforme a esto, para el caso de Bogotá, exigir esfuerzos de abatimiento a las fuentes con mayor emisión logra un mejor resultado en la reducción promedio de la concentración de PM10 del área urbana, que exigir únicamente a las fuentes con el mayor efecto en la calidad del aire. Lo anterior se presenta por la pauta que se emplea para comparar los costos y porque se cuenta con un pequeño número de fuentes con grandes caudales representados por las “ladrilleras”,¹³ que son las que más aportan en emisión y concentración ambiental, por lo cual, cuando se aborda el problema de contaminación desde la emisión de las fuentes se genera más efecto positivo en la reducción de la calidad del aire de la ciudad.

Por último, se puede observar que las diferencias en costos son significativas sólo para metas ambientales exigentes, por lo cual, para la muestra de fuentes empleada, el análisis de un cambio de regulación en Bogotá sería considerable para una situación de alta de contaminación. Este resultado se genera debido a que es un reducido grupo de fuentes las que aportan mayor emisión, por lo que, son las que a bajas metas ambientales se les exige inicialmente abatimiento; pero conforme aumentamos la exigencia en la meta

¹³ Este tipo de fuentes son empresas que se dedican a la elaboración y cocción de ladrillos de material arcilloso para la construcción, que emplean grandes hornos de carbón y no cuentan con tecnologías de control de emisión adecuadas.

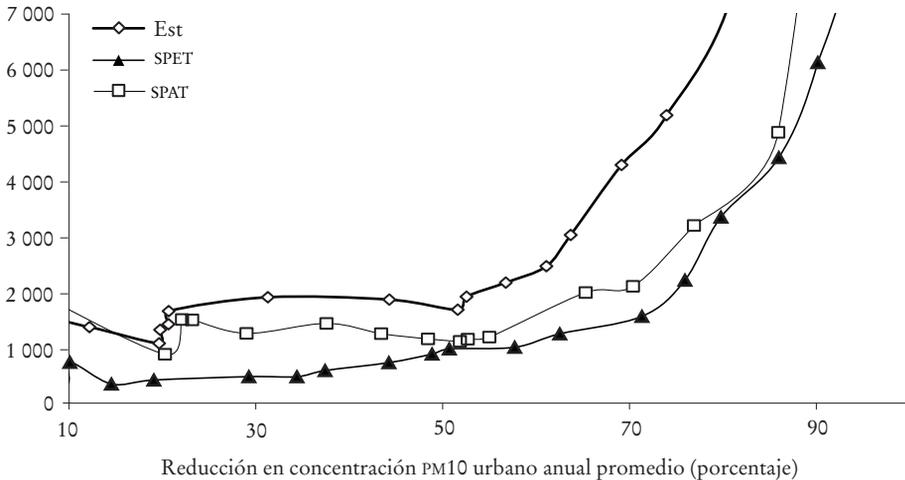
las demás fuentes entran también dentro del alcance de la regulación, y es ahí donde las propiedades de costo efectividad de los instrumentos económicos parecen ser evidentes.

4. Indicador de costos-calidad ambiental

En el análisis de esta subsección se utiliza los resultados de los modelos previamente analizados, con el fin de construir un indicador que relacione los costos de manera más general, es decir, que pueda ser más representativa del conjunto total de fuentes existentes y de las condiciones de la ciudad considerada como caso de estudio. Con base en esto, el indicador de costos-calidad ambiental se calculó como el cociente entre los CAC y la reducción en la concentración de PM10 promedio anual urbano. La gráfica 6 presenta los costos de reducir un $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ la concentración de PM10 promedio anual en el área urbana, lo cual se calcula para distintas metas ambientales.

GRÁFICA 6. *Indicador de costos agregados-cumplimiento por $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ promedio urbano reducido*

(Miles de dólares/ $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ promedio urbano reducido)



FUENTE: Elaboración propia.

Con este indicador se confirma que el SPET es el instrumento que permite para las condiciones de Bogotá una reducción por gr/m^3 más barata en cualquier reducción; igualmente se mantienen las reducciones que marcan

un cambio de tendencia. Para una meta ambiental de 50% de reducción que desee el regulador, cada $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ urbano promedio de reducción costaría alrededor de 1.68 millones de dólares con una política de Est, mientras que con un SPAT costaría 1.15 millones de dólares y con la política SPET el costo sería de alrededor de 974.8 mil dólares por $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ urbano promedio reducido.

El aumento en la brecha entre costos de cumplimiento encontrada en los resultados anteriores, la cual aumenta a medida que se exige una mayor meta ambiental, se mantiene debido a la estructura del indicador, el cual incorpora los CAC para su cálculo. Lo que queremos destacar es que aun para metas ambientales poco exigentes las diferencias en costos de reducción por $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ urbano promedio son marcadas entre las políticas de regulación consideradas, debido a los valores del denominador del indicador, que son las reducciones en la concentración urbana promedio de PM10.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir de los modelos desarrollados para el caso de Bogotá permiten concluir que los esfuerzos de fiscalización, que debe emplear un regulador, son menores en el caso de instrumentos de incentivo económico que en el caso de la regulación de comando y control. Fiscalizar las fuentes con base en su efecto en la calidad ambiental es un nuevo enfoque que puede ser relevante, pues su costo efectividad es evidente, además, las necesidades actuales obligan a los reguladores a focalizar de una manera más acertada la exigencia hacia los mayores responsables de la contaminación.

Con base en el indicador costo-calidad se puede concluir que las diferencias en costo entre las distintas políticas son significativas para alcanzar distintas metas ambientales, por lo cual la selección del instrumento de política acertado para el conjunto total de fuentes es una decisión que puede implicar valiosos recursos para el sector privado y las autoridades de la ciudad.

Si bien las ideas anteriores permiten visualizar el alcance de los modelos desarrollados y algunas pautas de comportamiento importantes, hay que exponer las limitaciones de los resultados obtenidos. Primero, los valores de los costos calculados son representativos para una pequeña muestra del número de fuentes existentes en la ciudad, lo cual representa aproximadamente entre 3 y 5% del total, en relación con el inventario de 2001. Segun-

do, debido a la limitación de la información disponible, se consideró las tecnologías de final de tubo como la única opción de abatimiento, por lo cual, ofrecer una sola opción de abatimiento con un paquete tecnológico limitado hace que el modelo de simulación desarrollado sea sobreexigente, y puede estar sobrevalorando los costos tanto de abatimiento como de fiscalización, ya que obliga a las fuentes adoptar algún tipo de tecnología. Esto puede contrastar con el hecho de que para ciertas fuentes en alguna reducción, existan otras maneras de abatimiento que sean menos costosas e igualmente les permita cumplir la regulación. Tercero, el modelo sólo permite estimar costos incrementales de adoptar una determinada regulación por medio de un paquete tecnológico y no aproxima los costos actuales que se estén realizando por las fuentes para mitigar la emisión de material particulado.

Finalmente, con base en el análisis presentado, surgen futuros temas de investigación que ayudarán a fortalecer la masa crítica en torno de la elaboración de política ambiental de la ciudad. Entre los que destacan, están el consolidar una línea base del cumplimiento actual de la normativa para todo el conjunto de fuentes fijas, determinar los pasos por seguir para la ciudad en materia de política ambiental con el fin de controlar la calidad del aire, sentar las bases para el debate de si están los actores de la política ambiental local (fuentes y autoridades respectivas) preparadas para poner en práctica enfoques de política basados en incentivos económicos para controlar el problema de calidad del aire.

El abordar las temáticas expuestas líneas arriba permitiría continuar desarrollando en Colombia la línea de análisis de política *ex ante* y no *ex post*, para que la ciudad ajuste permanentemente las normas, anticipe resultados de las políticas que desea aplicar y de esta manera ahorre valiosos recursos privados y públicos, con el fin último de mejorar la calidad de vida de sus habitantes.

APÉNDICE

1. Normativa para fuentes fijas, Bogotá

CUADRO A1. Normas de concentración de emisión de PST^a

Tipo de fuente según equipo, combustible o ubicación	Concentración (mg/m ³)	
	2006	2010
Combustión externa-combustibles sólidos y líquidos	200	100
Combustión externa-combustibles gaseosos	—	100
Incineradores y hornos crematorios	50	50
Procesos productivos (flujo ≤ 0.5 kg/hr)	250	150
Procesos productivos (flujo > 0.5 kg/hr)	150	50
Fuentes en área fuente ^b -combustibles sólidos y líquidos	150	100

FUENTE: Elaboración propia según DAMA-resolución 1208/03 y DAMA-Resolución 1908/06.

^a PST: partículas suspendidas totales

^b Según resolución 1908/06-DAMA para fuentes de combustión externa ubicadas en el área fuente 1. Las nuevas fuentes de combustión externa en el área fuente 1 deben cumplir un estándar de 100 mgr/m³.

CUADRO A2. Límite máximo de emisión por predio industrial^a

Contaminante	PST	SOx	NOx
Valor (kg/hr.m ²)	0.0023	0.00046	0.0025

FUENTE: Elaboración propia según DAMA-Resolución 1208/03.

^a PST: partículas suspendidas totales. SOx: óxidos de azufre. NOx: óxidos de nitrógeno.

2. Eficiencias de control según tecnología para equipo de combustión y uso de combustible

CUADRO A3. Eficiencia de control por tecnología

(Porcentaje)

Tipo de equipo y combustible	1	2	3	4	5	6
	No hacer nada	Ciclón	Multiciclón	Lavador Venturi	Precipitador electroestático	Filtro de mangas
Calderas a carbón	0	33	70	96	97	99
Calderas a leña ^a	0	15	50	89	95	99
Calderas a ACPM ^b	0	5	30	86	94	99
Calderas a crudo ^c	0	5	30	86	94	99
Calderas a aceite ^d	0	5	30	86	94	99
Hornos a carbón	0	40	82	98	99	99
Hornos a bagazo ^a	0	15	50	89	95	99
Hornos a ACPM ^b	0	5	30	86	94	99
Hornos a aceite ^d	0	5	30	86	94	99
Hornos a crudo ^c	0	5	30	86	94	99
Fundiciones	0	31	80	95	90	99
Tostadoras a ACPM ^b	0	5	30	86	94	99

FUENTE: Elaboración propia con base en Aranda (1996).

^a Incluye retal de madera y bagazo.

^b ACPM es el diesel corriente o petróleo núm. 2.

^c Crudo es un hidrocarburo pesado con poca refinación y con características similares a petróleo núm. 6.

^d Aceite es el combustóleo o petróleo núm. 6.

3. Coeficientes de transferencia, Bogotá

Para el cálculo de los coeficientes de transferencia se determinó la concentración de contaminante por la emisión de una fuente representativa promedio y posteriormente se realizó una relación entre los valores de concentración encontrados y la emisión de partida.¹⁴ Para los valores de concentración se empleó el modelo de dispersión gaussiano expuesto por De Nevers (1997); estos valores se ponderaron por la frecuencia en la cual se presentan las condiciones meteorológicas locales. Para esto, se empleó la siguiente fórmula:

$$\left[\overline{cc}_{\text{promedio anual en un punto}} \right] = \sum_{d=1}^{17} \sum_{v=1}^7 \sum_{ea=1}^4 (f_{rd, v, ea} \cdot cc_{d, v, ea}) \quad (A1)$$

en la que, d es la dirección del viento, que puede tomar las 16 direcciones normales más el estado “calma”; v denota la velocidad del viento, que puede tomar siete valores, que corresponden a las velocidades promedio que muestra una rosa de vientos;¹⁵ ea corresponde a las clases de estabilidad atmosférica que se pueden llegar a presentar;¹⁶ $cc_{d, v, ea}$ es el valor de concentración de contaminante hallado con el modelo gaussiano para una condición de dirección, velocidad y estabilidad atmosférica, y $f_{rd, v, ea}$ representa la frecuencia con la que se presenta dicha condición meteorológica de estabilidad atmosférica, velocidad y dirección del viento.

Las frecuencias de condiciones meteorológicas se tomaron de las rosas de vientos para 13 estaciones de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (RM CAB) obtenidas de SDA (2008a), por lo cual, se generaron 26 plantillas distintas de coeficientes de transferencia, es decir, 13 plantillas de acuerdo con las condiciones de dispersión de las estaciones cuando la fuente representativa promedio cumpliera el requisito mínimo de altura y otras 13 plantillas para cuando no se cumplía el requisito mínimo de altura. Posteriormente, según factores orográficos y de cercanía a una estación, cada celda se relacionó con los coeficientes de transferencia de la estación más conveniente, y a las fuentes que se encontrarán en alguna celda se les asignaban los coeficientes de transferencia respectivos, según correspondiera el caso de cumplimiento del requisito de altura.

¹⁴ Se tomaron características promedio de emisión y además se consideró si la fuente cumplía con el requisito de altura mínima, por lo cual se tomó una altura promedio para cuando cumplía la norma y otra altura promedio cuando no cumplía.

¹⁵ La rosa de vientos sintetiza para una zona el comportamiento del viento, mostrando su dirección, velocidad y frecuencia relativa. Para este caso, se ha empleado información de vientos de 13 estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RM CAB).

¹⁶ Las clases de estabilidad atmosférica pueden ser A, B, C y D y se determinan según la velocidad del viento y la radiación. Para esta última variable se tomó un valor constante de radiación debido a las condiciones de latitud de Bogotá.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aranda, O., Paula, B. (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.
- Blackman, A. (2009), "Colombia's Discharge Fee Program: Incentives for Polluters or Regulators?", *Journal of Environmental Management*, pp. 110-119.
- Bravo, R. (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.
- Chávez, C., M. Villena y J. Stranlund (2009), "The Choice of Policy Instruments to Control Pollution under Costly Enforcement and Incomplete Information", *Journal of Applied Economics*.
- ____ (2000), "Enforcing Market Based Environmental Policies", tesis doctoral, Department of Resource Economics, University of Massachusetts Amherst.
- Clerger, G., C. Chávez, M. Villena y W. Gómez (2009), "Costos de cumplimiento de regulación ambiental con información incompleta. Aplicación a fuentes fijas del PCE de Santiago, Chile", *Estudios de Economía*, vol. 36, Edición 2, pp. 165-190.
- Crema, A. (1995), "Average Shadow Price in a Mixed Integer Linear Programming Problem", *European Journal of Operational Research* 85, pp. 625-635.
- DAMA (Departamento Técnico del Medio Ambiente) (2003), "Resolución 1208 de 2003".
- ____ (2006), "Resolución 1908 de 2006".
- ____, y UNIANDES (2004), "Diseño e implementación de un modelo de calidad de aire para Bogotá-Informe Semestral VII", cap. 2, agosto.
- De Nevers, N. (1997), *Ingeniería para el control de la contaminación atmosférica*, Mc Graw Hill.
- EPA (Environmental Protection Agency) (1991), "Control Technologies for Hazardous Air Pollutants", junio.
- ____ (2002), *Manual de costos de control de contaminación del aire de la EPA*, sexta edición.
- Gaitán, M., J. Cancino y E. Behrentz (2007), "Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá", *Revista de Ingeniería* núm. 26, pp. 81-92.
- Hahn, Robert, y R. Noll (1982), "Designing a Market for Tradable Emission Permits", W. Magat (comp.), *Reform of Environmental Regulation*, Ballinger Pub. Co.
- Hanley, N., J. Shogren y B. White (1997), *Environmental Economics In Theory and Practice*, Nueva York, Oxford University Press.
- Kolstad, C. (2001), *Economía ambiental*, primera edición en español, Oxford University Press.
- Lozano, N. (2004), "Air Pollution in Bogotá, Colombia, A Concentration-Response Approach", *Revista Desarrollo y Sociedad*, vol. 54, septiembre, pp. 133-177.

- Malik, A. (1990), "Markets for Pollution Control when Firms Are Noncompliant", *Journal of Environmental Economics and Management* 18, pp. 97-106.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2006), "Decreto 948 de 1995".
- ____ (2006), "Resolución 601 de 1996".
- Montgomery, W. D. (1972), "Markets in Licenses and Efficient Pollution Control Programs", *Journal of Economic Theory* 5, pp. 395-418.
- O'Ryan, R. (1996), "Cost-Effective Policies to Improve Urban Air Quality in Santiago-Chile", *Journal of Environmental Economics and Management* 31, pp. 302-313.
- ____, y R. Bravo (2001), "Permisos transables frente a la introducción de un combustible limpio: Estudio de caso para PM10 y NOx en Santiago, Chile", *Estudios de Economía*, vol 28, núm. 2, diciembre, pp. 267-291.
- Palacios, M., y C. Chávez (2002), "Programa de compensación de emisiones. Evaluación del diseño de fiscalización y su cumplimiento", *Estudios Públicos*, núm. 88, páginas 97-126.
- Ponce, R., y C. Chávez (2005), "Costos de cumplimiento de un sistema de permisos de emisión. Aplicación a fuentes fijas en Talcahuano, Chile", *EL TRIMESTRE ECONOMICO*, vol LXXII (4), núm. 288, octubre-diciembre 2005, pp. 847-876.
- SDA (Secretaría Distrital de Ambiente) (2007), "Informe anual de calidad del aire de Bogotá 2006", Bogotá.
- ____ (2008a), "Informe anual de calidad del aire de Bogotá 2007", Bogotá.
- ____ (2008b), "Reporte indicadores ambientales, Acuerdo 67 de 2002", febrero, Bogotá.
- Stranlund, J., C. Chávez y M. Villena (2009), "The Optimal Pricing of Pollution when Enforcement is Costly", *Journal of Environmental Economics and Management* 58(2), pp. 183-191.
- ____, y ____ (2000), "Effective Enforcement of Transferable Emissions Permit System with a Self-Reporting Requirement", *Journal of Regulatory Economics* 18, 2, páginas 113-131.
- ____, y K. Dhanda (1999), "Endogenous Monitoring and Enforcement of a Transferable Emissions Permit System", *Journal of Environmental Economics and Management* 38, pp. 267-282.
- Uribe Botero, E. (2004), "Air Pollution Management in two Colombian Cities: Case Study", *Revista Desarrollo y Sociedad* 54, septiembre, pp. 1-50.
- Vatavuk, W. (1990), *Estimating Costs of Air Pollution Control*, Chelsea, Lewis Publishers.
- Villena, M. J. (1997), "Analysis of Economic Strategies for Controlling air Pollution in Santiago", Master thesis Selwyn College, Department of Land Economy, University of Cambridge.