

**VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA DESCONTAMINACIÓN DEL AIRE EN BOGOTÁ  
POR MEDIO DEL USO MASIVO DE CONVERTIDORES CATALÍTICOS**

**GUILLERMO LLINÁS ROCHA**

**Proyecto de grado presentado como requisito  
para el título de Ingeniería Ambiental**

**Director**

**EDUARDO BEHRENTZ**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C.**

**2008**

**TABLA DE CONTENIDO**

RESUMEN .....	1
1 INTRODUCCIÓN.....	2
2 OBJETIVOS .....	4
2.1 Objetivo General .....	4
2.2 Objetivos Específicos .....	4
3 ANTECEDENTES .....	5
3.1 Análisis Costo Beneficio .....	5
3.2 Convertidores Catalíticos .....	6
3.3 Contaminación del Aire en Bogotá.....	7
4 GENERALIDADES .....	9
4.1 Contaminantes en el Aire de Bogotá .....	9
4.1.1 Monóxido de Carbono .....	9
4.1.2 Óxidos de Nitrógeno .....	9
4.1.3 Ozono .....	10
4.2 Impactos de la Contaminación Sobre la Salud .....	10
4.2.1 Impactos Sobre la Salud del Ozono.....	10
4.2.2 Impactos Sobre la Salud de los Óxidos de Nitrógeno .....	11
4.2.3 Impactos Sobre la Salud del Monóxido de Carbono .....	11
4.3 Parque Automotor de Bogotá .....	12
4.3.1 Número Total de Fuentes Móviles de la Ciudad de Bogotá .....	12
4.3.2 Contribución de las Fuentes Móviles a la Contaminación del Aire.....	13
4.4 Convertidores Catalíticos .....	14
5 METODOLOGÍA .....	17

---

5.1	Nivel de Emisiones Atribuibles a la Política de Imposición de Convertidores Catalíticos.	17
5.2	Costos de la Política de Imposición de Convertidores Catalíticos .....	21
6	RESULTADOS .....	23
6.1	Nivel de Emisiones.....	23
6.2	Costos del Programa.....	25
7	TEORÍA Y METODOLOGÍA PARA ESTIMAR BENEFICIOS DE REDUCIR LA CONTAMINACIÓN.....	28
7.1	Reducción en los Niveles de Morbilidad y Mortalidad .....	28
7.1.1	Curvas de Concentración-Respuesta .....	28
7.2	Precio de Disminuciones en Morbilidad y Mortalidad .....	30
7.2.1	Disponibilidad a Pagar.....	31
7.2.2	Costos de Enfermedad o Muerte.....	33
8	CONCLUSIONES.....	35
9	BIBLIOGRAFÍA.....	36

**INDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Efectos sobre la salud del O3 por tiempos de exposición y concentración. ....	11
Tabla 2. Efectos sobre la salud del CO por tiempos de exposición y concentración. ....	12
Tabla 3. Número de vehículos por categoría en Bogotá.....	13
Tabla 4. Contribución de las fuentes móviles a diferentes contaminantes .....	13
Tabla 5. Emisiones de contaminantes de diferentes fuentes móviles.....	14
Tabla 6. Distribución tecnológica de vehículos de pasajeros. ....	14
Tabla 7. Convertidor catalítico de tres vías. ....	15
Tabla 8. Descripción de categorías relevantes al estudio. ....	17
Tabla 9. Factor de emisión de categorías IVE para ejemplo de cálculo .....	21
Tabla 10. Emisiones de COV de vehículos particulares de gasolina modelo 2006 en el año 2006 ..	21
Tabla 11. Comparación de estudios de inventario de emisiones para Bogotá .....	25
Tabla 12. Costos anuales de equipamiento de convertidores catalíticos .....	25
Tabla 13. Costos del equipamiento de convertidores catalíticos entre 1998 y 2006 .....	26
Tabla 14. Costos de reducción de las emisiones por toneladas .....	26
Tabla 15. Curva de concentración-respuesta para Bogotá .....	30
Tabla 16. Costos totales promedio de patologías en los hospitales de I, II y III nivel. ....	33

**INDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Emisiones de COV de vehículos particulares y taxis entre 1996 y 2007 .....	23
Figura 2. Emisiones de CO de vehículos particulares y taxis entre 1996 y 2007 .....	23
Figura 3. Emisiones de NO <sub>x</sub> de vehículos particulares y taxis entre 1996 y 2007 .....	24
Figura 4. Emisiones de PM <sub>2,5</sub> de vehículos particulares y taxis entre 1996 y 2007 .....	24

## RESUMEN

Este documento presenta una evaluación del impacto de la Resolución 005 de 1996 que establece la implementación de convertidores catalíticos para los vehículos de modelos posteriores a 1998. Se llevó a cabo un análisis de las emisiones generadas por vehículos particulares y taxis entre los años 1997 y 2006 usando los registros vehiculares de la Secretaría de Tránsito y Transporte para la ciudad de Bogotá. Las emisiones de estos fueron estimadas utilizando los factores de emisión del International Model of Vehicular Emissions.

Se ha estimado que esta legislación ha tenido un impacto significativo sobre los niveles de emisiones de monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno en Bogotá. Para el año 2006 se estimaron reducciones del 37% para el monóxido de carbono, del 42% para los compuestos orgánicos volátiles y del 36% para los óxidos de nitrógeno, frente a un escenario en el cual no se hubiera creado la legislación. La implementación de convertidores catalíticos además habría permitido mantener unos niveles relativamente constantes en las emisiones de estos tres contaminantes desde 1997.

Adicionalmente, se ha estimado que los costos de implementación de los convertidores catalíticos en Bogotá han sido del orden de los US\$ 23 millones. Esto ha permitido establecer unos costos de reducción por tonelada de US\$ 338 para COV, de US\$ 47 para CO y de US\$ 662 para NO<sub>x</sub>. Sin embargo, no se ha podido establecer los beneficios sobre la salud de las reducciones en las emisiones por no contar con un modelo de calidad del aire que permita las relacione con las concentraciones de contaminantes a las que están expuestos los individuos. No obstante, se ha dejado planteada una metodología de estimación de estos beneficios junto con una revisión de los estudios relacionados para Bogotá con el fin de ser utilizados en una futura investigación.

## 1 INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire representa uno de los mayores retos ambientales para la ciudad de Bogotá. La actual Secretaría de Ambiente (SDA) ha realizado importantes esfuerzos para incrementar la concientización de la población sobre dicho problema (Uribe, 2005). Esto se ve reflejado en la existencia de una disponibilidad a pagar por parte de los ciudadanos para reducir su probabilidad de padecer problemas respiratorios asociados con la contaminación del aire, (Maturana, 2000 y Carriazo, 2000). No obstante, las entidades ambientales de la ciudad no han evaluado los impactos de los programas de reducción de la contaminación implementados y por lo mismo carecen de estudios que les permitan establecer una agenda de prioridades, (Uribe, 2005).

Las concentraciones de algunos contaminantes del aire en algunas zonas de la ciudad son superiores los estándares recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) e incluso existen violaciones respecto a la norma anual local. El contaminante de mayor preocupación es el material particulado inferior a  $10\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ). De acuerdo con el estudio de Giraldo y Behrentz (2005), la estrategia que mayor impacto generaría sobre la reducción de las emisiones de  $\text{PM}_{10}$  consiste en el mejoramiento de la calidad del combustible diésel por medio de la reducción de su contenido de azufre.

Adicionalmente al mejoramiento de la calidad de los combustibles, una de las políticas que mayores beneficios ha mostrado en la reducción de la contaminación del aire urbano a nivel internacional es el uso masivo de tecnologías de control de emisiones, tales como el de convertidores catalíticos en la flota vehicular. Estas tecnologías han probado ser de tal importancia que actualmente es obligatorio incorporarlos en los vehículos nuevos en la mayor parte de los países del mundo. Colombia no es la excepción, la obligatoriedad del uso de convertidores catalíticos fue implementada para los vehículos nuevos posteriores a 1998. Esto, sin embargo, debido a la lenta rotación de la flota significa que aún existe una fracción importante de la flota vehicular que no cuenta con esta tecnología. Los convertidores catalíticos son supremamente eficientes para reducir significativamente el nivel de emisiones de un gran número de contaminantes, tales como el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles.

Algunos estudios realizados para Bogotá reflejan que la contaminación por ozono ( $O_3$ ) troposférico y por óxidos de nitrógeno tienen impactos significativos. Lozano (2004) analizando datos hasta el año 1998, encontró que un aumento de 10% en los niveles de  $NO_2$  produce un incremento de alrededor de 40 admisiones hospitalarias respiratorias diarias. Gaitán et al. (2007) encontró que el ozono es el segundo contaminante de mayor preocupación en Bogotá.

Este estudio busca realizar una primera aproximación a la valoración de los impactos sobre la reducción en las concentraciones de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles y ozono gracias a la implementación de convertidores catalíticos en las fuentes vehiculares. Para esto se busca analizar el impacto de la legislación que obliga a incorporar estos sistemas en los vehículos nuevos a partir del año 1998.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

Determinar la efectividad de una normativa de incorporación de convertidores catalíticos en los vehículos nuevos en Colombia.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Evaluar los impactos en el mejoramiento de la calidad del aire debido a la implementación de convertidores catalíticos.
- Realizar un análisis de los costos asociados al uso de tecnologías de control de emisiones para reducir la contaminación del aire en Bogotá.
- Establecer la costo-efectividad de la legislación que estableció estándares de emisiones para los vehículos nuevos en Colombia.
- Plantear una metodología para evaluar los beneficios de un programa de esta índole.

### 3 ANTECEDENTES

#### 3.1 Análisis Costo Beneficio

##### Krupnick & Portney (1991)

Realizan un análisis costo-beneficio del impacto de reducción del ozono y del material particulado en los Estados Unidos y para Los Angeles. Encuentra que aunque la fase inicial de descontaminación fue costo-efectiva, los costos de nuevos controles superan los beneficios por un margen considerable.

##### Voorhees et al. (2001)

Este documento presenta una revisión de estudios científicos de análisis costo beneficio sobre el control de la contaminación del aire en Tampa, Santa Clara, Denver, Los Angeles, Jakarta, Philadelphia, El Paso, Bangkok, Beijing, Bombay, Delhi, Hong Kong, Kuala Lumpur, Shanghai y Tokio.

##### Freeman (2002)

Realiza una evaluación de las principales leyes ambientales de los Estados Unidos desde 1970. Encuentra que las políticas de reducción de emisiones de las fuentes móviles del Clean Air Act exceden los beneficios por una proporción de más de 20 a 1. Esto se debe a que la mayoría de los beneficios del programa consisten en reducciones en la mortalidad asociada con el material particulado proveniente de las fuentes fijas y otra parte significativa pero menor a la eliminación del plomo de la gasolina, mientras que los beneficios de la implementación de convertidores catalíticos no compensan sus costos.

##### Banco Mundial (2002)

Este estudio realiza una valoración de los beneficios en la salud de reducir las concentraciones de  $O_3$  y  $PM_{10}$  en el área Metropolitana de Ciudad de México. Se encuentra que para el año 2000, los beneficios de reducción del 10% en los niveles de  $PM_{10}$  son de US\$2 billones y de  $O_3$  son de US\$200 millones.

#### Cifuentes et. al (2005)

Analizan las concentraciones de contaminantes, los impactos en la salud y su valor monetario en 41 de las principales ciudades de América Latina y el Caribe. Para esto utilizan principalmente los datos de  $PM_{10}$  pues no hay información disponible en muchas ciudades para otros contaminantes. Adicionalmente, estos autores recopilan la información de todos los estudios realizados sobre valoración de impactos de la contaminación del aire en América Latina y el Caribe y lo comparan con los estudios de Estados Unidos.

#### Muller & Mendelsohn (2007)

Los autores utilizan un modelo integrado de evaluación para calcular los daños marginales de las emisiones de 10.000 fuentes (fijas y móviles) en los Estados Unidos durante el año 2002. Calculan los daños marginales para  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $NO_x$ ,  $NH_3$ ,  $SO_2$  y COV teniendo en cuenta las reacciones atmosféricas y la producción de contaminantes secundarios. Con este modelo analizan escenarios de incremento de las emisiones y estiman los beneficios del Clean Air Act en \$48 billones de dólares para el año 2000.

### **3.2 Convertidores Catalíticos**

#### Kaspar et al. (2003)

Estos autores realizan una revisión del estado del arte de la investigación sobre los convertidores catalíticos de tres vías y plantean la situación en la que se encuentra esta tecnología de reducción de emisiones en la actualidad a la luz de mayores exigencias en la regulación de la calidad del aire. También, se señala las nuevas tendencias en la investigación sobre el tema y los diseños pensados para mejorar aún más estos equipos.

#### Gerard & Lave (2005)

Estos autores analizan los principales aspectos relacionados con el uso de políticas para forzar la implementación de tecnologías. Se concentran en analizar como el Clean Air Act de 1970 de los Estados Unidos llevó a la implementación de tecnologías de reducción de emisiones en los vehículos en 1975 por medio del anuncio de sanciones a los fabricantes que no cumplieran con

una meta de reducción para una fecha establecida. El artículo encuentra que la credibilidad de la agencia (en este caso la EPA) para obligar a cumplir los estándares, la competencia en la investigación y desarrollo y la incertidumbre respecto a los resultados tecnológicos son factores claves para forzar la implementación de tecnologías.

#### Santos & Costa (2008)

Comparan la eficiencia de conversión de los convertidores catalíticos de tres vías cerámicos y metálicos. Encuentran que los de cerámica presentan mayores niveles de conversión de COV y CO a bajas velocidades y los metálicos presentan mayores niveles de conversión a altas velocidades.

### **3.3 Contaminación del Aire en Bogotá**

#### Ibáñez y McCollel (2001)

En un trabajo inédito presentado en Junio de 2001, muestran los resultados de un estudio realizado a comienzos del 2000 sobre la disponibilidad a pagar de los habitantes de Bogotá por evitar un día de enfermedad respiratoria. Los autores encuentran una disponibilidad a pagar de US\$25,78 para evitar un día de episodios graves y de US\$21,80 para episodios medios.

#### Torres (2002)

Esta tesis de maestría estima unas funciones dosis-respuesta entre las concentraciones de PM<sub>10</sub> y SO<sub>2</sub> y la morbilidad diaria en ocho localidades de Bogotá. Para esto utiliza un modelo de poisson autoregresivo y encuentra que hay un efecto significativo sobre la salud incluso por debajo de las normas de concentración establecidas. Se establece que un incremento marginal de los niveles de SO<sub>2</sub> genera un incremento mayor en la morbilidad que un incremento en el PM<sub>10</sub> y que los rezagos de la variable de contaminación tienen un efecto importante.

#### Lozano (2004)

Busca determinar una curva de Concentración-Respuesta para PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, y O<sub>3</sub> para la ciudad de Bogotá en el año 1998. Encuentra que la temperatura no afecta la morbilidad en Bogotá, lo que podría deberse a una baja variabilidad. Además, encuentra que para PM<sub>10</sub> y NO<sub>2</sub> un aumento en los niveles de contaminación generan un aumento en la morbilidad, pero que para O<sub>3</sub> la relación

no es significativa para un modelo con esta sola variable y negativo por problemas de medida en un modelo que incorpora las tres variables. La población más vieja es la más afectada por la contaminación.

#### Giraldo & Behrentz (2005)

Realizan un inventario de emisiones de contaminantes por fuentes móviles en la ciudad de Bogotá con base en datos recolectados entre el 17 y el 25 de enero de 2005. El inventario se apoya en el modelo IVE y permite analizar el impacto de diferentes alternativas de reducción de las emisiones.

#### Uribe (2005)

El autor estudia los casos de la contaminación del aire en Bogotá y en Medellín. Argumenta que los efectos sobre de la contaminación en la salud en Bogotá no han sido publicados y consisten principalmente en Tesis de Maestría. Adicionalmente, plantea que las entidades ambientales de ambas ciudades no han evaluado los impactos de los programas de reducción de la contaminación implementados y carecen de estudios que les permitan establecer una agenda de prioridades.

#### Gaitán et al. (2007)

Este estudio realiza una evaluación de los registros de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá. Se desarrolla una metodología para estimar un índice porcentual de excedencia de la norma y se encuentra que el material particulado es el contaminante de mayor excedencia de la norma. Además, se encuentra que los siguientes contaminantes en nivel de excedencia son el ozono, el dióxido de azufre y el monóxido de carbono.

## 4 GENERALIDADES

### 4.1 Contaminantes en el Aire de Bogotá

Desde Agosto de 1997 se comenzaron a monitorear los niveles de contaminación del aire de forma continua. Actualmente se cuenta con un sistema de 13 estaciones de monitoreo de calidad del aire que registran concentraciones atmosféricas de niveles de  $PM_{10}$ , CO, PST,  $NO_x$ ,  $O_3$  y  $SO_x$ . Desde el año 2001 se establecieron estándares de calidad del aire para Bogotá. Algunos de los contaminantes que presentan violaciones a estos niveles y serán analizados en esta investigación son el CO, los  $NO_x$  y el  $O_3$  (Gaitán et al, 2007). A continuación se hace una breve descripción de estos contaminantes y los efectos sobre la salud que están asociados a ellos.

#### 4.1.1 *Monóxido de Carbono*

El monóxido de carbono es un gas incoloro, inodoro, insípido y menos denso que el aire. El CO es producido por la combustión incompleta de combustibles fósiles y se encuentra muy cercanamente relacionado con el uso de la gasolina en fuentes vehiculares.

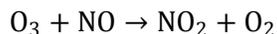
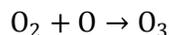
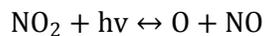
#### 4.1.2 *Óxidos de Nitrógeno*

El nitrógeno puede formar ocho óxidos diferentes. De éstos, solamente tres aparecen en la atmósfera: el óxido nitroso ( $N_2O$ ), el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ). El  $N_2O$  no es tóxico, por lo que no nos interesaremos en él, mientras que el NO y el  $NO_2$  son tóxicos e intervienen en los procesos fotoquímicos troposféricos.

El NO y el  $NO_2$  provienen principalmente de fuentes antropogénicas, en particular de reacciones de combustión a temperaturas elevadas como pueden darse en la combustión de motores o en algunos procesos industriales.

Los óxidos de nitrógeno intervienen en los procesos fotoquímicos y en la formación de ozono

como contaminante secundario por acción de la luz. El ciclo fotolítico de estos compuestos se puede resumir de la siguiente manera:



#### **4.1.3 Ozono**

A nivel urbano, el ozono es un contaminante secundario formado por la reacción entre los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles (COV) en presencia de luz solar. Esto hace que la concentración de ozono tenga una relación inversa con la de dióxido de nitrógeno, se incrementa al medio día cuando hay mayor luz solar y se produce más fácilmente en Bogotá que dado su altura presenta una mayor intensidad lumínica.

#### **4.2 Impactos de la Contaminación Sobre la Salud**

Según estudios médicos, los efectos de la contaminación del aire sobre la salud se pueden dividir en dos tipos, los efectos agudos y los efectos crónicos. Los efectos agudos están relacionados con períodos de exposición de corta duración (minutos u horas) a altos niveles de contaminación y se caracterizan por ser inmediatos, aunque suelen ser reversibles. Por otro lado, los efectos crónicos se caracterizan por exposiciones prolongadas o repetidas durante varios días, meses o años. Estos suelen tardar en manifestarse, su duración es indefinida y tienden a ser irreversibles.

##### **4.2.1 *Impactos Sobre la Salud del Ozono***

De acuerdo con la OMS, el ozono en el aire puede generar problemas respiratorios, promover ataques de asma, generar reducciones en la capacidad pulmonar y promover enfermedades pulmonares. Incluso existen estudios epidemiológicos que muestran que el ozono tiene efectos sobre la mortalidad diaria independientemente de los niveles de material particulado.

La Tabla 1 muestra algunos de los efectos del ozono sobre la salud de acuerdo con los niveles de concentración y el tiempo de exposición (IDEAM, 2005).

Concentración	Tiempo de Exposición	Efectos sobre la salud
0.08-0.15 ppm	< 1 hora	Tos y dolores de cabeza. Disminución de la tasa máxima de flujo respiratorio y la capacidad vital forzada al hacer ejercicio
0.12 ppm	1 a 3 horas	Incremento en la sensibilidad de las vías aéreas, asociado con un incremento en la sensibilidad a otros contaminantes
0.12 ppm	2 a 5 horas	Disminución en la función pulmonar en niños y adultos durante ejercicios fuertes
0.24 ppm	1 a 3 horas	Incremento de la frecuencia respiratoria, disminución en la resistencia de las vías aéreas y de la función pulmonar al hacer ejercicio

Fuente: IDEAM, 2005

Tabla 1. Efectos sobre la salud del O<sub>3</sub> por tiempos de exposición y concentración.

Los efectos crónicos del ozono en el aire incluyen un engrosamiento de los bronquios respiratorios terminales, bronquitis crónica, fibrosis y cambios enfisematosos, tos, opresión torácica y sequedad de fauces.

#### **4.2.2 Impactos Sobre la Salud de los Óxidos de Nitrógeno**

Los efectos agudos del NO<sub>x</sub> consisten en cambios en la función pulmonar debido al daño de las paredes capilares que pueden causar un edema para una exposición de 2 a 24 horas. Los síntomas típicos de la intoxicación son ardor y lagrimeo en los ojos, tos, disnea y pueden llevar en altas concentraciones a la muerte. Los efectos crónicos incluyen alteraciones irreversibles en la estructura de los pulmones y afectan la función pulmonar de los asmáticos. Adicionalmente, el dióxido de nitrógeno se asocia con la hemoglobina produciendo metahemoglobina que en concentraciones altas causa bronquiolitis obliterante, fibrosis bronquiolar y enfisema.

#### **4.2.3 Impactos Sobre la Salud del Monóxido de Carbono**

El monóxido de carbono afecta principalmente la capacidad respiratoria al reducir la hemoglobina disponible para transportar oxígeno a las células del cuerpo. El transporte de oxígeno a los tejidos se produce por la absorción del oxígeno del aire inhalado por la hemoglobina presente en la

sangre formando oxihemoglobina. Al entrar en contacto la hemoglobina y el monóxido de carbono se produce carboxihemoglobina, un compuesto muy estable que no se disocia e impide la formación de oxihemoglobina, disminuyendo la cantidad de oxígeno que llega a los tejidos.

Los síntomas de la contaminación por monóxido de carbono son mareos, dolor de cabeza, náuseas, sonoridad en los oídos y latidos de corazón intensos. Si el 50% de la hemoglobina es transformado en carboxihemoglobina se puede producir la muerte del individuo. Los efectos del monóxido de carbono varían de acuerdo con el tiempo de exposición y las concentraciones. Algunos de los efectos del CO sobre la salud se presentan en la Tabla 2. Se puede observar que existen efectos sobre la salud humana incluso para concentraciones menores a los límites impuestos por la norma de 8 horas vigente (8.8 ppm) e incluso del histórico de promedios diarios (2 ppm).

Concentración	Tiempo de Exposición	Efectos sobre la salud
5 ppm	14 horas	Incremento de la resistencia de las vías aéreas y aumento de la hiperactividad bronquial
2.5 ppm	2 horas	Incremento de la resistencia de las vías aéreas
1 ppm	2 horas	Pequeños cambios en la capacidad vital forzada
0.5 - 5 ppm	3-60 minutos	En individuos con bronquitis crónica produce un incremento de las vías aéreas
0.5 ppm	20 minutos	En individuos asmáticos con 10 minutos de ejercicios moderados reduce la tasa máxima de flujo respiratorio

*Fuente: IDEAM, 2005*

Tabla 2. Efectos sobre la salud del CO por tiempos de exposición y concentración.

### **4.3 Parque Automotor de Bogotá**

#### **4.3.1 *Número Total de Fuentes Móviles de la Ciudad de Bogotá***

De acuerdo con los registros de la Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá, hasta el 2006 la ciudad tenía registrados 868.335 vehículos. El número de vehículos por categoría se puede ver en la Tabla 3.

Categoría	Vehículos
Motos	60.667
Camiones	18.194
Buses	31.821
Buses articulados	805
Buses alimentadores	381
Vehículos particulares	705.432
Taxis	51.035
<b>TOTAL</b>	<b>868.335</b>

*Fuente: STT, 2006*

Tabla 3. Número de vehículos por categoría en Bogotá

Como se puede observar, la mayoría de los vehículos corresponden a vehículos particulares, seguido por las motos y por los taxis. A continuación nos interesaremos en los vehículos particulares y los taxis que representan el 87% de la flota vehicular de la ciudad.

#### **4.3.2 Contribución de las Fuentes Móviles a la Contaminación del Aire**

La Tabla 4 presenta los aportes de las fuentes móviles al total de emisiones generadas en la ciudad de Bogotá. Las fuentes móviles realizan la principal contribución a las emisiones de CO, COV y NO<sub>x</sub> por lo que las políticas de reducción de estos contaminantes deben ir principalmente enfocadas a este tipo de fuentes.

Contaminante	Contribución de las Fuentes Móviles
CO	85%
COV	92%
NO <sub>x</sub>	77%
PM <sub>10</sub>	13%
SO <sub>x</sub>	31%

*Fuente: CIIA (Julio 2002)*

Tabla 4. Contribución de las fuentes móviles a diferentes contaminantes

El inventario de emisiones vehiculares más actualizado para Bogotá es el realizado por Giraldo y Behrentz (2005). Los aportes por tipo de fuente móvil se presentan en la Tabla 5 y el número de vehículos que cuentan con convertidores catalíticos en la Tabla 6.

	VP*	Motos	Taxis	Buses	Camiones	TOTAL
	Ton.día <sup>-1</sup>					
CO	1000	90	270	700	500	2560
COV	70	45	25	35	30	205
NOX	40	0	20	60	30	150
PM10	0,2	1	0,3	3	1	5,5
SOX	1	0	1	3	1	6

\*VP: Vehículos Particulares

Fuente: Behrentz & Giraldo (2005)

Tabla 5. Emisiones de contaminantes de diferentes fuentes móviles

Los vehículos particulares y los taxis generar alrededor de la mitad de las emisiones de CO, COV y NO<sub>x</sub>.

Categoría	Tipo de Combustible	Convertidor Catalítico (CC)
Vehículos particulares	98% Gasolina	47% con CC
	2% Diesel	53% sin CC
Taxis	81% Gasolina	28% sin CC
	15% Gas Natural	72% con CC

Fuente: Behrentz & Giraldo (2005)

Tabla 6. Distribución tecnológica de vehículos de pasajeros.

Otra información relevante respecto al parque automotor que incide sobre las emisiones de contaminantes es la edad media de los vehículos. Behrentz & Giraldo (2005) estiman la edad media de los vehículos particulares en 9 años y la de los taxis en 5 años.

#### 4.4 Convertidores Catalíticos

Los primeros convertidores catalíticos fueron implementados en Estados Unidos en 1978 luego de que el Clean Air Act de 1970 anunció a los productores de vehículos que debían reducir las emisiones de CO, COV y NO<sub>x</sub> en un 90% en un período de cuatro a cinco años. Luego de algunas ampliaciones en los plazos de cumplimiento y de una importante inversión en investigación y desarrollo, surgieron los convertidores catalíticos que fueron incorporados obligatoriamente en los vehículos (Gerard & Lave, 2005).

Los convertidores catalíticos consisten en un sistema de cerámica en forma de panal de abeja que contiene platino, rodio y paladio. Estos compuestos actúan como catalizadores de reacciones de oxidación y reducción de algunos contaminantes emitidos por la combustión de los vehículos.

Las reacciones químicas que ocurren en un catalizador sólo funcionan efectivamente a altas temperaturas, motivo por el cual este dispositivo se ubica cerca al motor para calentarse más rápido. Para una operación efectiva, se requiere de una temperatura superior a los 300°C.

Se estima que la vida útil de los convertidores catalíticos se encuentra entre 90 y 100 mil kilómetros. Sin embargo, se debe realizar una revisión de éste cada 50 mil kilómetros para verificar que esté operando adecuadamente.

La Tabla 7 presenta la información más relevante sobre estas tecnologías de reducción de emisiones que se han encontrado en la literatura.

Convertidor catalítico de tres vías	
Emisiones afectadas	CO, NOx y COV
Efectividad	Reducciones hasta del 90%.
Viabilidad	Deben ser usados con gasolina sin plomo. Carros con estos convertidores son vendidos alrededor del mundo.
Costos	Costos adicionales de hasta US\$400 por carro (antes de impuestos).
Comentarios	Requiere un control electrónico del motor y unos controles del motor bien ajustados. Una mayor eficiencia en el uso de la gasolina trae beneficios importantes.
Referencia	Allemand et al., 1990

Tabla 7. Convertidor catalítico de tres vías.

La Resolución 005 del 9 de Enero de 1996 de los Ministerios de Medio Ambiente y de Transporte reglamenta los niveles permisibles de emisión de contaminantes por fuentes móviles terrestres. Los niveles de emisión establecidos en esta legislación para los vehículos a partir del año modelo 1997 obligaba a incorporar sistemas de control de emisiones como los convertidores catalíticos y a pasar a un sistema de inyección de combustible dejando atrás los carburadores. El modelo que debía cumplir con estos estándares fue cambiado al modelo 1998 por la Resolución 909 de 1996, haciendo que los convertidores catalíticos llegaran a Colombia a partir del año 1998. Desde ese

año, todos los vehículos nuevos deben incorporar un convertidor catalítico en su sistema de escape de gases.

Colombia debe importar sus convertidores catalíticos pues estos no son fabricados al interior del país. No obstante, de acuerdo con la Resolución 864 del 8 de Agosto de 1996 del Ministerio de Medio Ambiente, los convertidores catalíticos, por ser equipos de control ambiental, están sujetos a un descuento especial del impuesto a las ventas del 50% tanto en la venta al consumidor final como en la importación que haga el consumidor final como está contemplado en el Artículo 485-1 del Estatuto Tributario. El Decreto 4342 de 2004 declara exentos del impuesto de importación a los convertidores catalíticos provenientes de México y Venezuela.

Esta tecnología de reducción de emisiones ha tenido un éxito muy grande a nivel internacional con experiencias muy exitosas de disminución en las concentraciones de contaminantes como los presentados en Los Angeles. No obstante, el impacto de esta política ambiental en Colombia nunca ha sido evaluado. Este trabajo busca realizar una primera aproximación a una valoración costo-beneficio de un programa de descontaminación del aire.

## 5 METODOLOGÍA

A continuación se presenta la metodología utilizada para estimar la reducción en las emisiones vehiculares asociados con el uso de convertidores catalíticos y sus costos de implementación.

### 5.1 Nivel de Emisiones Atribuibles a la Política de Imposición de Convertidores Catalíticos

Para estimar la reducción en el nivel de emisiones atribuible a la imposición de los convertidores catalíticos en los vehículos posteriores al modelo 1998 se realizó una estimación del inventario de emisiones anual de los vehículos particulares y los taxis entre los años 1997 y 2006. Se supuso que el efecto de la legislación consistía en la diferencia entre un caso base en el cual los vehículos no hubieran contado con convertidores catalíticos ni con un sistema de inyección de gasolina y se comparó con la situación real en la cual estos sistemas fueron incorporados.

El cálculo de las emisiones totales generadas por estos vehículos se realizó por medio de la siguiente ecuación:

$$E = fe * FA * N$$

Donde E corresponde al nivel de emisión vehicular (masa contaminante/unidad de tiempo), fe al factor de emisión del contaminante (masa contaminante/distancia), FA es el factor de actividad de la categoría vehicular (distancia/tiempo) y N es el número de fuentes de la categoría vehicular.

La información de los vehículos fue obtenida de la base de datos de la Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá (hoy Secretaría de Movilidad) que contiene la placa e información sobre el tipo y modelo del vehículo, el cilindraje, el combustible que utiliza y el servicio que presta. Para este estudio se tomaron únicamente los vehículos particulares y los taxis. Las categorías de la base de datos relevantes a este tipo de vehículos se presentan en la Tabla 8. Para una descripción más detallada de la base de datos consultar Herrera (2007).

TIPO DE VEHÍCULO	MODELO	CILINDRAJE	TIPO DE SERVICIO	COMBUSTIBLE
Automóvil, camioneta y campero	Entre 1927 y 2006	Entre 0 (no reportado) y 7500	Particular, público y oficial	ACPM, Gashol, gas, gasolina y otro

Tabla 8. Descripción de categorías relevantes al estudio.

Para efectos del estudio se supuso que los vehículos taxis correspondían a todos los vehículos tipo automóvil de servicio público. Los demás vehículos tipo automóvil, camioneta o campero de servicio oficial o particular se tomaron como vehículos particulares. La diferenciación entre los taxis y los vehículos particulares se realizó puesto que para estimar los niveles de emisión se requiere del factor de actividad de los vehículos que es significativamente diferente entre los vehículos particulares y los taxis.

El recorrido llevado a cabo por los vehículos particulares (VP) es de alrededor de 17.000 km por año con una tasa de reducción del 2% anual, mientras que el de taxis es de 58.000 km por año con tasa de reducción anual del 4% (Giraldo & Behrentz, 2005). Para cada año entre 1997 y 2006 se calculó el factor de actividad de cada vehículo de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$FA_{VP} = 17.000 \frac{\text{Km}}{\text{año}} * (1 - 0.02)^{\text{Edad}}$$

$$FA_{\text{Taxis}} = 58.000 \frac{\text{Km}}{\text{año}} * (1 - 0.04)^{\text{Edad}}$$

$$\text{Edad} = \text{Año de estimación} - \text{Año del modelo}$$

De esta forma se logró obtener un factor de actividad decreciente dándole mayor importancia a los vehículos nuevos que son usados más frecuentemente. Además, esto permitió obtener un factor de actividad dinámico, dependiente del año de la estimación, sin asumir que los vehículos más antiguos hubieran salido de circulación.

Por último, para estimar los factores de emisión de cada vehículo se recurrió al International Model of Vehicular Emissions (IVE) que presenta factores de emisión de múltiples contaminantes para vehículos con diferentes características. Las características más relevantes son la descripción del vehículo, su peso, el tipo de combustible, el control de aire/gasolina, el sistema en el escape de gases y el recorrido del vehículo. Como plantea Herrera (2007), para la clasificación de las fuentes móviles de la base de datos de la STT en las categorías del IVE se deben hacer algunas suposiciones y simplificaciones respecto a la flota vehicular de Bogotá.

El tipo de vehículo de nuestro interés es un auto o camión pequeño, únicamente se analizaron los vehículos con combustibles diesel y gasolina pues los demás no eran significativos. El peso de los vehículos fue establecido de la siguiente manera:

- Liviano si cilindraje < 2L
- Mediano si  $2L \leq$  cilindraje < 4L
- Pesado si cilindraje  $\geq$  4L

Los vehículos cuyo cilindraje no se estaba reportado correspondían al 0,18% del total y fueron retirados de la muestra.

Por otro lado, para los sistemas de control de aire/gasolina y los sistemas de escape se supuso lo siguiente:

- Los modelos anteriores a 1988 usaban carburador, pues este sistema era el de mayor utilización hasta esa fecha.
- Los modelos entre 1988 y 1997 la mitad tenían carburador y la mitad usaban inyección de un punto. Esta suposición se basa en el hecho de que en los 70's y 80's se produjo el cambio a la inyección haciendo que a comienzos de los 90's casi todos los vehículos particulares vendidos en los países desarrollados usaran el sistema de inyección. En países menos desarrollados como Colombia el cambio tecnológico estuvo rezagado algunos años. Para el escenario base se mantiene esta composición en los vehículos incluso después de 1998.
- Los modelos posteriores a 1998 tienen inyección de un punto y vienen equipados con convertidor catalítico de tres vías para el escenario de la legislación. Esto se debe a que los nuevos estándares de emisión obligan a tener un sistema de inyección y usar convertidores catalíticos en el sistema de escape.
- Antes de 1998 ningún vehículo venía equipado con convertidor catalítico. Debido al alto costo de los sistemas de reducción de emisiones se habría evitado incorporarlos cuando los estándares no estaban definidos.

De acuerdo con estas suposiciones se utilizaron los factores de emisión de las categorías vehiculares del índice IVE 0 a 8, 45 a 53, 81 a 89 y 739 a 755.

Sobre la edad del vehículo, el modelo IVE plantea cambios en los factores de emisión cuando los vehículos han recorrido más de 80.000 Km y más de 160.000 Km. De acuerdo con los factores de actividad estimados, estos recorridos son alcanzados en alrededor de 5 y 10 años por los vehículos particulares y en 2 y 3 años por los taxis.

A partir de toda la información anterior se asociaron los factores de emisión correspondientes a las diferentes cohortes de vehículos. Para cada año entre 1997 y 2006 se estimó el inventario de emisiones de vehículos particulares y taxis bajo dos escenarios, con convertidores catalíticos e inyección (escenario real) y sin convertidores catalíticos y la mitad de los vehículos con inyección (escenario base hipotético). El modelo planteado supone que todos los vehículos nuevos empiezan a circular a comienzos del año. De acuerdo con esto, se utiliza la siguiente ecuación para estimar el nivel de emisiones totales en cada año para cada tipo de contaminante.

$$E_{tc} = \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1927}^t \sum_{j=1}^3 \sum_{l=1}^2 f_{e_{ijkltc}} * FA_{ijklt} * N_{ijkl}$$

Donde t representa el año de estimación de la emisiones, c el tipo de contaminante (CO, COV, NO<sub>x</sub> y PM<sub>2.5</sub> que fue incluido para validar los resultados), k el tipo de vehículo (taxi y vehículo particular), i el año del modelo de los vehículos, j el peso del vehículo (liviano, mediano y pesado) y l el tipo de combustible.

A continuación se plantea un ejemplo de cálculo del nivel de emisiones de COV generados por los vehículos particulares de gasolina modelo 2006 en el año 2006 para el escenario con legislación. Según la base de datos de la Secretaría de Tránsito y Transporte del modelo 2006 a gasolina hay 34.522 vehículos livianos, 12.038 vehículos medianos y 767 vehículos pesados. El factor de actividad de estos vehículos se estima de 17.000 Km en el año 2006 y el factor de emisión viene dado por las categorías IVE que se presentan en la Tabla 9.

Descripción	Combustible	Peso	Control Aire/Combustible	Sistema de escape	Kilometraje	Factor de Emisión COV (g/km)	Índice IVE
Automóvil / Pequeño camión	Gasolina	Liviano	Inyección Unipunto	CC 3 vías	<79K km	0,06	81
Automóvil / Pequeño camión	Gasolina	Mediano	Inyección Unipunto	CC 3 vías	<79K km	0,15	84
Automóvil / Pequeño camión	Gasolina	Pesado	Inyección Unipunto	CC 3 vías	<79K km	0,15	87

Tabla 9. Factor de emisión de categorías IVE para ejemplo de cálculo

Siguiendo la ecuación de cálculo de emisiones se pueden estimar que la contribución de los vehículos particulares de gasolina modelo 2006 a las emisiones totales de COV en el año 2006 fueron de 70 ton (Tabla 10).

Peso de vehículo	Factor de Emisión COV (g/km)	Factor de Actividad (km/año)	Número de vehículos	Emisiones COV (ton/año)
Ligero	0,06	17.000	34.522	37
Mediano	0,15	17.000	12.038	31
Pesado	0,15	17.000	767	2

Tabla 10. Emisiones de COV de vehículos particulares de gasolina modelo 2006 en el año 2006

## 5.2 Costos de la Política de Imposición de Convertidores Catalíticos

Los costos de una estrategia de reducción de la contaminación deben tener en cuenta la cantidad de dinero necesaria para compensar a los afectados por un proyecto. Para obtener una buena aproximación de los costos se debe tener en cuenta no sólo los costos directos sino también los costos indirectos. Los costos directos se refieren a los costos de inversión que pueden ser estimados directamente, tales como las inversiones en tecnología y maquinaria necesarias para implementar el proyecto, los salarios pagados a los encargados de su implementación y los costos de operación y mantenimiento del proyecto descontados en el tiempo. Los costos indirectos se refieren a los costos asociados con el proyecto pero que no están valorados en éste. Por ejemplo, corresponden a los costos de adaptarse al nuevo proyecto y las externalidades generadas por éste.

En el caso del equipamiento de convertidores catalíticos, los costos directos corresponderían al costo pagado por las ensambladoras de vehículos para incorporar esta tecnología de reducción de

emisiones y su efecto en el precio al consumidor. De acuerdo con entrevistas realizadas al gerente de una compañía importadora de esta tecnología en Colombia, los precios de los convertidores catalíticos enviados a las ensambladoras varían entre los 70 y los 150 dólares, Revista Motor (19 de Mayo de 2007). Incorporando los costos por cambio en procedimientos y teniendo en cuenta que el precio de los convertidores catalíticos depende directamente del cilindraje del vehículo, se puede establecer un incremento en los costos de la producción de vehículos de acuerdo con nuestras categorías del peso del vehículo.

- Liviano: \$100 dólares
- Mediano: \$150 dólares
- Pesado: \$300 dólares

Los anteriores costos tienen unos ciertos niveles de incertidumbre y podrían diferir entre las marcas de los vehículos. Sin embargo, este tipo de análisis suele tener cierto nivel de incertidumbre y lo que se busca es establecer un orden de magnitud para los costos totales.

A partir de la base de datos de la Secretaría de Tránsito y Transporte se toman los vehículos nuevos en cada año y con estos precios se estima el costo anual de la incorporación de estas tecnologías de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Costo}_t = \sum_{i=1}^3 P_i * N_{ti}$$

Donde  $P_i$  representa el precio del convertidor catalítico para cada tipo de vehículo (liviano, mediano y pesado) y  $N_{ti}$  el número de vehículos nuevos del tipo  $i$  en el año  $t$ .

Con el fin de ver la sensibilidad de los resultados a las tasas de descuento, los costos totales del programa entre los años 1998 y 2006 son llevados a precios de 1998 por medio de un descuento del 4%, el 8% y el 12% anual utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Costo Total}_{1998} = \sum_{t=1998}^{2006} \frac{\text{Costo}_t}{(1+r)^{t-1998}}$$

Donde  $\text{Costo}_t$  representa el costo en el año  $t$  y  $r$  la tasa de descuento utilizada.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Nivel de Emisiones

De la Figura 1 a la Figura 4 se presentan los resultados de las estimaciones de los niveles de emisiones de COV, CO, NO<sub>x</sub> y PM10 generados por los vehículos particulares y los taxis entre los años 1997 y 2006. Estas figuras muestran la curva de emisiones que se habría obtenido si no se hubiera obligado a usar los convertidores catalíticos (sin catalizadores) y la estimación de la curva actual (con catalizadores).

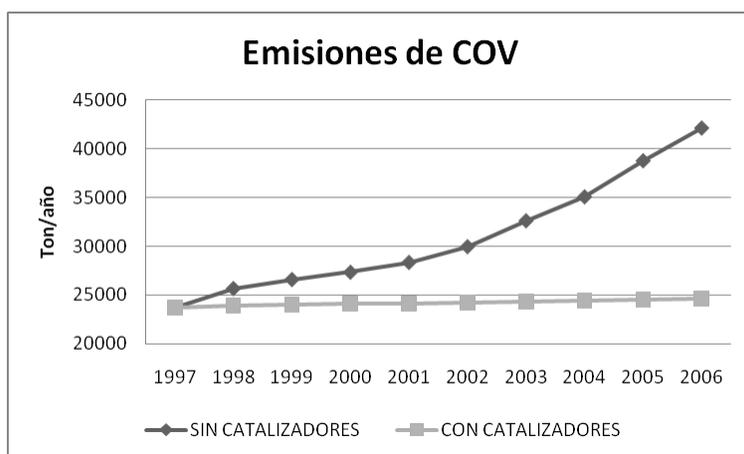


Figura 1. Emisiones de COV de vehículos particulares y taxis entre 1996 y 2007

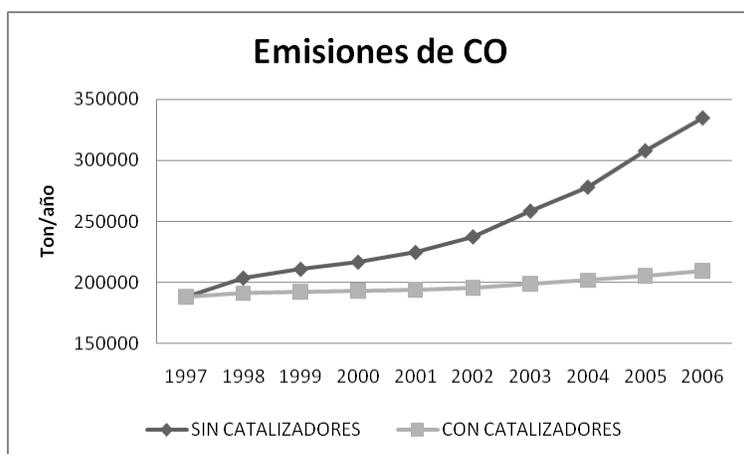


Figura 2. Emisiones de CO de vehículos particulares y taxis entre 1996 y 2007

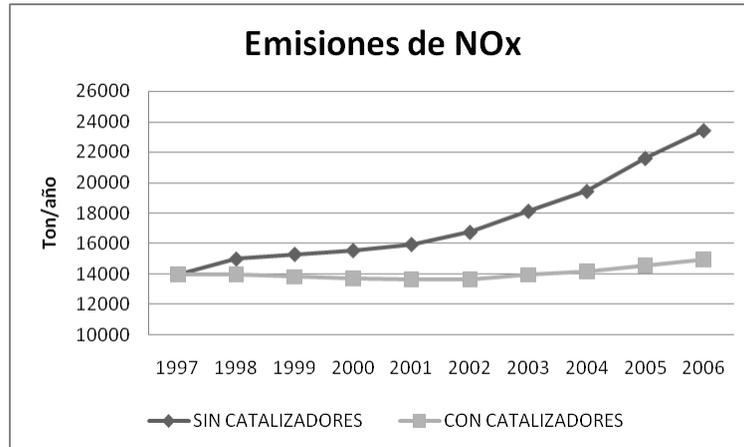


Figura 3. Emisiones de NO<sub>x</sub> de vehículos particulares y taxis entre 1996 y 2007

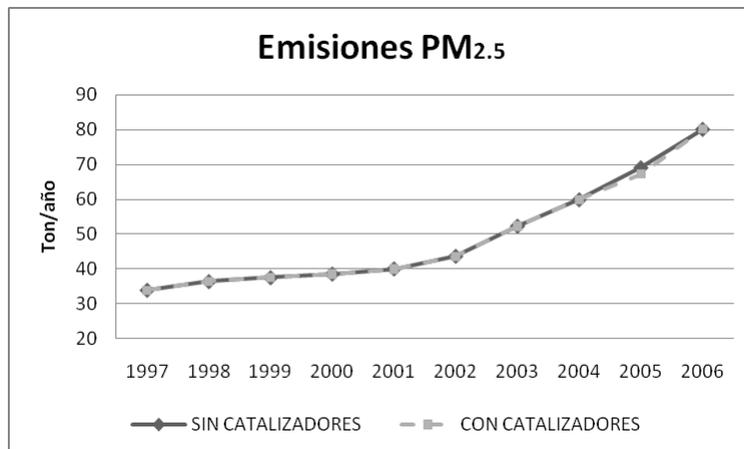


Figura 4. Emisiones de PM<sub>2.5</sub> de vehículos particulares y taxis entre 1996 y 2007

De acuerdo con las figuras se obtiene como se anticipaba que los convertidores catalíticos generaron una reducción significativa en los niveles de emisión de CO, COV y NO<sub>x</sub> y no generaron ningún impacto en el nivel de emisiones de PM<sub>2.5</sub> puesto que este contaminante no es transformado por los catalizadores. Las reducciones estimadas para el año 2006 son del 42% para los COV, del 37% para el CO y del 36% para los NO<sub>x</sub>. Además, se puede ver que la implementación de convertidores catalíticos ha permitido mantener unos niveles relativamente constantes en las emisiones de estos tres contaminantes desde 1997.

Los resultados obtenidos en este estudio pueden ser validados con resultados de investigaciones previas. La Tabla 11 presenta una comparación de los resultados de inventarios de emisiones para la ciudad de Bogotá. Los resultados de este estudio son muy similares a los obtenidos por Herrera (2007), de quien se tomó la metodología pero se cambiaron algunos supuestos sobre las categorías de la flota vehicular.

Estudios	COV	CO	NO <sub>x</sub>	PM <sub>2.5</sub>
Este estudio (año 2006)	67	574	41	0.2
Herrera (2007)	57	579	49	0.1
Giraldo & Behrentz (2005)	95	1270	60	0.5

\* Giraldo & Beherntz calculan PM<sub>10</sub>  
 Unidades en ton.día<sup>1</sup>

Tabla 11. Comparación de estudios de inventario de emisiones para Bogotá

## 6.2 Costos del Programa

Los costos anuales del equipamiento de convertidores catalíticos en los vehículos particulares y los taxis se presentan en la Tabla 12. Estos costos varían directamente con el número de vehículos vendidos en el año, por lo que se puede ver que para los años 1999 a 2001 estos cayeron notablemente por los bajos niveles de venta de vehículos debidos a la recesión económica.

Año	Vehículos Livianos	Vehículos Medianos	Vehículos Pesados	Total
1998	\$ 2,431,600	\$ 894,750	\$ 803,400	\$ 4,129,750
1999	\$ 905,800	\$ 408,000	\$ 241,500	\$ 1,555,300
2000	\$ 974,300	\$ 286,200	\$ 153,900	\$ 1,414,400
2001	\$ 1,179,100	\$ 376,050	\$ 142,500	\$ 1,697,650
2002	\$ 2,081,900	\$ 557,250	\$ 190,200	\$ 2,829,350
2003	\$ 2,970,900	\$ 963,000	\$ 292,800	\$ 4,226,700
2004	\$ 2,756,900	\$ 1,235,100	\$ 322,200	\$ 4,314,200
2005	\$ 4,210,300	\$ 1,957,050	\$ 381,000	\$ 6,548,350
2006	\$ 4,087,600	\$ 1,968,000	\$ 233,700	\$ 6,289,300

Tabla 12. Costos anuales de equipamiento de convertidores catalíticos

Los costos totales del programa de incorporación de los convertidores catalíticos en la ciudad de Bogotá entre 1998 y 2006 se presentan para diferentes tasas de descuento en la Tabla 13. Se puede concluir que los costos de la legislación han sido del orden de los US\$ 23 millones.

Tasa de descuento	4%	8%	12%
VPN 1998	US\$ 27 millones	US\$ 23 millones	US\$ 19 millones

Tabla 13. Costos del equipamiento de convertidores catalíticos entre 1998 y 2006

A partir de los costos totales generados por la legislación, se calcularon los costos de reducción por tonelada de contaminante. Para esto se tomó el nivel total de reducciones estimadas para cada contaminante entre 1998 y 2006, y se dividió por el costo total del programa. Los costos de reducción por tonelada se presentan en la Tabla 14. Al proyectar los resultados obtenidos por más años manteniendo los niveles de emisiones del 2006 y los costos de este año, los costos de reducción disminuyen. Sin embargo, estos costos son muy sensibles al desempeño futuro de la economía que determina el número de vehículos nuevos. Además, mantener el supuesto de no cambio tecnológico en el caso base del programa por largos períodos de tiempo puede llevar a sobreestimar las reducciones en emisiones.

COV	CO	NOx
338	47	662

Unidades en US\$/ton

Tabla 14. Costos de reducción de las emisiones por toneladas

Los costos de reducción por tonelada se pueden comparar con los presentados por Krupnick & Portney (1991). Estos autores presentan los resultados de la Office of Technology Assessment (OTA) al evaluar los costos de reducción de emisiones en los Estados Unidos. En las zonas de no cumplimiento de la norma de O<sub>3</sub> se encuentra que los costos de reducción de COV son de entre US\$1.800 y US\$2.700. Además, la reducción en la volatilidad de la gasolina que sería la tecnología más costo efectiva en la reducción de la emisiones costaría entre US\$120 y US\$740 por año. De acuerdo con esto, los costos de reducción de COV serían menores a los encontrados para Estados Unidos lo que tiene sentido pues el nivel general de precio es mayor en Estados Unidos. En particular, en el caso de la incorporación de convertidores catalíticos se trata de adoptar una

tecnología ya desarrollada e implementada con éxito en otras partes del mundo, lo que se asocia con menores costos.

## 7 TEORÍA Y METODOLOGÍA PARA ESTIMAR BENEFICIOS DE REDUCIR LA CONTAMINACIÓN

### 7.1 Reducción en los Niveles de Morbilidad y Mortalidad

Los beneficios de reducir la contaminación vienen dados por el daño evitado en la salud de las personas, los bienes materiales, los ecosistemas, etc. Sin embargo, una buena aproximación a los beneficios consiste en mirar únicamente los efectos sobre la salud, pues estos representan la mayor parte de los daños. Muller & Mendelsohn (2007) estiman que la morbilidad y la mortalidad representan el 94% los daños totales de la contaminación del aire en Estados Unidos.

#### 7.1.1 *Curvas de Concentración-Respuesta*

Para estimar los beneficios económicos se deben relacionar los niveles de contaminación con su incidencia en la salud de las personas. Estas funciones se conocen como curvas de dosis-respuesta o concentración-respuesta dependiendo de la metodología como son determinadas. A continuación se presenta un ejemplo lineal de una función de concentración-respuesta:

$$\text{Morb} = \alpha \cdot \text{Cont} + \beta \cdot X$$

Donde Morb representa una variable de morbilidad como las admisiones hospitalarias por causas respiratorias, Cont los niveles de concentración del contaminante de interés y X un vector con las demás variables meteorológicas relevantes. El coeficiente  $\alpha$  y el vector de coeficientes  $\beta$  relacionan las variables independientes con la variable dependiente. En particular,  $\alpha$  representa el cambio en la variable de morbilidad asociado con un cambio en la concentración del contaminante de nuestro interés. Con la anterior ecuación se puede determinar el efecto que genera un cambio en la concentración de un contaminante en la morbilidad. El procedimiento es el mismo para efectos sobre la mortalidad.

Las curvas de concentración-respuesta son utilizadas para determinar los beneficios económicos de una reducción en los niveles de contaminación de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\Delta H_i = \alpha \cdot P_{ob_i} \cdot \Delta C_{cont}$$

Donde  $\Delta H_i$  representa el cambio del riesgo en la población de un efecto sobre la salud  $i$ ,  $\alpha$  la pendiente de la curva de concentración-respuesta,  $P_{ob_i}$  representa la población en riesgo del efecto sobre la salud  $i$  y  $\Delta C_{cont}$  el cambio en la concentración del contaminante en cuestión. El cambio en el riesgo estimado a partir de la curva de concentración-respuesta según las metodologías que se explican más adelante.

### Estudios para Bogotá

Para Bogotá, hasta la fecha de publicación de este estudio, la única curva de concentración-respuesta estimada para los contaminantes relevantes fue realizada por Lozano (2005) analizando los datos de calidad del aire hasta 1998.<sup>1</sup> Esta curva relaciona las concentraciones de  $PM_{10}$ ,  $NO_2$  y  $O_3$  con el número de admisiones hospitalarias diarias por causas respiratorias (RHA) buscando encontrar la forma en la que un incremento en las concentraciones de éstos contaminantes incide en la salud de los habitantes de Bogotá. La curva de concentración-respuesta encontrada por Lozano en el modelo completo se presenta en la Tabla 15.

Sin embargo, esta curva sólo nos es útil para estimar los beneficios de la reducción de  $NO_2$ , pues no tiene en cuenta los efectos de una reducción de CO, más asociados con la mortalidad. Además, se encuentra que el ozono tiene una relación negativa y muy significativa con las admisiones hospitalarias lo que no es consistente con los efectos sobre la salud que genera el ozono y las altas concentraciones y violaciones a la norma que se presentaban en el año 1998.

Los estudios de dosis-respuesta existentes para Bogotá están relacionados con el  $PM_{10}$  y por lo tanto no entran en el alcance de esta investigación. Aunque inicialmente se creía que el ozono no estaba relacionado con la mortalidad, estudios recientes muestran evidencia para algunas ciudades latinoamericanas de una relación entre las concentraciones de ozono y la mortalidad.

---

<sup>1</sup> Otros estudios de curvas concentración-respuesta se han realizado para  $PM_{10}$  y  $SO_2$  en Bogotá. Se pueden consultar los estudios de Solarte (1999), Solarte et al. (2002), Torres (2002) y Arciniegas et al. (2005).

Cifuentes (2000) encuentra una relación entre el ozono y la mortalidad para Santiago de Chile y Loomis, Castillejos, Gold et al. (1999) reportan una asociación significativa entre el ozono y la mortalidad en niños menores de un año. Este tema aún no ha sido investigado para Bogotá y podría llegar a incidir significativamente sobre los beneficios de reducción de la contaminación.

Variables	Coefficientes de la Regresión
Constante	-1.2354 (3.8439)
Lluvia	-0.0069 (0.0106)
Lluvia 2	0.00013 (0.00038)
Temperatura	1.0191 (0.5788)*
Temperatura2	-0.0357 (0.2179)
PM <sub>10</sub>	7.9119 (1.4609)***
NO <sub>2</sub>	0.0116 (0.0032)***
O <sub>3</sub>	-0.0069 (0.0012)***
R <sup>2</sup>	0.2912
R <sup>2</sup> Ajustado	0.2773

\*\*\* Significativa al 1%      \*\* Significativa al 5%  
\* Significativa al 10%

*Fuente: Lozano (2004)*

Tabla 15. Curva de concentración-respuesta para Bogotá

## 7.2 Precio de Disminuciones en Morbilidad y Mortalidad

Existen dos metodologías comúnmente aceptadas para valorar los beneficios económicos derivados de una reducción en el riesgo de morbilidad y mortalidad. Por un lado, los métodos de valoración indirecta consisten en estimar los costos directos e indirectos asociados con los cambios en el riesgo de morbilidad y mortalidad (costos de enfermedad) y por el otro lado, los métodos indirectos consisten en estimar la disponibilidad a pagar de las personas por un cambio en estos riesgos (disponibilidad a pagar). Los primeros suelen representar una cota inferior de los costos puesto que no tienen en cuenta el sufrimiento de la persona, aunque cuentan con la ventaja de ser fáciles de calcular y de entender, mientras que los segundos contemplan factores

más subjetivos. Los costos por enfermedad o muerte suelen ser varias veces menores que los encontrados por disponibilidad a pagar.

### **7.2.1 Disponibilidad a Pagar**

La disponibilidad a pagar de los agentes se puede estimar utilizando las preferencias reveladas por comportamiento de los individuos en el mercado o encuestas que planteen la situación – preferencias declaradas. Para las preferencias reveladas, usualmente se estima la prima salarial pagada a los empleados por trabajos con un mayor riesgo de mortalidad y morbilidad o por el precio que están dispuestos a pagar para evitar la contaminación, como pagando una prima por tener una vivienda en una zona poco contaminada. Para las preferencias declaradas se pueden llevar a cabo encuestas de valoración contingente donde se encuesta a los agentes sobre su disponibilidad a pagar por un cambio en riesgo sobre la salud luego de plantearles un escenario realista.

De los anteriores estudios se pueden establecer valoraciones de una vida estadística (VVE) y de una enfermedad crónica estadística (VECE).

$$VVE = \frac{DAP_{mortalidad}}{\Delta \text{riesgo mortalidad}}$$

$$VECE = \frac{DAP_{morbilidad\ crónica}}{\Delta \text{riesgo morbilidad}}$$

Al multiplicar estos valores por los cambios en los riesgos asociados con las reducciones del programa analizado se estiman los beneficios totales.

#### Estudios para Bogotá

Por un lado, Maturana (2000) encuentra una disponibilidad a pagar por evitar un día de síntomas de enfermedades respiratorias de \$7.278 pesos para una encuesta realizada durante el mes de Noviembre de 1999. Ese valor puede ser traído a valor presente realizando ajustes ya sea por

inflación mensual o por crecimiento del PIB nominal, lo que nos llevaría a un monto de alrededor de \$12.200 y \$17.200 respectivamente.

Por otro lado, Ibáñez y McConnell (2001) en un trabajo inédito presentado en Junio de 2001 estiman una disponibilidad a pagar (DAP) por evitar un día de enfermedad respiratoria de US\$25,78 para episodios graves y de US\$21,80 para episodios medios en una encuesta realizada a comienzos del 2000. Este último valor es más consistente con estudios de DAP realizados en la literatura internacional, en particular los autores comparan sus resultados con los encontrados por Alberini et al. (1997) y no encuentran una diferencia entre la disponibilidad a pagar en Bogotá y en Taiwan pese a que este país cuente con un mayor ingreso per capita.

El único estudio de preferencias reveladas para Bogotá es el de Carriazo (2000) que encuentra una disponibilidad a pagar por viviendas en zonas de menores niveles de contaminación. Sin embargo, para utilizar este estudio se debe tener en cuenta que aquí se reflejan las preferencias de algunos habitantes de Bogotá que tienen los medios económicos para escoger su lugar de residencia.

Otra metodología comúnmente aceptada es la transferencia de beneficios de otros estudios al estudio en cuestión. Esto se hace por la dificultad para llevar a cabo estudios específicos al caso de interés. Para esto se utiliza un ajuste por el ingreso de los hogares en el área del estudio y el ingreso de los hogares en el área que se pretende estudiar. Sin embargo, esta aproximación suele ser menos exacta y por lo tanto, en la medida de lo posible, debe buscar ser evitada.

Como lo documentan Cifuentes et al. (2005), estudios más detallados de la disponibilidad a pagar por evitar algunas enfermedades respiratorias son escasos a nivel latinoamericano y no están disponibles para Bogotá. No obstante, por la similitud existente entre las características socioeconómicas de ciudades como Bogotá, Ciudad de México y Santiago de Chile se podría pensar en utilizar los valores de una vida estadística encontrados para esta ciudad como una aproximación de los costos. En caso de ser necesario usar esta aproximación, se pueden consultar los resultados de estudios recopilados por Cifuentes et al. (2005).

### 7.2.2 Costos de Enfermedad o Muerte

Los costos por enfermedad (CPE) se dividen en dos tipos, los costos directos que incluyen los costos de tratamiento, intervención y hospitalización y los costos de oportunidad que consisten en los salarios dejados de percibir durante la enfermedad.

$$\text{CPE} = \text{Costos Directos} + \text{Costos de Oportunidad}$$

En los costos por muerte (CPM), la aproximación del capital humano plantea que realizar un descuento temporal de los salarios dejados de percibir en la vida productiva del agente. Se pueden incluso incluir los costos por tratamientos hospitalarios previos a la muerte. Para las personas que no trabajan se puede incluir la pérdida por servicios domésticos dejados de realizar.

$$\text{CPM} = \sum_{i=k}^N \frac{Y_0 \cdot (1 + g)^i}{(1 + r)^i}$$

Donde  $Y_0$  representa el salario en el periodo de muerte,  $g$  la tasa de crecimiento del salario,  $r$  la tasa de descuento temporal y  $N$  el número de años estimado que le restaban de vida al individuo.

#### Estudios para Bogotá

Para Bogotá se ha estimado un promedio de las patologías en los hospitales de I, II y III nivel de \$930.000 de acuerdo con los estudios que se presentan en la Tabla 16. Sin embargo, estos costos pueden ser mucho mayores si se tiene en cuenta las entidades de salud privada.

Año	1998	2004	2008
Promedio	447.805	724.029	930.000

*Fuente: IDEAM (2005) Tomado de: Estudio de costos de patologías más frecuentes atendidas en los hospitales de I, II y III nivel de la Red adscrita a la Secretaría Distrital de Salud*

Tabla 16. Costos totales promedio de patologías en los hospitales de I, II y III nivel.

Cifuentes et al. (2005), realizan una revisión bibliográfica de los costos de tratamientos médicos para América Latina y lo comparan con los Estados Unidos. Ellos encuentran que los costos de una

admisión hospitalaria es de US\$ 1.455 para Santiago de Chile. Como se puede ver, los costos de tratamiento para Bogotá parecerían ser bajos frente a los encontrados en otras ciudades latinoamericanas. Esto se puede deber a que el estudio que se presentó está un poco desactualizado, sólo presenta un promedio y no incluye hospitales que no sean de I, II y III nivel.

Como se había comentado previamente, es de esperarse que la disponibilidad a pagar (DAP) de los individuos para evitar una enfermedad sea mayor que los costos de tratamiento de ésta. Sin embargo, para los estudios existentes sobre Bogotá, la DAP de las personas estaría por debajo de los costos de tratamiento. Lo anterior podría explicarse por varios motivos, ya sea que algunos de los estudios realizados no valoran bien los costos, o que los costos directos de los tratamientos hospitalarios sean superiores puesto que son tratamientos subsidiados que las personas no incorporan en su disponibilidad a pagar. Inclusive puede que las personas que pagan su medicina prepagada no tengan en cuenta el gasto que están realizando al ser tratadas por enfermedades respiratorias.

De esta forma, sería más aconsejable para el caso de Bogotá tener en cuenta los costos directos asociados con los tratamientos que la disponibilidad a pagar, aunque se podría incluso contemplar el sumar la disponibilidad a pagar con estos costos en la medida que el subsidio a la salud pagado por el Estado no evita el beneficio en el bienestar de las personas por evitar la enfermedad. Para esto los costos pagados por otros agentes (costos de enfermedad pagados por la sociedad menos los costos pagados por los individuos) pueden ser sumados a la disponibilidad a pagar individual para obtener una primera aproximación de la disponibilidad a pagar de la sociedad. Como lo sugieren Chestnut et al. (2006) esta aproximación se debe seguir cuando los costos pagados por terceros son sustanciales, como puede ser en el caso de los subsidios a la medicina que se dan en Colombia.

## 8 CONCLUSIONES

Este trabajo permite concluir que la Resolución 005 de 1996 que obligó a implementar el uso de convertidores catalíticos a partir del año 1998 tuvo un impacto muy importante en el control de la contaminación en la ciudad de Bogotá. Para el año 2006 se estimaron reducciones del 42% para los COV, del 37% para el CO y del 36% para los NO<sub>x</sub>, frente a un escenario en el cual no se hubiera creado la legislación. La implementación de convertidores catalíticos además habría permitido mantener unos niveles relativamente constantes en las emisiones de estos tres contaminantes desde 1997.

Este estudio constituye una de las primeras evaluaciones a una política de calidad del aire en Colombia lo que muestra la necesidad de que el país avance en este tema. Los costos de reducción de emisiones son los primeros estimados para la ciudad de Bogotá y permiten establecer una base de comparación para futuras evaluaciones de la efectividad de alternativas de descontaminación. En particular, se identifica la necesidad de llevar a cabo análisis costo-beneficio y costo-efectividad para orientar las futuras políticas de descontaminación.

Aunque Bogotá ha avanzado en los últimos años en los estudios sobre la contaminación del aire, aún hace falta llevar a cabo más investigaciones sobre este tema. Con los estudios actuales no se puede llevar a cabo una estimación de los beneficios de un programa de reducción de emisiones. Para esto, en primer lugar se debe desarrollar un modelo de calidad del aire que permita pasar de emisiones a concentraciones de contaminantes. En segundo lugar, se deben estimar funciones de dosis-respuesta para contaminantes como el O<sub>3</sub> y el CO sobre los cuales aún no hay estudios para Bogotá. En tercer lugar, se deben hacer estudios más detallados de los costos asociados con la morbilidad debida a la contaminación y la disponibilidad a pagar de los ciudadanos para evitarla. Con estos estudios, se podrá pasar a estimar que nuevas políticas de reducción de la contaminación son deseables desde el punto de vista económico para la ciudad de Bogotá.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

Alberini, A., Cropper, M., Fu, T., Krupnick, A., Liu, J., Shaw, D., y otros. (1997). Valuing Health Effects of Air Pollution in Developing Countries: The Case of Taiwan. *Journal of Environmental Economics and Management*, 34, 107-126.

Allemand, N., Bouscaren, R., Heslinga, D., Marlowe, I., Potter, C., Woodfield, M., y otros. (1990). *A Costed Evaluation of Options for the Reduction of Photochemical Oxidant Precursors*. Report EUR 12537/1 EN, Commission of the European Communities (CEC), Bruselas, Bélgica.

Arciniegas, Á., Rodríguez, C., Pachón, J., Sarmiento, H., & Hernández, L. J. (2005). *Estudio de la Morbilidad en Niños Menores a Cinco Años por Enfermedad Respiratoria Aguda y su Relación con la Concentración de Partículas en una Zona Industrial de la Ciudad de Bogotá*. Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Bogotá, D.C.

Arrieta, S. M. (2006). *Análisis de Costos Asociados al Mejoramiento de la Calidad del Combustible en Colombia*. Proyecto de grado, Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Ambiental, Bogotá.

Banco Mundial. (2002). *Improving Air Quality in Metropolitan Mexico City: An Economic Valuation*. Banco Mundial.

Carriazo, F. (2000). *La Contaminación del Aire y el Precio de la Vivienda en Bogotá*. Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, Facultad de Economía, Bogotá.

Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental - CIIA. (2002). *Diseño e Implementación de un Modelo de Calidad del Aire para Bogotá*. Informe Semestral 3, Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Bogotá D.C.

Chestnut, L. G., Thayer, M. A., Lazo, J. K., & Van Den Eeden, S. K. (2006). The Economic Value of Preventing Respiratory and Cardiovascular Hospitalizations. *Contemporary Economic Policy*, 24 (1), 127-143.

Cifuentes, L. A., Krupnick, A. J., O'Ryan, R., & Toman, M. A. (2005). *Urban Air Quality and Human Health in Latin America and the Caribbean*. Banco Interamericano de Desarrollo, Washington D.C.

Cifuentes, L. (2000). Asociación del Ozono y la Mortalidad Diaria en Santiago. En *El Impacto Urbano del Ozono y Fotooxidantes* (págs. 176-198). Santiago: Comisión de Recursos Naturales. Bienes Nacionales y Medio Ambiente, Cámara de Diputados de Chile.

- Freeman, A. M. (Abril de 2002). Environmental Policy Since Earth Day I: What Do We Know About the Benefits and Costs? *Agricultural and Resource Economics Review* , 1-14.
- Gaitán, M., Cancino, J., & Behrentz, E. (Noviembre de 2007). Análisis del Estado de la Calidad del Aire de Bogotá. *Revista de Ingeniería* , 81-92.
- Gerard, D., & Lave, L. B. (2005). Implementing technology forcing policies: The 1970 Clean Air Act Amendments and the introduction of advanced automotive emissions controls in the United States. *Technological Forecasting & Social Change* (72), 761-778.
- Giraldo, L. A., & Behrentz, E. (2005). *Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variables pertinentes*. Universidad de los Andes, Bogotá.
- Gómez, P. A. (2007). *Producción de Smog Fotoquímico en Bogotá Asociada a la Utilización de Etanol como Aditivo en las Gasolinas*. Proyecto de Grado, Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Ambiental, Bogotá.
- Herrera, D. (2007). *Modelo de Emisiones Vehiculares para la Ciudad de Bogotá (EVB)*. Proyecto de Grado, Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Ambiental, Bogotá D.C.
- Ibáñez, A. M., & McCollel. (June 2001). *Valuing Morbidity: Acute Respiratory Illness in Bogotá, Colombia*. Draft Prepared for AERE Workshop, University of Maryland College Park, Department of Agricultural and Resource Economics, Maryland.
- IDEAM. (2005). *Documento de Soporte Norma de Calidad del Aire*. Subdirección de Estudios Ambientales, Bogotá.
- Kaspar, J., Fornasiero, P., & Hickey, N. (2003). Automotive catalytic converters: current status and some perspectives. *Catalysis Today* , 77, 419-449.
- Krupnick, A. J., & Portney, P. R. (1991). Controlling Urban Air Pollution: A Benefit-Cost Assessment. *Science* , 252 (5005), 522-528.
- Loomis, D., Castillejos, M., & Gold, D. R. (1999). Air Pollution and Infant Mortality in Mexico City. *Epidemiology* , 10, 118-123.
- Lozano, N. (2004). Air Pollution in Bogotá, Colombia: A Concentration-Response Approach. *Revista Desarrollo y Sociedad* (54), 133-177.
- Maturana, J. G. (2000). *Disponibilidad a Pagar por Daños a la Salud de la Contaminación Atmosférica*. Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, Facultad de Economía, Bogotá.

- Mendez, M. (2003). *Análisis de Intervención: Efectividad de las Políticas para Reducción de la Contaminación por Fuentes Móviles en Bogotá*. Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, Facultad de Economía, Bogotá.
- Molina, L. T., & Molina, M. J. (2002). *Air Quality in the Mexico Megacity. An Integrated Assesment*. USA: Kluwer Academic Publishers, MIT.
- Muller, N. Z., & Mendelsohn, R. (2007). Measuring the Damages of Air Pollution in the United States. *Journal of Environmental Economics and Management* , 54, 1-14.
- Nigenda, G., Cifuentes, E., & Duperval, P. A. (2002). *Estimación del Valor Económico de Reducciones en el Riesgo de Morbilidad y Mortalidad por Exposiciones Ambientales*. Instituto Nacional de Ecología, Dirección General de Investigación en Política y Economía Ambiental, México, D.F.
- Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías de Calidad del Aire de la OMS Relativas al Material Particulado, el Ozono, el Dióxido de Nitrógeno y el Dióxido de Azufre*.
- O'Ryan, R. E. (1996). Cost-Effective Policies to Improve Urban Air Quality in Santiago, Chile. *Journal of Environmental Economics and Management* , 302-313.
- Romero, M. (19 de Mayo de 2007). Cuide su catalizador de gases y no permita que le supriman de su vehículo este importante elemento. *Revista Motor - El Tiempo* .
- Santos, H., & Costa, M. (2008). Evaluation of the Conversion Efficiency of Ceramic and Metallic Three Way Catalytic Converters. *Energy Conversion and Management* , 49, 291-300.
- Solarte, I. (1999). *Contaminación Atmosférica y Enfermedad Respiratoria en Niños en Bogotá*. Universidad Javeriana, Bogotá D.C.
- Solarte, I., Caicedo, M., & Restrepo, S. (2002). Contaminación Atmosférica y Enfermedad Respiratoria en Niños Menores de 14 años en Santafé de Bogotá. *Revista Médica Sanitas* , 5 (2).
- Torres, J. E. (2002). *Análisis de los Efectos a Corto Plazo de la Contaminación Atmosférica en Bogotá*. Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, Facultad de Economía, Bogotá D.C.
- U.S. EPA. (1999). *The Benefits and Costs of the Clean Air Act, 1990 to 2010*. Informe preparado para el Congreso, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, USA.
- Uribe, E. (Enero de 2005). Air Pollution Management in Two Colombian Cities: Case Study. *Documento CEDE* .

Voorhees, A. S., Sakai, R., Araki, S., Sato, H., & Otsu, A. (2001). Cost-Benefit Analysis Methods For Assessing Air Pollution Control Programs in Urban Environments - A Review. *Environmental Health and Preventive Medicine* , 6, 63-73.

World Bank. (1997). *Urban Air Quality Management Strategies in Asia. Guidebook*. (J. J. Shah, C. Brandon, & T. Nagpa, Edits.) World Bank Publications.