

## Estimación de las funciones de costo marginal de abatimiento de material particulado para fuentes fijas en el Valle de Aburrá\*

Milena Eveyde Mejía Giraldo\*\*, Iván David Oviedo Restrepo\*\*\*

### Resumen

Este artículo tiene como objetivo principal estimar las funciones de costo marginal de abatimiento de material particulado para fuentes fijas en el Valle de Aburrá. Esta información es necesaria si se desea establecer un Sistema de Permisos de Emisión Transables para el Área Metropolitana, como política ambiental para el control de la contaminación atmosférica por material particulado. Para la estimación de tales funciones se utilizó el manual EPA (2002), Handbook, "*Air Pollution Control Cost Manual*", y específicamente la información contenida en el trabajo de grado, "Proposición y Evaluación de Instrumentos de Incentivo Económico para mejorar la Calidad del Aire en Santiago: Aplicación al caso de las Fuentes Fijas", de Bravo (2000). Con la metodología aplicada se obtuvieron funciones de costo marginal para cada equipo de control del material particulado; dichas funciones se relacionan de manera inversa con el caudal adicional de emisiones a tratar.

**Palabras Claves:** Material particulado, funciones de costo marginal de abatimiento, sistema de permisos de emisión transables, fuentes fijas.

**Clasificación JEL:** Q51, Q52.

---

\* Este artículo sintetiza la metodología y los resultados del trabajo de grado del mismo nombre, presentado por los autores para optar al título de Economistas en el año 2004.

\*\* Economista y Estudiante de Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. [memejia@unalmed.edu.co](mailto:memejia@unalmed.edu.co)

\*\*\* Economista, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. [idoviedo@unalmed.edu.co](mailto:idoviedo@unalmed.edu.co)

## Abstract

This paper aims to estimate the abatement marginal cost functions for particulate material in fixed sources in the Valle de Aburrá. This information is required if it is desired to establish a System of tradeable emission permits for the Metropolitan Area, as environmental policy for the control of air pollution by particulate material. For the estimation of such functions was used the handbook EPA (2002) "*Air Pollution Control Cost Manual*" and specifically the information contained in the thesis "Proposición y Evaluación de Instrumentos de Incentivo Económico para mejorar la Calidad del Aire en Santiago: Aplicación al caso de las Fuentes Fijas", by Bravo (2000). With the methodology used, functions of marginal cost were obtained for each control equipment of particulate material; such functions are inversally related to the emissions additional volume to be treated.

**Keys words:** Particulate material, abatement marginal cost functions, fixed sources, tradeable emission permits.

**JEL Classification:** Q51, Q52.

## Introducción

La contaminación del aire en zonas urbanas es uno de los problemas más relevantes en muchos países. En especial, es un problema de salud ambiental que afecta por igual a los países desarrollados y en vía de desarrollo.

Los niveles de contaminación atmosférica en el Valle de Aburrá deterioran aceleradamente la calidad ambiental del recurso aire; las emisiones de gases y el material particulado son expulsados diariamente por las actividades industriales y el tráfico automotor. Estos contaminantes se concentran en la ciudad, generan problemas de salud a sus pobladores y alteran la dinámica de la biosfera.

En general, dados los efectos nocivos que sobre la salud humana y sobre los ecosistemas tiene la alta concentración de contaminantes en la atmósfera, el estudio de posibles regulaciones para el control de la contaminación y el consecuente mejoramiento de la calidad ambiental se torna de gran importancia.

Dentro de las alternativas de regulación se encuentran los Estándares (Instrumentos de Comando y Control) y los Instrumentos Económicos (Impuestos, Sistemas de Permisos Negociables, entre otros).

Existen numerosos estudios basados en simulaciones que establecen la magnitud de la eficiencia estática que se puede conseguir al implementar

un SPET para el caso de fuentes fijas<sup>1</sup>. Asimismo, existen reportes que indican que transar emisiones permite un ahorro significativo en los costos para las diferentes empresas bajo regulación.

Para Colombia, en especial para Medellín, sería interesante simular el funcionamiento de un SPET para el Valle de Aburrá. Tal simulación daría elementos para la toma de decisiones acerca de cual sería, desde el punto de vista de la eficiencia, la mejor manera para establecer políticas ambientales tendientes a mejorar la calidad del aire en la zona.

Para tal simulación es necesaria la información relativa a las funciones de costo marginal de reducción de la contaminación, información que generalmente no está disponible para la autoridad ambiental. Este artículo presenta una metodología para la obtención de dichas funciones.

Esta información es fundamental para realizar otros estudios que involucren evaluaciones y/o comparaciones de costos asociados a la aplicación de distintos instrumentos de gestión y su efectividad en la reducción de emisiones de material particulado.

## 1. Breve síntesis del marco teórico

La función de costo marginal se define como el cambio en el costo total resultante de un cambio unitario en la producción. Matemáticamente es la primera derivada del costo total.

Asimismo, los costos de reducción de la contaminación son aquellos que se generan al disminuir la cantidad de residuos expuestos en el ambiente o al reducir las concentraciones ambientales (Field y Azqueta 1995) y son diferentes de un efluente a otro. Así, los costos de reducir las emisiones  $SO_2$  de las plantas generadoras de energía eléctrica serán diferentes a los costos de disminuir los humos tóxicos de las plantas químicas.

Estos costos incluyen todas aquellas formas de reducir las emisiones: cambios en la tecnología, sustitución de insumos, reciclaje de residuos, procesos de tratamientos, abandono de un lugar, entre otros.

Los costos marginales de reducción de emisiones muestran el cambio de los costos de reducción por un cambio en una unidad en el nivel de emisiones.

---

<sup>1</sup> Según el Decreto 02 de 1982 de la legislación colombiana, se denomina *fuentes fijas* de contaminación del aire, aquella que emite o es susceptible de emitir contaminación del aire en un lugar fijo o inamovible.

## 2. Diagnóstico de la calidad del aire y fuentes fijas en el Valle de Aburrá

El material particulado respirable se ha clasificado según dos tamaños: PM10 y PM2.5. El primero es aquel con partículas gruesas, en su mayoría de pH básico producto de la combustión no controlada. El segundo tamaño agrupa partículas generalmente ácidas, que contienen hollín y otros derivados de las emisiones vehiculares e industriales y corresponde a la fracción más pequeña y agresiva debido a que éstas son respirables en un 100% y por ello se alojan en bronquios, bronquiolos y alvéolos.

Según Velásquez & Regino, "los procesos de combustión (procesos industriales, vehículos a motor, incineración de residuos, etc.) constituyen la principal fuente de contaminantes antropogénicos".<sup>2</sup>

### 2.1. El problema de la calidad del aire para el Valle de Aburrá

En el Valle de Aburrá, la Red de Vigilancia de la Calidad del Aire-REDAIRE se encarga de monitorear y medir los niveles de concentración de partículas suspendidas totales, concentraciones de material particulado inferior a 10 micras y monóxido de carbono, a través de las 21 estaciones de medición ubicadas en toda el Área Metropolitana.

#### 2.1.1. Análisis de concentraciones de partículas suspendidas totales (PTS) en el Valle de Aburrá durante los años 2001 y 2002

De acuerdo con la información publicada por REDAIRE, para el año 2001<sup>3</sup> la concentración de material particulado en las 12 estaciones, cumple para el promedio anual con la norma de no sobrepasar 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La única estación que excede la norma es la Universidad Nacional. De acuerdo con REDAIRE, tal estación realiza el seguimiento a una situación puntual de contaminación atmosférica por tráfico automotor y no representa la calidad del aire para un área urbana.

Según REDAIRE, el porcentaje de días muestreados en la concentración de PTS sobrepasa la norma anual. La estación Universidad Nacional tiene el porcentaje mayor con 87% de días en los cuales la concentración de PTS superó la norma anual. La estación Politécnico presentó, para el período en consideración, un porcentaje del 40% de días en que superó la norma anual para PTS.

---

<sup>2</sup> *Ibid.*, p.15.

<sup>3</sup> RAMÍREZ, John. Red de vigilancia de la calidad del aire en el Valle de la Aburrá. En Redaire, Boletín N° 6, Julio de 2001. Medellín.

Para el año 2002, la Contraloría General de Medellín en su Informe Anual sobre el Estado de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente para el Valle de Aburrá informó que la media geométrica de todas las estaciones para el año 2001 fue de  $78 \text{ ug/m}^3$ , por debajo de la norma en un 22% y para el año 2002, se incrementó hasta  $84,9\%$ , cumpliendo con la norma en un 15% por debajo de la misma<sup>4</sup>.

Sin embargo, en el mismo informe, se nota una tendencia decreciente en la calidad ambiental por partículas suspendidas totales en el 66,7% de las estaciones monitoreadas por REDAIRE.

El caso más crítico fue el observado en las estaciones Universidad de Medellín Girardota, mientras que en las estaciones Universidad Pontificia Bolivariana e Itagüí, se presentó un leve mejoramiento en su índice de calidad ambiental.

### *2.1.2. Concentraciones de material particulado inferior a 10 micras (PM10), en $\text{ug/m}^3$*

Los primeros registros para PM10 en los periodos mayo-junio y noviembre-diciembre de 2002 en las estaciones Corantioquia y Guayabal sugieren la necesidad de realizar mediciones en otros sitios del Área Metropolitana.

En ambas estaciones la concentración media de este contaminante superó la norma anual (EPA) de  $50 \text{ ug/m}^3$ . Las mediciones en la estación Corantioquia alcanzaron los niveles más altos.

La norma día de  $150 \text{ ug/m}^3$  no se superó en ninguna de las dos estaciones. El mayor registro se obtuvo en la estación Corantioquia con  $110 \text{ ug/m}^3$  (el 11 de noviembre de 2002).

Para el período comprendido entre marzo y junio de 2002, las concentraciones registradas para dióxido de azufre en las diferentes estaciones se encuentran por debajo de la norma. Incluso con respecto al año 2001, se evidenció un mejoramiento de la calidad del aire para este contaminante.

“En cuanto al dióxido de nitrógeno, ninguna de las concentraciones promedio obtenidas sobrepasó el 50% del valor de la norma anual correspondiente. En esta oportunidad, el comportamiento fue opuesto al del  $\text{SO}_2$ , y por lo tanto acorde con la distribución espacial de la emisión de  $\text{NO}_2$ ”<sup>5</sup>.

---

<sup>4</sup> CONTRALORÍA GENERAL DE MEDELLÍN. Estado de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente de Medellín 2002.

<sup>5</sup> *Ibíd.*, p.24

Para el período noviembre-diciembre de 2002, los registros de mediciones de CO en una sola estación situada en la sede del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, mostraron que ninguna de las muestras sobrepasó la norma promedio de ocho horas continuas.

Sin embargo, según la Contraloría, este registro no es suficiente para concluir sobre el estado del contaminante, pues faltan mediciones de otros sitios críticos como cruces viales del centro de la ciudad, que en otros períodos han reportado, por monóxido de carbono, una categoría ambiental 'mala'<sup>6</sup>.

Asimismo, REDAIRE reconoce que la monitoría se debe ampliar hacia otros sitios con alta congestión y alto flujo de personas, ya que la información que arrojan los monitoreos, aunque es valiosa no es suficiente para medir la calidad del aire en la ciudad de Medellín y el Área Metropolitana.

Al respecto el ingeniero Alfonso Uribe Melguizo, consultado por *El Reto*<sup>7</sup> expresó: "La situación atmosférica en el Valle de Aburrá es muy grave"<sup>8</sup>. Según él, porque contaminantes tan perjudiciales para la salud como el monóxido de carbono no se monitorearon, una vez REDAIRE reanudó sus actividades en el año 2000. Mencionó que en un estudio realizado por la Facultad de Salud Pública de la Universidad de Antioquia en 1998, se tomaron muestras de sangre a un grupo de agentes de tránsito de Medellín. Los resultados indicaron que los niveles de carboxihemoglobina en la sangre de los agentes examinados mostraron niveles de contaminación calificados como "serio a muy serio". Destaca el ingeniero que dados los daños ocasionados en la salud por este contaminante, es vital lograr su monitoreo constantemente.

## **2.2. Fuentes emisoras en el Valle de Aburrá e inventario de emisiones**

Específicamente, la ciudad de Medellín presenta un grado preocupante de contaminación atmosférica por diferentes fuentes, entre las cuales se pueden mencionar las fuentes fijas, levantamiento de polvo en las calles, y las fuentes móviles, entre otras.

Según el estudio "Evaluación de la Formación de Contaminantes Fotoquímicos mediante la Modelación Matemática y sus Efectos en la

---

<sup>6</sup> *Ibid.*, p. 72.

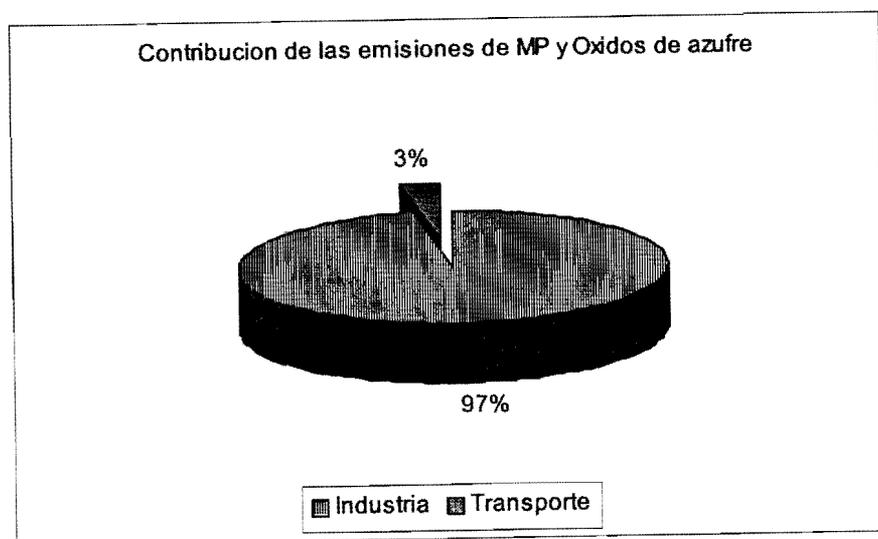
<sup>7</sup> Revista de la ciudad de Medellín editada por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

<sup>8</sup> *Ibid.*, p.12.

Salud en el Valle de Aburrá<sup>9</sup>, la principal fuente de emisión para el período octubre del 1999 y marzo de 2000 fue el tráfico vehicular, con una cantidad de 73.876 ton/año, que representa el 58% del total emitido en el Valle de Aburrá. De ese 58%, el 71% corresponde al CO, el 11% a NO<sub>x</sub>, el 17% a los COV<sup>10</sup> y el 1% restante a partículas suspendidas y SO<sub>2</sub>.

La segunda fuente son las industrias, con una emisión total de 43.303 ton/año, los contaminantes de mayor participación fueron el material particulado y el SO<sub>2</sub>, explicable por el combustible utilizado. El resumen de este inventario se presenta en el Gráfico 1.

### Gráfico 1. Contribución del material particulado y óxidos de azufre por parte de la industria y el transporte



Fuente: Ramírez B.,J.J. y Toro G.,M.V. Medellín, 2000; citado por Contraloría General de Medellín. En Informe del Estado de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente 2001.

De acuerdo con éste, el 97% del material particulado y óxidos de azufre son producidos por la industria, mientras el 3% restante es producido por el transporte.

Sin embargo, las cifras anteriores pueden ser mayores pues, según Cardona (2001), "existen registrados casi medio millón de vehículos que generan 632 toneladas diarias de emisiones gaseosas, es decir cerca de 230

<sup>9</sup> RAMÍREZ BEHAINE, John & TORO GÓMEZ, María. Citado por CONTRALORÍA GENERAL DE MEDELLÍN. Informe del Estado de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente. Medellín 2001.

<sup>10</sup> Compuestos Orgánicos Volátiles.

mil ton/año, y emisiones por 137 toneladas diarias que genera la actividad industrial en Medellín, alrededor de 50 mil ton/año<sup>11</sup>.

### **2.3. Efectos del material particulado sobre la salud**

Los efectos de las partículas sobre la salud están directamente relacionados con el tamaño de éstas. Las más pequeñas, como las de los combustibles fósiles, suelen ser las más peligrosas, porque se pueden inhalar y penetran en el interior de los pulmones, asentándose en zonas en las que los mecanismos de limpieza del organismo se declaran impotentes.

Muchos estudios relacionan la contaminación de partículas con cambios importantes en el funcionamiento de los pulmones, así como con enfermedades del tracto respiratorio, provocando multitud de ingresos hospitalarios por causa de afecciones coronarias y respiratorias, ausentismo escolar y laboral debido a infecciones respiratorias, o el agravamiento de enfermedades crónicas, como el asma y la bronquitis. (Unidad de Asistencia Técnica Ambiental para el Sector Transporte, Bogota, [en línea]).

### **3. Estimación de las funciones de costo marginal de abatimiento de material particulado para fuentes fijas en el Valle de Aburrá**

Para este estudio, en el año 2004 la Corporación Área Metropolitana del Valle de Aburrá suministró una base de datos con las emisiones de 326 fuentes fijas para el Valle de Aburrá. Esta base de datos contenía información acerca de: fecha de muestreo, número de registro, nombre de la empresa, dirección, municipio, emisión de material particulado en g/s, emisión de material particulado en Kg/h, altura de la chimenea (m), velocidad del flujo de salida (m/s), temperatura (°K), diámetro (m), dispositivo de combustión, potencia (hp), equipo de control, tipo de combustible, consumo de combustible en m<sup>3</sup>/h y consumo de combustible en ton/h. El número total de empresas que forman parte del estudio alcanza las 326, las cuales son responsables de 1567.241 Kg/h de las emisiones de material particulado.

#### **3.1. Tecnologías de control para emisiones de material particulado**

Basados en la literatura, las tecnologías utilizadas para el control de las emisiones de material particulado corresponden a:

**Ciclones:** son artefactos mecánicos que usan el principio de la fuerza centrífuga para remover el material particulado. Debido a su sencillez y

---

<sup>11</sup> CARDONA, *Op. Cit.*, p.12.

confiabilidad, el colector de ciclón se ha usado mucho en todo el mundo durante los últimos cien años.

Presentan una baja eficiencia para material particulado fino y aerosoles, en los que predominan las fuerzas viscosas sobre las gravitacionales. Su mayor poder se encuentra en la remoción de partículas grandes.

**Multiciclones:** son básicamente un conjunto de pequeños ciclones de alta eficacia, reunidos en un colector común. Al igual que los ciclones ordinarios separan las partículas del gas a tratar mediante el centrifugado del mismo. La eficacia de los multiciclones para polvo con partículas entre 80 y 120 micras es del 95-98%.

**Filtros de mangas:** es un dispositivo en el que el gas efluente debe atravesar una gran superficie de tejido reticulado. El filtro de mangas constituye el equipo comercial de mayor rendimiento en la depuración de partículas presentes en emisiones atmosféricas de instalaciones industriales (Feal Veira, 2002, Pág. 458). En general presentan una buena eficiencia de captura de particulado fino (Bravo, 2000, Pág.32.)

**Lavador Venturi:** el lavador inyecta chorros finos de líquido (generalmente agua) a alta velocidad en la estricción de un Venturi, el líquido se atomiza y se mezcla con la corriente de gases en la zona de expansión. Los lavadores Venturi pueden alcanzar 99% de eficiencia en la remoción de partículas pequeñas. Sin embargo, una desventaja de este dispositivo es la producción de aguas residuales.

Estos equipos presentan costos operacionales muy elevados (Bravo, 2000, Pág. 32).

**Precipitador electrostático:** Los precipitadores electrostáticos (PES) capturan las partículas sólidas en un flujo de gas por medio de la electricidad. La eficiencia de estos equipos depende de factores como la humedad de los gases del efluente, la resistividad de la mezcla del gas, partículas, etc. Permite tratar grandes flujos de gas a altas temperaturas y posee buena eficiencia para la recolección de particulado fino. (Bravo, 2000, Pág. 32).

Las tecnologías más utilizadas por las fuentes fijas en el Valle de Aburrá que registran equipo para el control del material particulado son: ciclones, multiciclones y filtros de mangas.

El Cuadro 1 muestra la participación porcentual de las tecnologías utilizadas por las fuentes fijas y el registro de las que no utilizan o no registran equipo de control, así: 38.8% de las fuentes fijas no utilizan equipo de control y 19% no registran utilizar equipo. De las fuentes fijas registradas en la base

de datos 21.8% utilizan ciclón, 8% filtros de mangas, 7.2% multiciclón, 2.3 % lavadores y 2.3 % otras tecnologías para el control del material particulado.

### Cuadro 1. Equipos de control

(Participación Porcentual)

	Ninguno	No Registran	Ciclón	Filtros	Multiciclón	Lavadores	Precipitadores
<b>Fuente</b>	38.8	19	21.8	8	7.2	2.3	0.6

Fuente: Elaborado por los autores con base en información suministrada por el Área Metropolitana.

Aunque los precipitadores son poco utilizados en el control de las emisiones, se hará mención como una alternativa de control adicional. La razón para ello es la eficiencia de estos equipos en el tratamiento de material particulado fino.

### 3.2. Metodología de estimación de los costos

Se han considerado tres alternativas de control de la contaminación: precipitadores electrostáticos, filtros de mangas y lavadores Venturi, cuyas características han sido descritas anteriormente.

Para la estimación de los costos totales asociados a cada alternativa de control se consideraron los costos de inversión y los costos anuales de operación (tanto directos como indirectos). En el caso de los costos totales de inversión, estos deben traducirse en un costo anual equivalente, de manera, que incorpore tanto los costos directos como los indirectos.

El costo total de inversión se traduce en una cuota fija anual de inversión durante la vida útil del equipo; esta cuota se obtiene al utilizar el factor de recuperación del capital, el cual considera una cuota fija que incorpora capital e intereses.

La cuota anual se calcula como se muestra a continuación:

$$Cuota = VP * FRC(n; i) \quad (1)$$

Donde:

VP: Valor presente de la inversión

FRC: Factor de recuperación del capital que cubre capital e intereses.

Se considera una vida útil de los equipos de 20 años ( $n=20$ ) de acuerdo con la EPA y una tasa de descuento del 12%, correspondiente a la tasa de descuento utilizada por el Banco Mundial para proyectos sociales. Con lo anterior se calcula el FRC como sigue:

$$FRC = \frac{(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1} = \frac{(1+0.12)^{20} * 0.12}{(1+0.12)^{20} - 1} = 0.1338. \quad (2)$$

Una vez hallados estos datos, se procede a caracterizar los diferentes costos a considerar.

### 3.2.1. Inversión total de capital

Con los sistemas de control de la contaminación atmosférica, es necesario hacer, además, un desembolso previo para que el sistema pueda ser construido y puesto en operación. Este desembolso cubre los costos de adquisición e instalación del sistema y sus correspondientes equipos auxiliares, así como los costos de terreno, edificios e instalaciones anexas. Los costos dentro de la planta se dividen en directos e indirectos.

De otro lado, el capital invertido está relacionado con el diseño de la instalación, el cual está condicionado por la capacidad de procesar un caudal de emisiones o gases. Este caudal refleja en sí el nivel de producción y el tipo de proceso productivo de la firma.

Según lo anterior, es posible establecer una relación funcional del tipo  $C=kQ^n$ , para determinar los costos de inversión de acuerdo al caudal de la fuente. En esta relación,  $k$  dependerá del equipo de control y  $Q$  corresponde al caudal de la fuente.

### 3.2.2. Costo total anual de operación

Estos costos se refieren a los desembolsos realizados a lo largo de la vida útil del equipo de control. Se dividen en directos e indirectos. De acuerdo con Bravo, 2000, los costos directos tienden a ser proporcionales al flujo de gas procesado. Una forma funcional que exprese lo anterior es:  $C = aQ + b$ . Además, debe considerarse que estos costos dependen del número de horas de operación al día de los equipos. Completando la forma funcional anterior se tiene:  $C=(aQ+b)HRS$ , donde  $HRS$  denota las horas promedio de operación al día.

Los costos indirectos de operación son independientes del caudal procesado. En este caso se calculan como un 60% de los costos de mantenimiento y los costos de mano de obra.

### 3.3. *Cálculo de las funciones de costo*

Utilizando la metodología propuesta por la EPA, 2002, *Handbook, Air Pollution Control Cost Manual*; es posible obtener funciones de costos anuales para cada equipo de control en función del caudal de emisiones o gases que debe ser tratado.

De acuerdo con Bravo (2000), estas funciones de costos involucran un grado de agregación que se traduce en una menor precisión para el cálculo de los costos, de utilizar un determinado equipo de control del material particulado.

Para la obtención de las funciones de costos totales se utilizó la metodología de la EPA, 2002, y los antecedentes de la tesis de Bravo, 2000. La información se complementó con datos de la mano de obra, precio de la energía, el agua y el tipo de cambio en Colombia para el año 2004.

Para la obtención de las funciones de costo marginal se procedió a derivar la función de costos totales anuales de la instalación de un equipo de control.

El análisis detallado de la metodología utilizada para el cálculo de las funciones de costo total y marginal se presenta a continuación.

#### 3.3.1. *Función de costos para el precipitador electrostático*

##### 3.3.1.1. *Cálculo del costo total de inversión*

Para el caso del precipitador electrostático, es preciso tener en cuenta los siguientes supuestos:

- Se utilizó para todos los cálculos una eficiencia genérica del colector del 98%.<sup>12</sup>
- Se considera como material de las placas del precipitador, EL acero al carbón, el cual tiene un multiplicador del costo del equipo de 1,0.

Asumiendo los supuestos anteriores, se desarrolla la metodología para la estimación de los costos, la cual se ejemplifica con tres fuentes que tienen distintos caudales<sup>13</sup>.

---

<sup>12</sup> Este dato fue tomado directamente de la tesis de Bravo (2000) "Proposición y Evaluación de Instrumentos de Incentivo Económico para Mejorar la Calidad del Aire en Santiago: Aplicación al caso de las Fuentes Fijas". Pág. 87.

<sup>13</sup> El caudal de cada fuente se calculó como el flujo de gas que sale a través de una chimenea a una velocidad determinada.

**Cuadro 2. Cálculo del costo total de inversión precipitadores.**

Caudal (f <sup>3</sup> /min)	Ac (ft <sup>2</sup> )	Precio Placas (US\$)	Equipo Auxiliar <sup>14</sup> (US\$)	CE (Costo del Equipo)	PEC (US\$)	Costo Total de Inversión (US\$)
43176	30710	402506	40251	442756	566728	1269472
14942	10628	206802	20680	227482	291177	652237
6871	4887	184159	18416	202575	259296	580823

Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes disponibles en Bravo, 2000 y EPA, 2002, *Handbook, Air Pollution Control Cost Manual*. Sexta Edición.

A partir de los resultados obtenidos (costo total de inversión), es posible determinar un costo de capital anual, utilizando para ello el factor de recuperación de capital, el cual considera una cuota anual fija durante la vida útil del equipo, la cual cubre capital e intereses.

*3.3.1.2. Cálculo del costo de inversión anual*

Utilizando un tipo de cambio de 2759,6 \$/US, vigente a la fecha del estudio, se obtienen los resultados presentados en el Cuadro 3. Con los costos totales de inversión anualizados, en pesos, se obtiene una función que determine los costos anuales de inversión de acuerdo al caudal de la fuente.

**Cuadro 3. Costos de inversión anualizados precipitadores.**

Costo Total Inversión (US\$)	Tipo de cambio (\$/US\$)	Costo Total de Inversión (\$)	Costo de Inversión anualizado (\$/año)
1269472	2759,6	3503234931	469013112
652237	2759,6	1799915646	240972706
580823	2759,6	1602840421	214588275

Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes de Bravo, 2000 y EPA, 2002, *Handbook, Air Pollution Control Cost Manual*. Sexta Edición.

<sup>14</sup> El costo del equipo auxiliar se toma como un 10% del precio de las placas colectoras. Esto por recomendación de expertos, Ingeniero Jorge Puerta. INGEAIRE LTDA.

Con los resultados anteriores, y considerando una relación funcional entre los costos anualizados y el caudal de cada fuente, del tipo:

$$\text{Costo anual} \propto Q^{1.8}$$

Se obtiene la siguiente función para los costos anuales de inversión:

$$\text{CI} = 1502739 * Q^{0,564160}$$

Donde:

CI: Costos de inversión anualizados

Q: Caudal de la fuente.

### **3.3.1.3. Cálculo de los costos directos de operación**

Para determinar estos costos para un precipitador electrostático, es necesario determinar la energía necesaria para el raspador y el ventilador, los costos de mano de obra y los materiales de manutención.

#### **Cuadro 4. Costos totales directos de operación precipitadores.**

<b>Costo Total Energía (\$/año)</b>	<b>MO. Directa (\$/año)</b>	<b>MO. Supervisión (\$/año)</b>	<b>MO. Coordinación (\$/año)</b>	<b>MO. Manutención (\$/año)</b>	<b>Materiales de Manutención (\$/año)</b>	<b>CTDO (\$/año)</b>
39018073	816870	122530	269567	27022792	15639442	82889275
13503161	816870	122530	269567	19418687	8035337	42166154
6209679	816870	122530	269567	18538887	7155537	33113072

Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes de Bravo, 2000.

De acuerdo con Bravo (2000), los costos directos de operación tienden a ser proporcionales al flujo de gas procesado y se dividen en variables y semivariables. Así, se les puede asociar la siguiente forma funcional:

$$\text{CTDO} = a * Q + b$$

Luego, utilizando los valores de CTDO y aplicando un análisis de regresión lineal, se obtiene:

$$\text{CTDO} = 1586,817Q + 19339607$$

<sup>15</sup> Esta relación funcional significa que los costos anuales de inversión de un precipitador son proporcionales al flujo de gas ó caudal a procesar.

Donde:

CI: Costos totales directos de operación

Q: Caudal de la fuente

Si además, se considera que los CTDO dependen del número de horas de operación, tomando en cuenta que las fuentes funcionan las 24 horas al día, dividiendo por 24 horas se obtiene:

$$CTDO = (66,11Q + 805817) * HRSP$$

Donde:

CI: Costos totales directos de operación

Q: Caudal de la fuente

HRSP: Horas promedio de operación día

### 3.3.1.4. Cálculo de los costos indirectos de operación

Los costos indirectos de operación se estiman como un 60% de los costos de mano de obra (directa, supervisión, coordinación, manutención), más el costo de materiales de manutención:

### Cuadro 5. Costos indirectos de operación precipitadores.

M.O Directa (\$/año)	M.O Supervisión (\$/año)	M.O Coordinación (\$/año)	M.O Manutención (\$/año)	Materiales de Manutención (\$/año)	Factor	Costos Indirectos de Operación (\$/año)
816870	122530	269567	27022792	15639442	0,6	26322721
816870	122530	269567	19418687	8035337	0,6	17197795
816870	122530	269567	18538887	7155537	0,6	16142035

Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes de Bravo, 2000.

Unificando la información anterior en una sola función de costo total de abatimiento para precipitadores electrostáticos se tiene que:

$$CT = 1502739 * Q^{0,564160} + (66,11Q + 805817) * HRSP + 14327050,46$$

Donde:

CT: Costo total para precipitadores electrostáticos

Q: Caudal de la fuente

HRSP: Horas promedio de operación del equipo al día.

La función de costo marginal para precipitadores se obtiene derivando la anterior expresión funcional. Así:

$$\partial CT = 847785,2 * Q^{-0,43} + 66,11$$

Donde:

$\partial CT$ : Costo marginal para precipitadores electrostáticos

Q: Caudal de la fuente

### 3.3.2. Función de costos para filtros de mangas

Para el caso de filtros de mangas es necesario tener en cuenta los siguientes supuestos, los cuales tienen incidencia sobre los resultados finales:

- Como material de fabricación de las mangas se considera poliéster.
- El método de limpieza utilizado es *JET-PULSE*

Con los supuestos antes mencionados se aplica la metodología de estimación de costos, la cual se ejemplifica con tres fuentes que tienen distintos caudales de emisión.

#### 3.3.2.1. Cálculo del costo total de inversión

### Cuadro 6. Cálculo costo total de inversión filtros de mangas.

Caudal (ft <sup>3</sup> /min.)	A <sub>tc</sub> (ft <sup>2</sup> )	Costo equipo sin mangas (US\$)	Costo inicial mangas (CB) (US\$)	Equipo Auxiliar <sup>16</sup> (US\$)	EC (US\$)	PEC (US\$)	Costo Total de Inversión (US\$)
47238,4	12009,8	76366,2	9007,3	8537,35	93911	123023	266960
13642,5	4624,6	35363,6	3468,4	3883,2	42715,3	55957	121426,7
2547,9	863,7	14483,1	647,8	1513,1	16644	21803	47313,7

Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes de Bravo (2000)

<sup>16</sup> Los costos de los equipos auxiliares se obtuvieron como un 10% del costo del equipo por recomendación de expertos. Ingeniero Jorge Puerta. INGEAIRE LDITA.

Para el caso de las tres fuentes que ejemplifican este informe se puede encontrar el costo anualizado en pesos, utilizando un tipo de cambio de 2759,6 \$/US\$, como se muestra a continuación:

3.3.2.2. *Cálculo del costo de inversión anualizado*

**Cuadro 7. Costo de inversión anualizado filtros de mangas.**

<b>Costo Total de Inversión (US\$)</b>	<b>Tipo de cambio (\$/US\$)</b>	<b>Costo Total de Inversión (\$)</b>	<b>Costo de Inversión Anualizado (\$/año)</b>
266960	2759,6	736704094	98629944
121426,7	2759,6	335089222	44861745
47313,7	2759,6	130566890	17480295

Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes de disponibles en Bravo, 2000.

Con los resultados obtenidos anteriormente para las tres fuentes fijas y utilizando la relación funcional anterior, es posible, aplicando un análisis de regresión de potencia,<sup>17</sup> obtener una función para los costos anualizados en función del caudal de cada fuente.

La función obtenida es:

$$CI = 827728,102 * Q^{0,403027}$$

Donde:

CI: Costos de inversión anualizados

Q: Caudal de la fuente

3.3.2.3. *Cálculo de los costos directos de operación*

Para calcular los costos directos de operación para un filtro de mangas, es necesario determinar la energía para el ventilador, el aire comprimido para la limpieza de las mangas, el costo de reemplazo de éstas, los costos de mano de obra y los materiales de manutención.

<sup>17</sup> Análisis de regresión lineal para un modelo linealizado a partir de la relación funcional mencionada.

**Cuadro 8. Costos totales directos de operación.**

Costo total de energía + aire (\$)	Costo reemplazo mangas (\$/año)	Mano obra directa (\$/año)	Mano obra supervisión (\$/año)	Mano obra manutención (\$/año)	Materiales de manutención (\$/año)	CTDO (\$/año)
55131222	21454602	4901220	735556	1633740	1633740	85490081
15921952	8032902	4901220	735556	1633740	1633740	32859111
2973528	1500197	4901220	735556	1633740	1633740	13377981

Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes de EPA, 2002.

Utilizando los valores de CTDO y aplicando un análisis de regresión lineal, se obtiene:

$$\text{CTDO} = 1643,998Q + 9381097$$

Donde:

CI: Costos de totales directos de operación

Q: Caudal de la fuente.

Debe considerarse que los CTO dependen del número de horas de operación. Por lo tanto, tomando en cuenta que las fuentes analizadas funcionan las 24 horas al día, se obtiene:

$$\text{CTDO} = (1643,998Q + 9381097) * \text{HRSP}$$

Donde:

CTDO: Costos totales directos de operación

HRSP: Horas promedio de operación del equipo al día

Q: Caudal de la fuente

### 3.3.2.4. *Cálculo de los costos indirectos de operación*

Los costos indirectos de operación se calculan como un 60% de los costos de mano de obra (directa, supervisión, manutención) más el costo de materiales de manutención.

**Cuadro 9. Costos indirectos de operación.**

M.O Directa (\$/año)	M.O Supervisión (\$/año)	M.O Manutención (\$/año)	Materiales de manutención (\$/año)	Factor	Costos Indirectos de Operación
4901220	735556	1633740	1633740	0,6	5342553

Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes disponibles en Bravo, (2000) y EPA, 2002, *Handbook, Air Pollution Control Cost Manual*. Sexta Edición.

Unificando la información anterior en una sola función de costo total para filtros de mangas se tiene que:

$$CT = 827728,102 * Q^{0,403027} + (1643,998Q + 9381097) * HRS + 5342553,6$$

La función de costo marginal para filtros se obtiene derivando la anterior expresión funcional. Así:

$$\partial CT = 333596,7737Q^{-0,596973} + 1643,998$$

Donde:

$\partial CT$ : Costo marginal para filtros de mangas

Q: Caudal de la fuente

**3.3.3. Función de Costos para el Lavador Venturi**

Para el caso del lavador Venturi, es necesario tener en cuenta ciertos supuestos, los cuales tienen incidencia en el resultado final, particularmente:

- Como material de fabricación del lavador Venturi, se considera acero inoxidable, material para el cual se debe multiplicar el valor del lavador Venturi obtenido a partir de las fórmulas que se presentan a continuación, por el factor 2,3<sup>18</sup>.

Teniendo en cuenta el supuesto anterior, se desarrolla la metodología para estimación de costos, la cual se ejemplifica con tres fuentes que tienen distintos caudales de emisión.

<sup>18</sup> Mayores detalles en relación con este factor de amplificación en EPA, 2001, *Handbook, Control Technologies for Hazardous Air Pollutants*; citado por Bravo (2000).

3.3.3.1. *Cálculo del costo total de inversión***Cuadro 10. Costo total de inversión lavador Venturi.**

Fuente	Caudal (ft <sup>3</sup> N/min)	Valor del Venturi (US\$)	Equipo auxiliar <sup>19</sup> (US\$)	CE (Costo del equipo US\$)	PEC	Costo Total de Inversión
Grande	47238	63576	6357.6	69933.6	84620	161623
Mediana	6913	9319	931.9	10251	12403	23103
Pequeña	75	117	11.7	129	156	291

Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes disponibles en Bravo (2000) y EPA, 2002, *Handbook, Air Pollution Control Cost Manual*. Sexta Edición.

A partir de los resultados obtenidos (costo total de inversión), es posible determinar un costo de capital anual, utilizando para ello un factor de recuperación de capital, de 0,13388, el cual considera una cuota fija anual durante la vida útil del equipo, que cubre capital e intereses.

3.3.3.2. *Cálculo del costo de inversión anualizado***Cuadro 11. Costo de inversión anualizado.**

Fuente	Costo Total de Inversión (US\$)	Tipo de Cambio <sup>20</sup> (\$/US\$)	Costo Total de Inversión (\$)	Costo de Inversión Anualizado (\$/año)
Grande	161623	2759.6	446015948	59712615
Mediana	23103	2759.6	65375839	8752517
Pequeña	291	2759.6	824043	110323

Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes disponibles en Bravo (2000).

Utilizando un tipo de cambio de 2759.6 \$/US\$ se obtienen los resultados presentados en el cuadro anterior. Con los costos totales de inversión anualizados, en pesos, se obtiene una función que determine los costos anuales de inversión de acuerdo al caudal de efluente.

<sup>19</sup> Se estima el costo del equipo auxiliar como el 10 % del valor del Venturi, por recomendación de expertos. Ingeniero Jorge Puertas. Ingeaire LTDA.

<sup>20</sup> Tipo de cambio de 2759.6 \$/US\$ a mayo de 2004.

Y aplicando un análisis de regresión para un modelo linealizado la función obtenida es:

$$CI = 1391Q^{0,98}$$

Donde:

CI: Costo de inversión anualizado

Q: Caudal de la fuente

### 3.3.3.3. Cálculo de los costos directos de operación

Para determinar los costos directos de operación de un lavador Venturi, es necesario determinar:

- La energía necesaria para el ventilador
- El costo por consumo de agua
- Costos de mano de obra y materiales de manutención

### Cuadro 12. Costos totales de operación.

Fuente	Caudal ft <sup>3</sup> /min	Costo Total Energía + Agua (\$)	Costo de M.O. Directa (\$/año)	Costo M.O. Supervisión (\$/año)	Costo M.O. Manutención (\$/año)	Costo Materiales de Manutención (\$/año)	CTDO (\$/año)
Grande	47238	1738451462	3267480	400122	1633740	1633740	174538 6544
Mediana	6913	254428377	3267480	400122	1633740	1633740	261363 459
Pequeña	75	2756677	3267480	400122	1633740	1633740	969175 9

Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes disponibles en Bravo (2000) y EPA, 2002, *Handbook, Air Pollution Control Cost Manual*. Sexta Edición.

Utilizando los valores del CTDO y aplicando un análisis de regresión lineal se obtiene la siguiente función:

$$CTDO = 36801,73372Q + 6933980,97$$

Donde:

CTDO: Costos totales directos de operación

Q: Caudal de la fuente

Debe considerarse que los CTO dependen del número de horas de operación. Por lo tanto, tomando en cuenta que las fuentes analizadas funcionan las 24 horas al día, se obtiene:

$$CTDO = (1533,4*Q + 288916)*HRSP$$

Donde:

CTDO: Costos totales directos de operación

Q: Caudal de la fuente

HRSP: Horas promedio de operación del equipo.

### 3.3.3.4. Cálculo de costos indirectos de operación

Según la metodología EPA (2002)<sup>21</sup>, los costos indirectos de operación se estiman como un 60 % de los costos de mano de obra (directa, de supervisión, manutención) más el costo de materiales de manutención.

### Cuadro 13. Costos indirectos de operación.

Fuente	Caudal (ft <sup>3</sup> /min)	Costo de M.O. Directa (\$/año)	Costo M.O. Supervisión (\$/año)	Costo M.O. Manutención (\$/año)	Costo Materiales de Manutención (\$/año)	Factor	Costos Indirectos de Operación (\$/año)
Grande	47238	3267480	400122	1633740	1633740	0.6	<b>4161049</b>
Mediana	6913	3267480	400122	1633740	1633740	0.6	<b>4161049</b>
Pequeña	75	3267480	400122	1633740	1633740	0.6	<b>4161049</b>

Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes disponibles en Bravo (2000) y EPA, 2002, *Handbook, Air Pollution Control Cost Manual*. Sexta Edición.

Unificando la información anterior en una sola función de costo total para lavadores Venturi se tiene que:

$$CT = 1391Q^{0,98} + (1533,4*Q + 288916)*HRSP + 4161049$$

La función de costo marginal para lavadores Venturi se obtiene derivando la anterior expresión funcional. Así:

$$\partial CT = 1363,2*Q^{-0,02} + 1533,4$$

<sup>21</sup> EPA, 2002, *Handbook, Air Pollution Control Cost Manual*. Sexta Edición. Pág. 2-57, para lavadores Venturi.

Donde:

$\partial CT$ : Costo marginal para lavadores Venturi

Q: Caudal de la fuente

### Análisis de resultados

Los problemas de salud ocasionados por la situación de contaminación del aire que afecta el Valle de Aburrá deben ser motivo de preocupación de todos. De allí la pertinencia de realizar trabajos desde la academia con miras a orientar la política ambiental de aquellas entidades encargadas de velar por un ambiente sano.

La metodología empleada en este estudio para calcular las funciones de costo total y marginal de abatimiento de material particulado para fuentes fijas en el Valle de Aburrá sugiere el cálculo inicial de los costos de inversión, los costos directos de operación y los costos indirectos de operación de los equipos de control de la contaminación, en este caso precipitadores electrostáticos, lavadores Venturi y filtros de mangas.

Según el análisis de los resultados, los costos totales de inversión y los directos de operación dependen en gran medida de las especificaciones técnicas de cada equipo de control y a su vez éstas dependen del flujo de gases a procesar. Por ejemplo, para precipitadores electrostáticos, un caudal que supere los 14.942 ft<sup>3</sup>/min. Sugiere un área para las placas colectoras superior a los 10.328ft<sup>2</sup>. Así mismo, para filtros de mangas, el área filtrante neta y bruta está en directa proporción con el caudal de emisiones que se desea tratar.

Comparando los costos de adquisición de los diferentes equipos para el control del material particulado, esto es, los costos de inversión, se puede decir que los precipitadores electrostáticos resultan ser más costosos que las otras alternativas de control, filtros y lavadores, como se puede observar en el siguiente cuadro:

**Cuadro 14. Comparación entre las alternativas de control y los costos de inversión.**

Alternativa de control	Caudal (ft <sup>3</sup> /min)	Costos de inversión(\$/año)
Precipitador	2017	99423210
Filtros	2017	16169788
Lavador	2017	2564395

Fuente: Elaborado por los autores con base en los resultados hallados.

Por lo tanto, es comparativamente más barato comprar e instalar un lavador Venturi o un filtro de mangas que un precipitador electrostático. Incurrir en los costos de adquirir un precipitador es pertinente si lo que se desea lograr es una alta eficiencia en el tratamiento de material particulado fino. En teoría este equipo logra una eficiencia en el colector de hasta un 99% cuando las partículas son inferiores a 10 micras.

Sin embargo, las otras alternativas también logran altos niveles de eficiencia y representan costos menores a la hora de su adquisición e instalación. Un ejemplo de ello son los lavadores Ventura, que pueden lograr la misma eficiencia que los precipitadores y adicionalmente los costos de inversión son mucho menores. El problema con estos equipos radica en los elevados costos operacionales que, en la mayoría de los casos, sobrepasan hasta cuatro veces los costos de inversión.

La alternativa de control para el material particulado que puede alcanzar una alta eficiencia en la remoción de material fino y, además, es comparativamente más barata, son los filtros de mangas, que según opinión de expertos<sup>22</sup> son, también, los más usados en la práctica industrial. En el Valle de Aburrá, por ejemplo, para las empresas que registran equipo de control, los filtros de mangas ocupan el segundo lugar en uso después de los ciclones.

La forma funcional de los costos totales de abatimiento de material particulado para precipitadores electrostáticos expresa una relación directamente proporcional entre estos y el caudal a tratar. Es decir, a medida que aumenta el tratamiento de flujos de emisiones, aumentan los costos de inversión y los costos directos de operación. Igual comportamiento registran las curvas de costos totales para las demás alternativas de control, filtros y lavadores.

Con respecto a la función de costo marginal de abatimiento de material particulado para precipitadores, filtros y lavadores, existe una relación inversa entre el caudal adicional a tratar y los costos marginales, tal como se muestra a continuación:

---

<sup>22</sup> Ingeniero Jorge Puerta. Ingeaire LTDA.

**Cuadro 15. Resumen caudal vs. costo marginal**

<b>Caudal adicional a tratar (ft<sup>3</sup>/min.)</b>	<b>Costo marginal Precipitadores (\$)</b>	<b>Costo marginal Filtros de Mangas(\$)</b>	<b>Costo marginal Lavadores(\$)</b>
500	58577	8166	1204
1000	43480	5399	1187
10000	16154	1366	1134
30000	10072	709	1109
45000	8461	556	1100

Fuente: Elaborado por los autores con base en los resultados hallados.

Observando la información contenida en el cuadro anterior, a medida que aumentan los niveles adicionales de flujo a tratar, se incurre en menores costos marginales de abatimiento. Esto confirma la observación empírica de que es comparablemente más barato limpiar cantidades iniciales de contaminación, pero una vez se alcancen niveles muy bajos, reducirlos aún más requiere tratamientos muy avanzados.

**Conclusiones**

La actual situación de contaminación atmosférica en el Valle de Aburrá, implica la necesidad de estudios que involucren evaluaciones y/o comparaciones de costos asociados a la aplicación de distintos instrumentos de gestión y su efectividad en la reducción de emisiones de material particulado.

Los resultados obtenidos en este trabajo conducen a conocer los costos en que incurre una empresa por mitigar o disminuir las emisiones de gases que diariamente expulsa a la atmósfera, en este caso el material particulado.

Según el análisis de los resultados, los costos totales de inversión y los directos de operación dependen en gran medida de las especificaciones técnicas de cada equipo de control y a su vez éstas dependen del flujo de gases a procesar

Comparando los costos de adquisición de los diferentes equipos para el control del material particulado, esto es, los costos de inversión, se puede decir que los precipitadores electrostáticos resultan ser más costosos que las otras alternativas de control, filtros y lavadores.

En particular, la comparación de los costos marginales de abatimiento de las alternativas tecnológicas analizadas en este artículo nos confirma la evidencia teórica que establece una relación inversa entre los costos marginales y el nivel adicional de caudal a tratar.

## Referencias bibliográficas

Alarcón, Gustavo, et al (1995). "Modelo de dispersión de material particulado para el Valle de Aburrá". En: *El Reto. El medio del medio ambiente*. Vol. 15, N° 27.

Arrubla, Gabriel. Contaminación atmosférica (2003). "Un asesino que anda suelto". En: *El reto. El medio del medio ambiente*. N° 48, nov-dic 2003.

CONTRALORÍA GENERAL DE MEDELLÍN, (1999). "Estado actual de los recursos naturales y del medio Ambiente. Impacto ambiental de la Gestión Municipal".

---

(2001). "Informe del Estado de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente".

---

(2001). "Informe del Estado de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente".

ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY (2002). *Handbook Air pollutants Control Cost Manual*. Sexta edición.

FEAL, Veira (2002). Filtros de Mangas (I). Características típicas y mecanismos básicos. En: *Ingeniería Química*, Vol.34, N° 394, octubre. Madrid, España.

Field, Barry & Azqueta, Diego (1995). "Economía y Medio Ambiente". Tomo I. McGraw-Hill. Colombia.

Hahn, Robert. (1983) "*Marquet power and transferable property rights*". *Quarterly Journal of Economics*. N° 99, pp. 735-765.

INTERCONEXIÓN ELÉCTRICA S.A. (2004). Informe del Mercado de Energía Mayorista: Gerencia, operación y administración del mercado de energía. Mayo 25 de 2004. [www2.isa.com/gmem/admón.\\_mcdo/Informes/indice.htm](http://www2.isa.com/gmem/admón._mcdo/Informes/indice.htm)

Koutsoyiannis, A. Teoría Moderna de los Costos. España.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Resolución 1351 de 1995. Bogotá.

---

Decreto 2107 del 30 de noviembre de 1995. Bogotá.

---

Resolución 619 de 1997. Bogotá.

MINISTERIO DE SALUD. Decreto 2 del 11 de Enero de 1982. Bogotá.

Montero, Juan Pablo, et al (2001). "Análisis de Mercado de Emisiones de Material Particulado en Santiago de Chile". Estudios Públicos, N°81. pp. 97-126.

Moreno, Víctor & Cifuentes, Luis (1997). Estimación de los costos de reducción de emisiones de material particulado provenientes de calderas en la Región Metropolitana. En: *Apuntes de Ingeniería*. N° 20, Chile.

O'ryan, Raúl & Bravo, Rodrigo (2001). "Permisos Transables frente a la introducción de un combustible limpio: estudio de caso para PM-10 y Nox en Santiago, Chile". Estudios de Economía. Vol.28, N° 2, pp.267-291.

Pearce, David & Turner, Kerry (1995). "Economía de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente". Celeste Ediciones, Madrid.

PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA, Decreto 948, Bogotá 1995.

Ramírez, Gloria (2003). Programa de Protección y Control de la Calidad del Aire en el Valle de Aburrá. En Redaire, boletín 11, julio 2003. Medellín.

Ramírez, John (2001). Red de Vigilancia de la Calidad del Aire en el Valle de Aburrá. En Redaire, boletín N° 6, Julio de 2001. Medellín.

\_\_\_\_\_ (2002). Diagnóstico de la Calidad del Aire por Dióxido de Azufre y Dióxido de Nitrógeno en el Valle de Aburrá. En Redaire, boletín N° 10, Julio de 2002. Medellín.

Recibido el 21 de agosto de 2006. Aprobado para su publicación el 16 de noviembre de 2006.