

# **PLAN DECENAL DE DESCONTAMINACIÓN DE BOGOTÁ**

**Contrato 1040 de 2008 de Ciencia y Tecnología celebrado entre la Secretaría  
Distrital de Ambiente, Transmilenio S.A. y la Universidad de los Andes**

Reporte Final

## **Parte B – Documento de Trabajo del PLAN DECENAL DE DESCONTAMINACIÓN DE BOGOTÁ**

Preparado para

**Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá**  
(Subdirección de Calidad del Aire, Auditiva y Visual)

**Transmilenio S.A.**

**Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional**

**Investigador Principal**  
Eduardo Behrentz, Ph.D.

**Co- Investigadores**  
Juan M. Benavides, Juan Pablo Bocarejo, Margarita Canal, Mónica Espinosa,  
Natalia Franco, Ivan D. Lobo, Andrés Medaglia, Oscar A. Pardo, Mauricio Sánchez

**Investigadores Colaboradores**  
Lida M. Avila, Juan José Castillo, Juan Camilo F. Márquez,  
Diana C. Obando, Juan Pablo Orjuela, Alba M. Ruiz, Jorge Sefair, Edgar A. Virgüez

Facultad de Ingeniería  
Universidad de los Andes  
Bogotá, Colombia

Julio de 2010

## **TABLA DE CONTENIDO GENERAL**

### **ASPECTOS GENERALES**

**SECCIÓN 1.** Análisis de Medidas del Sector Transporte

**SECCIÓN 2.** Análisis de Medidas del Sector Industrial

**SECCIÓN 3.** Modelo de selección y programación de proyectos

**SECCIÓN 4.** Estimación de los Beneficios en la Salud y los Costos Asociados

**SECCIÓN 5.** Indicadores de Calidad del Aire

### **ANEXOS**

## **ASPECTOS GENERALES**

Este documento constituye la Parte B – Documento de Trabajo del Plan Decenal de Descontaminación de Bogotá (PDDB). Este estudio se desarrolló en el marco del Contrato de Ciencia y Tecnología Número 1040 de 2008; celebrado entre la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), Transmilenio S.A. (TMSA) y la Universidad de los Andes.

En este documento se integran los informes técnicos desarrollados como soporte para la elaboración del PDDB, en los cuales se presenta información detallada de los análisis que se llevaron a cabo en el desarrollo de las diferentes partes que conforman el plan.

El informe está organizado en seis secciones independientes. En las secciones 1 y 2 se presenta la metodología y los resultados de los análisis relacionados con los sectores de transporte e industria. En la Sección 3, se presenta de manera detallada la formulación del modelo matemático mediante el cual se seleccionaron los proyectos que conforman el plan, así como los resultados generados mediante la aplicación de dicho modelo.

En la Sección 4 se incluyen los análisis relacionados con la estimación de beneficios en la salud y los costos asociados a dichos beneficios. En la Sección 5 se presenta la metodología de desarrollo de los indicadores de calidad del aire propuestos para hacer seguimiento al PDDB.

**PLAN DECENAL DE DESCONTAMINACIÓN DE BOGOTÁ**  
**PARTE B - DOCUMENTO DE TRABAJO**

**SECCIÓN 1 – ANÁLISIS DE MEDIDAS DEL SECTOR TRANSPORTE**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. ASPECTOS GENERALES</b>	1
<b>2. INTRODUCCIÓN</b>	2
2.1. Antecedentes	2
<b>3. LÍNEA BASE Y ESCENARIO TENDENCIAL</b>	4
3.1. Construcción de la Línea Base	5
3.1.2. Validación del Número de Fuentes	7
3.2. Construcción del Escenario Tendencial	11
3.2.1. Crecimiento de la Motorización y el Número de Vehículos Particulares	11
3.2.2. Crecimiento del Número de Taxis y Motocicletas	12
3.2.3. Crecimiento del Número de Viajes de Transporte Público Colectivo	13
3.2.4. Crecimiento del Número Vehículos de Carga	14
3.2. Emisiones Año Base y Proyección de Emisiones	14
3.2.4. Emisiones año 2008	14
3.2.4. Escenario Tendencial	15
<b>4. FORMULACION DE PROYECTOS PARA VEHÍCULOS DIÉSEL</b>	17
4.1. Optimización Ambiental del Sistema Integrado de Transporte Público	17
4.1.1. Modos de Implementación del Proyecto SITP	20
4.1.2. Beneficios Ambientales de la Implementación del SITP	26
4.1.3. Herramientas Institucionales Requeridas	29
4.1.4. Costos	29
4.2. Instalación de Sistemas de Control de Emisiones	31
4.2.1. Modos de Implementación	32
4.2.2. Beneficios Ambientales	33
4.2.3. Herramientas Institucionales Requeridas	35
4.2.4. Costos	36
4.2.5. Implicaciones de la Norma Euro IV en las Emisiones de Transmilenio	37
4.2.6. Mejoramiento de la Calidad del ACPM	38
4.3. Uso de sistemas de Control de Emisiones en el Transporte de Carga	40
4.3.1. Modos de Implementación de la Medida	40
4.3.2. Beneficios Ambientales	41
4.3.3. Costos	43
<b>5. FORMULACION DE PROYECTOS PARA VEHICULOS LIVIANOS QUE UTILIZAN GASOLINA COMO COMBUSTIBLE</b>	45
5.1. Renovación de Convertidores Catalíticos	46

5.1.1.	<i>Modos de Implementación</i>	47
5.1.2.	<i>Beneficios Ambientales</i>	47
5.1.3.	<i>Costos</i>	50
5.1.4.	<i>Herramientas Institucionales Requeridas</i>	51
5.2.	Renovación de la Flota	51
5.2.1.	<i>Modos de Implementación</i>	52
5.2.2.	<i>Beneficios Ambientales</i>	53
5.2.3.	<i>Costos</i>	57
5.2.4.	<i>Herramientas Institucionales Requeridas</i>	57
5.3.	Combinación entre los Esquemas de Renovación de Vehículos Particulares y Renovación de Convertidores Catalíticos	57
5.3.1.	<i>Modos de Implementación</i>	58
5.3.2.	<i>Beneficios Ambientales</i>	58
5.3.3.	<i>Costos</i>	58
5.4.	Reducción de los Factores de Actividad Debido a la Implementación de SITP	59
5.5.	Medidas Tendientes a Mejorar el Desempeño de las Motocicletas	61
5.5.1.	<i>Modos de Implementación</i>	62
5.5.2.	<i>Beneficios Ambientales</i>	62
5.5.3.	<i>Costos</i>	66
5.6.	Medidas Tendientes a Mejorar el Desempeño de los Taxis	67
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	69
	REFERENCIAS	70

ANEXO 1.1. Planes de descontaminación o sus equivalentes internacionales

ANEXO 1.2. Listado de capacidades de las empresas transportadoras

ANEXO 1.3. Proyección del crecimiento de los viajes en TP y de la composición modal de los mismos.

ANEXO 1.4. Beneficios ambientales derivados de la implementación de las medidas de descontaminación.

ANEXO 1.5. Matrices de renovación y chatarrización de la flota

ANEXO 1.6. Cálculos para estimar las reducciones por biodiesel

ANEXO 1.7. Listado de categorías vehiculares con los criterios de clasificación, los factores de actividad y los factores de emisión asociados

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Metodología de análisis del sector transporte. ....	4
Figura 1.2. Número acumulado de vehículos según año modelo - Base de datos SDM.....	9
Figura 1.3. Esquema de las categorías de camiones en Bogotá. ....	10
Figura 1.4. Distribución de la flota de camiones en Bogotá según el tipo de combustible para el año 2008. ....	11
Figura 1.5. Construcción del modelo de crecimiento de la tasa de motorización.....	12
Figura 1.6. Crecimiento de los kilómetros recorridos por las distintas categorías de transporte de la ciudad.....	13
Figura 1.7. Proyección de número de fuentes 2010-2020. ....	14
Figura 1.8. Aporte de las categorías vehiculares al inventario de emisiones del año base..	15
Figura 1.9. Proyección de las emisiones de fuentes móviles para el horizonte 2008-2020.	16
Figura 1.10. Diagrama esquemático de los periodos de afianzamiento del SITP. ....	19
Figura 1.11. Proyección de la participación modal de transporte entre el 2008 y el 2020....	19
Figura 1.12. Evolución del tamaño del parque de TPC desagregado por categorías vehiculares.....	23
Figura 1.13. Contraste entre las frecuencias de modelos vehiculares para la flota de TPC.	25
Figura 1.14. Proyecciones de la edad promedio de la flota según esquema de renovación.	25
Figura 1.15. Proyecciones de las emisiones de PM tras la implementación del SITP. ....	26
Figura 1.16. Proyecciones de las emisiones de CO tras la implementación del SITP. ....	27
Figura 1.17. Proyecciones de las emisiones de THC tras la implementación del SITP. ....	27
Figura 1.18. Proyecciones de las emisiones de NO <sub>x</sub> tras la implementación del SITP.....	28
Figura 1.19. Proyecciones de las emisiones de CO <sub>2</sub> tras la implementación del SITP. ....	28
Figura 1.20. Proyección de las emisiones de PM de la flota de TPC para la medida SCE1 en sus 5 modos. ....	33
Figura 1.21. Proyección de las emisiones de PM de la flota de TPC para la medida SCE2 en sus 5 modos. ....	34
Figura 1.22. Comparación de las emisiones de PM del parque de transporte público en el marco del SITP – Modo 1.....	37
Figura 1.23. Comparación de las emisiones de PM del parque de transporte público en el marco del SITP – Modo 2.....	38
Figura 1.24. Reducciones porcentuales obtenidas tras la disminución del contenido de azufre en el diésel con respecto a las emisiones derivadas de un combustible con 500 ppm de azufre.....	39
Figura 1.25. Emisiones de PM corregidas según el contenido de azufre del ACPM.....	39
Figura 1.26. Emisiones anuales de PM de la flota de camiones de Bogotá.....	41
Figura 1.27. Emisiones anuales de CO de la flota de camiones en Bogotá.....	42
Figura 1.28. Emisiones anuales de NO <sub>x</sub> de la flota de camiones de Bogotá. ....	42
Figura 1.29. Emisiones anuales de COT de la flota de camiones de Bogotá. ....	43
Figura 1.30. Distribución de las emisiones de hidrocarburos totales de vehículos particulares. ....	45
Figura 1.31. Factores de emisión de monóxido de carbono según el envejecimiento del catalizador. ....	47
Figura 1.32. Emisiones de CO debido a la renovación de los convertidores catalíticos.....	48
Figura 1.33. Emisiones de NO <sub>x</sub> debido a la renovación de los convertidores catalíticos....	49
Figura 1.34. Emisiones de COT debido a la renovación de los convertidores catalíticos. ...	50
Figura 1.35. Factores de emisión de NO <sub>x</sub> exigidos por la legislación Europea actual. ....	51
Figura 1.36. Edades promedio de la flota de vehículos particulares según el modo.....	53
Figura 1.37. Emisiones de PM de los vehículos privados según los modos de renovación de la flota. ....	54
Figura 1.38. Emisiones de NO <sub>x</sub> de los vehículos privados según los modos de renovación de la flota. ....	55
Figura 1.39. Emisiones de COT de los vehículos privados según los modos de renovación de la flota. ....	55

Figura 1.40. Emisiones de CO de los vehículos privados según los modos de renovación de la flota. ....	56
Figura 1.41. Emisiones de CO <sub>2</sub> de los vehículos privados según los modos de renovación de la flota. ....	56
Figura 1.42. Emisiones de CO de vehículos particulares con la implementación del SITP..	59
Figura 1.43. Emisiones de NO <sub>x</sub> de vehículos particulares con la implementación del SITP.	60
Figura 1.44. Emisiones de THC de vehículos particulares con la implementación del SITP.	60
Figura 1.45. Emisiones de PM de vehículos particulares con la implementación del SITP..	60
Figura 1.46. Emisiones de CO <sub>2</sub> de vehículos particulares con la implementación del SITP.	61
Figura 1.47. Emisiones de PM de la flota de motocicletas de la ciudad. ....	62
Figura 1.48. Emisiones de NO <sub>x</sub> de la flota de motocicletas de la ciudad. ....	63
Figura 1.49. Emisiones de COT de la flota de motocicletas de la ciudad. ....	64
Figura 1.50. Emisiones de CO de la flota de motocicletas de la ciudad. ....	65
Figura 1.51. Emisiones de CO <sub>2</sub> de la flota de motocicletas de la ciudad. ....	65
Figura 1.52. Distribución de frecuencia de los modelos de la flota de taxis bogotana. ....	67



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Categorías vehiculares.....	7
Tabla 1.2. Flota vehicular de transporte público.....	8
Tabla 1.3. Composición de la flota vehicular de transporte particular.....	10
Tabla 1.4. Parámetros usados para la proyección del número de fuentes (taxis y motos)...	13
Tabla 1.5. Aporte por categorías al inventario de emisiones (año 2008) provenientes de la flota de transporte público colectivo y masivo. ....	17
Tabla 1.6. Proyección de los indicadores de movilidad para los diversos modos de transporte público. ....	20
Tabla 1.7. Modos de implementación del SITP según su enfoque. ....	21
Tabla 1.8. Participación de las categorías de transporte público con la implementación del SITP.....	22
Tabla 1.9. Cambio en la composición de la flota de transporte público. ....	22
Tabla 1.10. Participación de Transmilenio en los escenarios propuestos tras la implementación del SITP. ....	29
Tabla 1.11. Costos del proyecto derivados de la adquisición y chatarrización de vehículos.	30
Tabla 1.12. Costo por unidad de PM reducida. ....	30
Tabla 1.13. Características de los sistemas de control de emisiones propuestos para vehículos diésel. ....	32
Tabla 1.14. Reducción porcentual en el inventario acumulado de emisiones de transporte público respecto al escenario tendencial.....	35
Tabla 1.15. Reducción en los niveles de concentración de PM en el año 2020 respecto al escenario tendencial. ....	35
Tabla 1.16. Costos totales.....	36
Tabla 1.17. Costo por tonelada de PM reducida. ....	37
Tabla 1.18. Eficiencia media de reducción de los sistemas de control de emisiones.....	40
Tabla 1.19. Reducciones en toneladas acumuladas según el modo (2010-2020) con respecto al escenario tendencial. ....	43
Tabla 1.20. Costos unitarios de los sistemas de control de emisiones. ....	44
Tabla 1.21. Costos.....	44
Tabla 1.22. Modos de implementación propuestos para renovación del convertidor catalítico.....	47
Tabla 1.23. Reducciones totales (2008-2020) para cada contaminante según el modo de implementación.....	48
Tabla 1.24. Costo de la medida por unidad de tonelada de contaminante reducida.....	50
Tabla 1.25. Factores de actividad según categorías vehiculares. ....	52
Tabla 1.26. Modos de implementación propuestos para renovación de la flota.....	52
Tabla 1.27. Reducciones totales para vehículos de gasolina y para cada contaminante debido a la implementación de los modos de renovación de la flota. ....	53
Tabla 1.28. Costo total y costo por tonelada de contaminante reducido.....	57
Tabla 1.29. Esquema de implementación de las medidas combinadas según modos.....	58
Tabla 1.30. Reducciones totales para la flota de gasolina y para cada contaminante debido a la implementación de las medidas combinadas. ....	58
Tabla 1.31. Costo total y costo por tonelada de contaminante reducida.....	59
Tabla 1.32. Reducciones totales para cada contaminante. ....	66
Tabla 1.33. Costos unitarios de los sistemas de control de emisiones. ....	66
Tabla 1.34. Costo total. ....	66

## **1. ASPECTOS GENERALES**

Este documento constituye la Sección 1 (Análisis del sector transporte del Documento de Trabajo del Plan Decenal de Descontaminación de Bogotá). Dicho estudio se desarrolló en el marco del Contrato de Ciencia y Tecnología Número 1040 de 2008; celebrado entre la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), Transmilenio S.A. (TMSA) y la Universidad de los Andes.

En este informe se presentan las medidas propuestas para el plan decenal de descontaminación relacionadas con el sector transporte. De manera detallada se presenta la metodología utilizada así como los resultados de los análisis desarrollados.

## 2. INTRODUCCIÓN

Los análisis del plan de descontaminación relacionados con el sector transporte se basaron en los resultados de la fase anterior del proyecto en la cual se formularon los lineamientos técnicos para dichos propósitos (SDA-SUR, 2008). Estos resultados incluyen información sobre tamaño de la flota para las diferentes categorías vehiculares, características de la flota del servicio de transporte público y privado y factores de emisión medidos para las condiciones específicas de la ciudad, entre otros. El resultado más importante de la fase anterior del proyecto fue la identificación de los aspectos determinantes en las emisiones de los diferentes modos de transporte y la estimación del aporte de cada una de las categorías vehiculares al inventario de emisiones de la ciudad, a partir de los cuales se diseñaron los lineamientos técnicos del plan.

El objetivo del presente estudio fue el de diseñar planes, estrategias y proyectos para reducir el impacto que tiene el sector transporte en la calidad del aire de la ciudad. Estas medidas se diseñaron con base en los lineamientos técnicos del plan, considerando medidas implementadas en otros lugares del mundo y teniendo en cuenta los resultados de los talleres de política participativa desarrollados como parte de este proyecto.

Los planes y proyectos propuestos incluyen medidas dirigidas hacia el sector de transporte público colectivo y masivo, transporte público individual, transporte privado incluyendo motocicletas y transporte de carga. Las propuestas se elaboraron considerando opciones de mayor eficiencia operacional, tecnologías que incluyen mejoramiento del desempeño ambiental de los vehículos y mejoras en la calidad de los combustibles.

En este documento se presenta la metodología utilizada y los resultados relacionados con la línea base de las emisiones y la proyección de las mismas para el periodo de análisis del plan 2008-2020. Adicionalmente, para cada una de las medidas propuestas se presenta su impacto en las emisiones de los diferentes contaminantes, costos y otros aspectos diferentes a los netamente técnicos que se consideran necesarios para la evaluación de viabilidad de los proyectos (v.g., incluyendo los impactos que tienen las medidas sobre otros sectores de la ciudad).

Las medidas que se presentan en este documento, analizadas en términos de costo efectividad, hicieron parte del portafolio de proyectos incluidos en el ejercicio de optimización (ver Sección 3 del Documento de Trabajo del PDDB), a partir del cual se seleccionaron los proyectos que conforman el plan de descontaminación de la ciudad.

### 2.1. Antecedentes

Durante décadas recientes Bogotá, como la mayoría de los centros urbanos de Latinoamérica, ha venido atravesando un proceso de expansión acelerada y un consecuente aumento en la demanda de servicios y en la presión ejercida sobre la infraestructura básica de la ciudad.

El crecimiento del número de vehículos y de la movilidad de las personas ha generado un aumento significativo de la movilidad motorizada. Este fenómeno se ha presentado de manera desordenada, conllevando una falta de estructuración adecuada de los sistemas de transporte. Como consecuencia, estos procesos de transformación se han visto relacionados con problemas de contaminación atmosférica y otros efectos nocivos, los cuales presentan implicaciones de tipo social, político y económico. En lo que se refiere, por ejemplo, a consecuencias sobre la salud de la población, se encuentra ampliamente documentado que la contaminación atmosférica incide sobre las tasas de morbilidad y

mortalidad por causa de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, convirtiéndose éste en un problema de salud pública.

Según el Banco Interamericano de Desarrollo la principal fuente de contaminación en las ciudades de Latinoamérica es el transporte. Las emisiones de fuentes móviles se encuentran asociadas a factores tales como el mal estado de las vías y el uso de tecnologías obsoletas y combustibles de baja calidad. Para el caso de Bogotá se cuenta con estudios (SDA-SUR, 2009) en donde se señala que los mayores niveles de exposición personal se encuentran más directamente relacionados con fuentes móviles que con fuentes fijas.

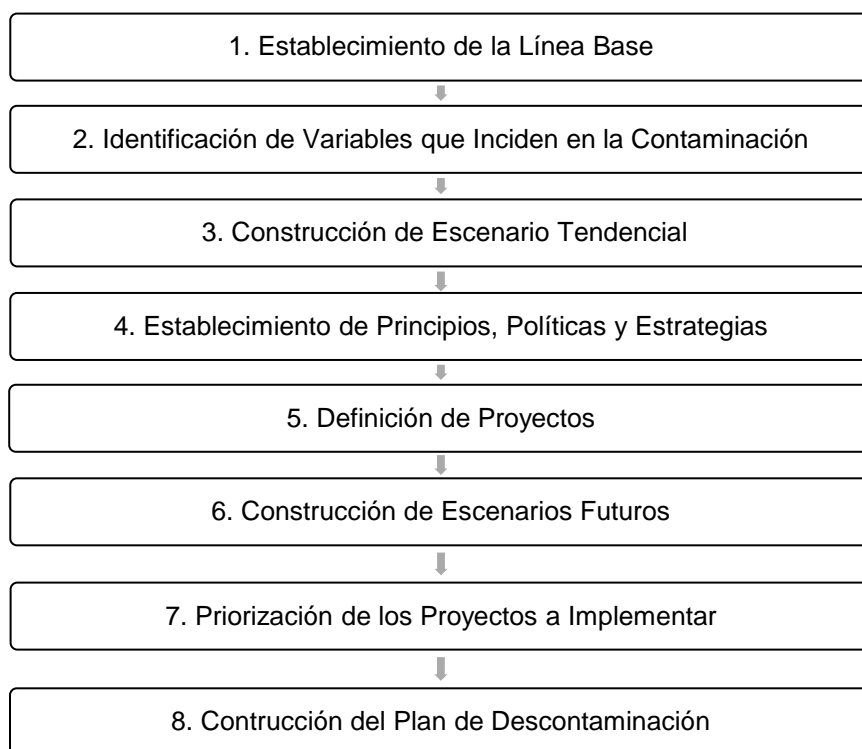
Dentro de este contexto, la creación e implementación de programas, proyectos y estrategias que buscan controlar las emisiones y concentraciones de contaminantes atmosféricos, se ha convertido en una prioridad para los gobiernos locales de las grandes ciudades latinoamericanas. En Colombia, el Distrito Capital cuenta con un Plan Maestro de Gestión Ambiental en el cual se plantea, entre otros, un programa de transporte sostenible con subprogramas tales como: la consolidación del Sistema Integrado de Transporte Masivo (SITM), el uso de energías limpias en el transporte urbano y la consolidación de la ciudad peatonal. Sin embargo, de forma previa a este proyecto, Bogotá aún no cuenta con una política integral y definida para prevenir y controlar la problemática ambiental asociada a la contaminación atmosférica. Así pues, la creación del Plan Decenal de Descontaminación Atmosférica para la ciudad de Bogotá resulta ser una necesidad apremiante y debe considerar, como parte fundamental, un componente de gestión para el control de las emisiones asociadas con fuentes móviles.

Los planes sectoriales planteados por la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) se complementan con las prioridades y metas que han sido establecidas en el Plan Maestro de Movilidad (PMM), adoptado por el Distrito mediante el Decreto 319 del año 2006. Los principios de sostenibilidad, disminución de los impactos ambientales y mayor eficiencia que propone el PMM, en particular a través de proyectos claves como el desarrollo del SITP, el des-estímulo al uso del automóvil y la disminución de la congestión refuerzan las metas que se proponen en el Plan de Descontaminación.

### 3. LÍNEA BASE Y ESCENARIO TENDENCIAL

La metodología adoptada para el análisis del sector transporte propone la secuencia de actividades que se presenta en la Figura 1.1.

Para el establecimiento de la línea base, se consideró el inventario de emisiones de fuentes móviles actualizado al año 2008, así como los datos relacionados con caracterización del parque automotor, los flujos y las velocidades típicas del tráfico en la ciudad, entre otros. Esto permitió identificar los factores más importantes para la elaboración de las proyecciones de las emisiones de contaminantes, así como para el diseño de los proyectos que harán parte integral del PDDB. Entre dichos factores se destacan: las características del parque automotor (edad de los vehículos, tecnologías disponibles y tipos y calidad de combustibles empleados), las velocidades promedio en las principales vías, la distribución modal de los sistemas de transporte, el número y la longitud promedio de los viajes a realizar (influenciada por los modelos de desarrollo y expansión o densificación de las ciudades), el estado de las vías, y la gestión del tráfico.



**Figura 1.1.** Metodología de análisis del sector transporte.

Por su parte, para la construcción del *escenario tendencial* o escenario “*do nothing*”, se evaluó el grado de contaminación de la ciudad dentro de diez años si únicamente se consideran variables tales como el crecimiento económico, el crecimiento de la población, las variaciones en la demanda de transporte para cada uno de los diferentes modos y el crecimiento de la motorización sin tener en cuenta la implementación de proyectos y medidas de descontaminación. De esta forma, el *escenario tendencial* es fundamental para evaluar los beneficios que sobre la calidad del aire podrían tener los proyectos estudiados, ya que permite tener un punto de comparación a partir del cual se evalúe la efectividad de los mismos.

En la etapa de definición y validación de proyectos se diseñaron medidas de descontaminación específicas para el sector transporte con base en la revisión de planes internacionales de manejo de la calidad del aire (ver Anexo 1.1.), el análisis del contexto de

política ambiental bogotano y los aspectos técnicos del transporte de la ciudad. De esta forma, en los capítulos 4 y 5 de este documento se exponen las medidas propuestas para vehículos que utilizan combustible diésel y gasolina.

Luego del diseño de las medidas, se construyeron diversos escenarios de implementación en el marco de un proceso de optimización de costo-eficiencia de los proyectos. Este análisis se adelantó acoplando las medidas propuestas para la gestión de las fuentes industriales según como se presenta en la Sección 3 del Documento de Trabajo del Plan.

A continuación se describe de manera detallada la metodología que sirvió para la construcción de la línea base, la definición de escenarios y la cuantificación de los impactos en reducción de emisiones de los diferentes contaminantes derivados de las diferentes medidas.

### 3.1. Construcción de la Línea Base

En la construcción de la línea base de emisiones del sector transporte se escogió el 2008 como año de referencia, adoptando la actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles de dicho año (SDA-SUR, 2008) como punto de partida. Se procedió a completar la información de ciertos factores de emisión y contaminantes requeridos en la base de datos del mencionado documento y luego se identificaron los aspectos principales del mismo que debían ser considerados en mayor nivel de detalle.

Las emisiones de las fuentes móviles se calcularon siguiendo la metodología usada en la actualización del inventario en la fase anterior del proyecto (SDA-SUR, 2008), representada por la Ecuación 1.1.

$$E = \sum F_{e_{ij}} \cdot A_j \cdot Nf_j$$

Ecuación 1.1

En donde  $F_{e_{ij}}$  es el factor de emisión del contaminante  $i$  para la categoría vehicular  $j$  [ $g\ km^{-1}$ ];  $A_j$  es el factor de actividad asociado a la categoría vehicular  $j$  [ $km\ veh^{-1}\ dia^{-1}$ ], y  $Nf_j$  es el número de fuentes que pertenecen a la categoría vehicular  $j$ .

En la fase anterior del proyecto los factores de emisión fueron obtenidos mediante mediciones directas del tubo de escape y bajo condiciones reales de operación de los vehículos<sup>1</sup>. Por esta razón, la selección de los contaminantes y las categorías vehiculares obedeció a la disponibilidad de tiempo y recursos, dando prioridad a las principales fuentes de contaminación del sector transporte y sus contaminantes asociados. Como consecuencia, los factores de emisión de algunos contaminantes y categorías vehiculares no fueron medidos y por lo tanto, el primer reto en la construcción de la línea base de este trabajo consistió precisamente en la inclusión de los mismos.

Los factores de emisión medidos en campo en la fase anterior del proyecto incluyeron para vehículos livianos a gasolina y a gas natural CO, THC, NO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub>; y PM para vehículos diésel.

Los factores de emisión faltantes corresponden a PM en vehículos que operan con gasolina y gas natural vehicular; y CO<sub>2</sub>, CO, THC y NO<sub>x</sub> en vehículos que operan con combustible diésel. Esta información se completó haciendo uso de los factores de emisión base propuestos en el modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE por sus siglas en

---

<sup>1</sup> Vale la pena aclarar que el combustible usado por los vehículos diésel en los que se hicieron las mediciones, tenía un contenido aproximado de 1,000 ppm, valor notablemente superior al que se encuentra en el ACPM distribuido actualmente por Ecopetrol en Bogotá (50 ppm a partir de Enero 2010).

inglés), cuyo desarrollo ha sido financiado por entidades tales como la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

Cabe resaltar que el modelo citado ha sido específicamente diseñado como una herramienta para los países en vía de desarrollo y que los factores de emisión allí propuestos representan un buen acercamiento a la realidad de las emisiones asociadas al sector transporte. Sin embargo, estos factores de emisión presentan cierto grado de incertidumbre mientras que los factores de emisión obtenidos de mediciones directas permiten obtener de manera más exacta las emisiones de fuentes móviles al considerar las condiciones reales de operación de los vehículos. Por esta razón, los factores de emisión del modelo IVE solo se utilizan como complemento de la información disponible.

En la Tabla 1.1 se presentan las categorías vehiculares que se tuvieron en cuenta en este trabajo. Por su parte, el Anexo 1.7 muestra este mismo listado reseñando para el año base los factores de actividad, los factores de emisión asociados a cada uno de ellos y el número de vehículos de cada categoría.

NOTA: El ejercicio realizado en 2008 incluye categorías que cuentan con factor de emisión medido para compuestos orgánicos totales. En este sentido es relevante resaltar que los factores de emisión de compuestos orgánicos reportados por el Modelo IVE hacen referencia específica a compuestos orgánicos volátiles, los cuales son una fracción de los compuestos orgánicos totales.

**Tabla 1.1. Categorías vehiculares.**

Tipo de vehículo	Combustible	Control de emisiones	Cilindraje	Categoría
Vehículos de pasajeros	Gasolina	TWC	≤1,400cc	VP1
			>1,400cc	VP2
		NO TWC	≤1,400cc	VP3
			>1,400cc	VP4
	Gas natural	-	-	VP5
Camperos y camionetas	Gasolina	TWC	-	CC1
		NO TWC	<2,500	CC2
			≥2,500	CC3
	Gas natural	-	-	CC4
	Diésel	-	≤ 2,500cc	CC5
		-	> 2,500cc	CC6
Bus o buseta	Diésel	-	<5,000	B1
		-	≥5,000	B2
	Gasolina	-	>3,000 y <6,000cc	B3
		-	≥ 6,000cc	B4
Bus articulado	Diésel	-	-	TM
Bus escolar/turismo	Diésel	-	-	ET
Microbus	Diésel	-	-	MB
	Gasolina	-	-	MBg
Colectivos	Gas natural	-	-	MC
Taxis	Gasolina	-	-	T1
	Gas natural	-	-	T2
Camión	Diésel	<1997	<6,000	C1
			≥6,000	C2
		≥1997	-	C3
	Gasolina	-	< 6,000cc	C4
		-	≥ 6,000cc	C5
	Gas natural	-	< 6,000cc	C6
		-	≥ 6,000cc	C7
Motos <sup>2</sup>	Gasolina	-	-	M1
		-	-	M2

TWC = Catalizador de tres vías

### 3.1.2. Validación del Número de Fuentes

Una vez asignados los diferentes factores de emisión para los cinco contaminantes de interés (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, THC, PM) en todas las categorías vehiculares y para los tres tipos de combustible disponibles en la ciudad de Bogotá, se procedió a realizar una validación del

<sup>2</sup> La categoría M1 hace referencia a las motocicletas con motor a dos tiempos, la categoría M2 corresponde a las motocicletas con motos a cuatro tiempos.



número de fuentes para vehículos de transporte de pasajeros de la flota de transporte particular y pública. En este caso se tomó como punto de partida la base de datos de vehículos matriculados en la ciudad de Bogotá, suministrada por la Secretaría Distrital de Movilidad (SDM) a la Universidad de los Andes para la actualización del inventario en el año 2008 y la información sobre vehículos reconvertidos a GNV suministrada por la firma Gazel S.A. La flota de motos se estimó a partir de la base de datos de la SDM para el año 2008 y considerando los datos del observatorio de movilidad de la Cámara de Comercio de Bogotá.

### 3.1.2.1. Vehículos de Transporte Público

Para validar el número de fuentes correspondientes al transporte público (TP) se acudió a los registros oficiales disponibles a través del consorcio SIM (Servicios Integrados para la Movilidad) de la SDM (ver Anexo 1.2.), cuyas cifras coinciden con las publicadas por el Observatorio de Movilidad de Bogotá (CCB, 2008). Se verificó además la concordancia de las mismas con la Encuesta de Transporte Urbano de Pasajeros (DANE, 2008).

Adicionalmente, se contó con dos fuentes de información sobre el tipo de combustibles empleados por la flota en cuestión: 1) Encuestas a empresas prestadoras del servicio de transporte público colectivo realizadas para este estudio y 2) Una base de datos suministrada por la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) con información sobre las empresas y los vehículos inscritos en el Programa de Autorregulación. A partir del análisis y validación de los datos suministrados por las fuentes de información mencionadas se estimó el tamaño de la flota en más de 17,000 vehículos, con la participación porcentual por categorías que se presenta en la Tabla 1.2.

**Tabla 1.2.** Flota vehicular de transporte público.

MODO	Categoría vehicular	Código	Combustible utilizado	Vehículos año 2008
				Participación del TPC
TPC*	Micro Bus	MBg	Gasolina	7%
	Buses y busetas	B3	Gasolina	3%
	Buses y busetas	B4	Gasolina	4%
	Micro Bus	MC	GNV	4%
	Buses y busetas	B1	ACPM	32%
	Buses y busetas	B2	ACPM	23%
	Microbuses	MB	ACPM	21%
TM**	Transmilenio	TM	ACPM	6%

MBg: Microbuses que usan gasolina como combustible; B3: Buses y busetas que usan gasolina como combustible y tienen cilindradas entre 3,000 y 6,000 c.c.; B4: Buses y busetas que usan gasolina como combustible y tienen cilindradas mayores a 6,000 c.c.; MC: Microbuses que usan GNV como combustible; B1: Buses y busetas que usan ACPM como combustible y tienen cilindradas menores a 5,000 c.c.; B2: Buses y busetas que usan ACPM como combustible y tienen cilindradas mayores a 5,000 c.c.; MB: Microbuses que usan ACPM como combustible; TM: Buses articulados del sistema Transmilenio.

\* TPC: Transporte Público Colectivo. Se refiere a todos los vehículos que prestan el servicio de transporte público y que no circulan por las troncales del sistema de transporte masivo Transmilenio. En esta categoría se incluyen los buses alimentadores de este sistema.

\*\* TM: Vehículos que hacen parte del esquema de BRT (Bus Rapid Transit) de Bogotá, conocido como TransMilenio.

### 3.1.2.2. Vehículos Particulares

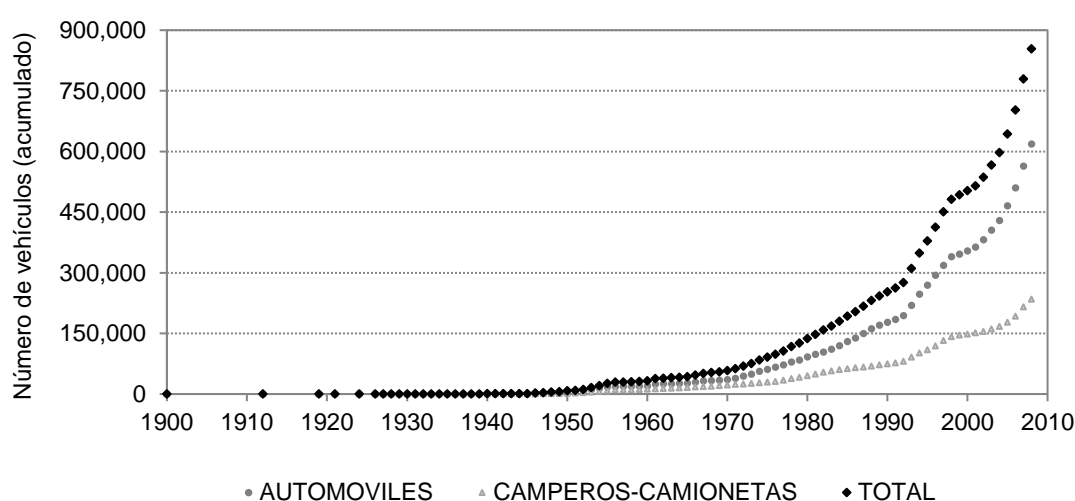
La validación del número de fuentes del sector particular comprendió dos aspectos: a) La edad del parque automotor reportada en la base de datos de la SDM y b) El número de

vehículos que a pesar de estar matriculados fuera de Bogotá circulan por las vías de la ciudad.

**a. Edad del parque automotor:** La base de datos de la SDM cuenta con registros de vehículos particulares (automóviles, camperos y camionetas) de años modelo desde 1900 en adelante. Es claro que vehículos cuya edad promedio sobrepasa los 30 o 40 años, si bien aparecen en dicha base de datos, en la actualidad ya no se encuentran circulando por las vías de la ciudad, con excepción de unos pocos vehículos clásicos.

Se planteó entonces un análisis sobre el número total de vehículos registrados en función del año modelo de los mismos de modo que se pudiera establecer, para cada año, cuál era la cantidad acumulada de vehículos (Ver

). Contabilizando todos los registros disponibles en la base de datos, se obtiene un total de 853,700 automóviles, camperos y camionetas.



**Figura 1.2.** Número acumulado de vehículos según año modelo - Base de datos SDM.

La cifra anterior fue comparada con información suministrada por la Secretaría Distrital de Hacienda, según la cual el número de declarantes de impuestos de automóviles en el año 2008 fue de 693,000, cifra comparable con el número de vehículos acumulado entre el año 1983 y el 2008 según la base de datos de la SDM. Esto sugiere que los vehículos que tienen alrededor de 30 años de vida o más ya no circulan por sus calles y que puede existir un porcentaje de vehículos que aunque en el pasado fueron matriculados en la ciudad actualmente circulan sin declarar pago de impuestos. Según los cálculos realizados, dicha fracción sería del 8%. En definitiva, la validación arrojó como resultado un número base de 755,000 vehículos aproximadamente.

**b. Vehículos de fuera de la ciudad:** Una vez realizado el ajuste del número de vehículos particulares por año modelo se utilizó el valor encontrado para calcular el número total de fuentes móviles de esta categoría que circulan por las vías de la ciudad, teniendo en cuenta que una proporción de los vehículos que circulan por la ciudad, no necesariamente están registrados en la misma. Para tal efecto se desarrollaron aforos vehiculares con videos realizados en 4 puntos diferentes de la ciudad, de tal manera que se pudiera registrar cuántos de los vehículos que pasaban por cada uno de estos puntos se encontraban matriculados en Bogotá y cuántos en otras ciudades o municipios, realizando un conteo de placas. De esta manera se obtuvo que aproximadamente el 14% de los vehículos que circulan por las vías de la ciudad se encuentran matriculados fuera de Bogotá. Con este valor se ajustó la cifra base (de 755,000 vehículos) de manera que se obtuvo un valor

aproximado de 883,000 automóviles, camperos y camionetas que se encuentran en circulación dentro de la ciudad de Bogotá y que por lo tanto contribuyen a la emisión de contaminantes en la misma. La participación por categorías vehiculares se presenta en la Tabla 1.3.

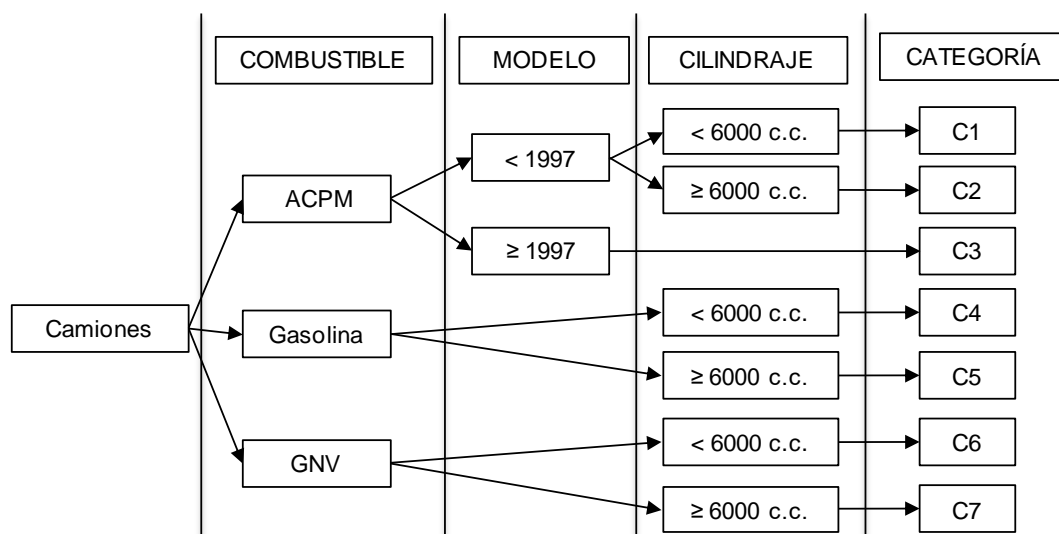
**Tabla 1.3.** Composición de la flota vehicular de transporte particular.

Categoría vehicular		Combustible utilizado	Participación año 2008
Vehículos de pasajeros	VP1	Gasolina	24%
Vehículos de pasajeros	VP2	Gasolina	16%
Vehículos de pasajeros	VP3	Gasolina	16%
Vehículos de pasajeros	VP4	Gasolina	14%
Camperos y camionetas	CC1	Gasolina	13%
Camperos y camionetas	CC2	Gasolina	6%
Camperos y camionetas	CC3	Gasolina	5%
Camperos y camionetas	CC4	GNV	3%
Vehículos de pasajeros	VP5	GNV	1%
Camperos y camionetas	CC5	ACPM	1%
Camperos y camionetas	CC6	ACPM	1%
TOTAL			100%

VP1: Vehículos de pasajeros con TWC y cilindraje  $\leq 1,400$ cc. VP2: Vehículos de pasajeros con TWC y cilindraje  $> 1,400$ cc. VP3: Vehículos de pasajeros sin TWC y cilindraje  $\leq 1,400$ cc. VP4: Vehículos de pasajeros sin TWC y cilindraje  $> 1,400$ cc. VP5: Vehículos de pasajeros que usan GNV como combustible. CC1: Camperos y camionetas con TWC. CC2: Camperos y camionetas sin TWC y cilindraje  $< 2,500$ cc. CC3: Camperos y camionetas sin TWC y cilindraje  $\geq 2,500$ cc. CC4: Camperos y camionetas que usan GNV como combustible. CC5: Camperos y camionetas que usan ACPM como combustible y tienen un cilindraje menor a 2,500 c.c.; CC6: Camperos y camionetas que usan ACPM como combustible y tienen un cilindraje mayor a 2,500 c.c.

### 3.1.2.3. Camiones

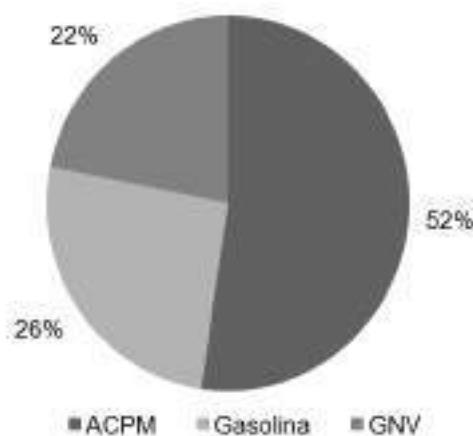
El transporte de carga se clasificó en siete categorías según como se presenta en la Figura 1.3. De acuerdo a los registros de Gazel, existen en la ciudad 10,438 camiones con GNV de los cuales alrededor del 60% corresponde a camiones livianos (categoría C6) y el resto a camiones pesados (categoría C7).



**Figura 1.3.** Esquema de las categorías de camiones en Bogotá.

Por otra parte, según los registros de la SDM para el año 2008, existen cerca de 12,300 camiones que operan con gasolina como combustible de los cuales poco menos de 8,700 son livianos (categoría C4) y el resto corresponde a vehículos pesados (categoría C5). Según el Informe del parque automotor de carga en Colombia (Ministerio de Transporte, 2006), los vehículos de carga que usan GNV y gasolina como combustible corresponden al 49% del total. Es decir, cerca de 19,700 vehículos, el 51% restante corresponde a camiones de carga de ACPM.

Adicionalmente, se consideró el efecto de los camiones que aunque no están matriculados en Bogotá circulan en la ciudad. Según información del Centro de Información Logística de Carga de Bogotá (SDM, 2007) y el informe del parque automotor de transporte de carga en Colombia (DTT, 2006), cada día entran a la ciudad cerca de 25,000 vehículos (incluyendo vehículos registrados dentro y fuera de la ciudad). Se supuso que los vehículos adicionales identificados según esta fuente de información, utilizan ACPM como combustible, ya que es el combustible con el mejor desempeño en carretera. En la Figura 1.4 se presenta la distribución por tipo de combustible de la flota de carga en Bogotá para el año 2008.



**Figura 1.4.** Distribución de la flota de camiones en Bogotá según el tipo de combustible para el año 2008.

### 3.2. Construcción del Escenario Tendencial

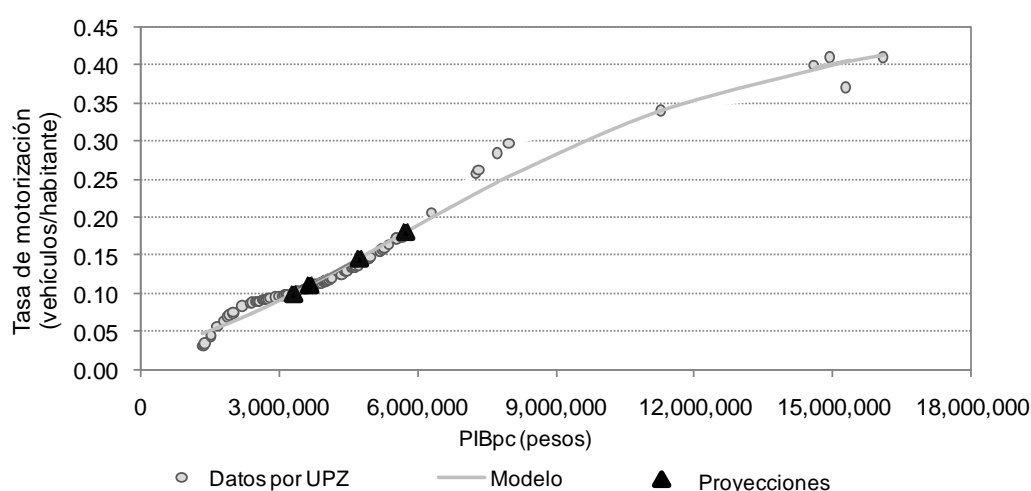
La construcción del “escenario tendencial” permite evaluar a qué punto llegarían las emisiones del sector transporte en la ciudad de Bogotá dentro de diez años, en caso de no implementarse ningún proyecto o medida de descontaminación. La creación de este escenario contempla las siguientes variables: 1) Crecimiento económico, 2) Crecimiento de la población, 3) Variaciones en la demanda de transporte para cada uno de los diferentes modos y 4) Crecimiento de la motorización.

#### *3.2.1. Crecimiento de la Motorización y el Número de Vehículos Particulares*

La motorización es la variable que relaciona el número de vehículos (en este caso particulares) en la ciudad con el número de habitantes de la misma. Existen diversos modelos desarrollados con el fin de caracterizar dicha tasa de motorización de manera que sea posible predecir su comportamiento en el tiempo y de esta forma conocer el crecimiento del parque automotor. La mayor parte de estos modelos intentan explicar el comportamiento de la tasa de motorización a través de una variable económica que refleje el nivel de ingreso promedio de la población y por ende, su poder adquisitivo frente a la compra de un vehículo

particular. La relación existente entre la tasa de motorización y el nivel de ingresos de la población suele tener un comportamiento sigmoideo (curva en forma de “S”), ya que la tasa de motorización aumenta paulatinamente para los niveles de ingreso más bajos y más rápidamente para los niveles de ingreso más alto, hasta alcanzar finalmente un punto de equilibrio que corresponde a la tasa de saturación (Gómez, 2008).

Para el caso de la ciudad de Bogotá, en un estudio previo desarrollado por la Universidad de los Andes “*El transporte como soporte al desarrollo del país. Una visión al 2040*” (Acevedo et al., 2008), se estableció la relación entre la tasa de motorización y el nivel de ingresos per cápita (PIBpc) de cada UPZ de la ciudad (ver **Error! Reference source not found.**). De esta manera y empleando referentes internacionales de tasas de motorización y niveles de ingresos asociados se logró construir una curva que permite estimar el crecimiento de la tasa de motorización para la ciudad de Bogotá. Este ejercicio permitió estimar el número de vehículos particulares que habrá hasta el año 2020, que corresponde al horizonte de desarrollo del PDDb.



**Figura 1.5.** Construcción del modelo de crecimiento de la tasa de motorización.

### 3.2.2. Crecimiento del Número de Taxis y Motocicletas

Para obtener las proyecciones de estos dos modos de transporte se acudió a las estimaciones hechas por Acevedo et al., (2008), quienes establecieron a través de modelos validados las tasas de motorización para motocicletas y la participación de los taxis en la provisión de viajes totales de la ciudad.

Para el caso particular de las motocicletas, se utilizó como parámetro base la tasa de motorización proyectada para la Gran Bogotá (la cual incluye los municipios circunvecinos y las áreas de expansión suburbana de la zona rural del Distrito). Sin embargo, fue necesario ajustar esta proyección según el inventario de motocicletas validado para el año 2008 y considerando información sobre el tamaño de la población del Distrito.

En el caso de los taxis, se usaron las proyecciones del número de viajes que se moverían en el escenario tendencial, así como la participación de cada uno de los modos de transporte. Para calcular el número de vehículos se usó un factor de actividad de 89,000 km/año, estimado a partir de las cifras provistas por las investigaciones de Rodríguez et al (2009) y Acevedo et al (2008). Los resultados de estos cálculos se exponen en la Tabla 1.4.

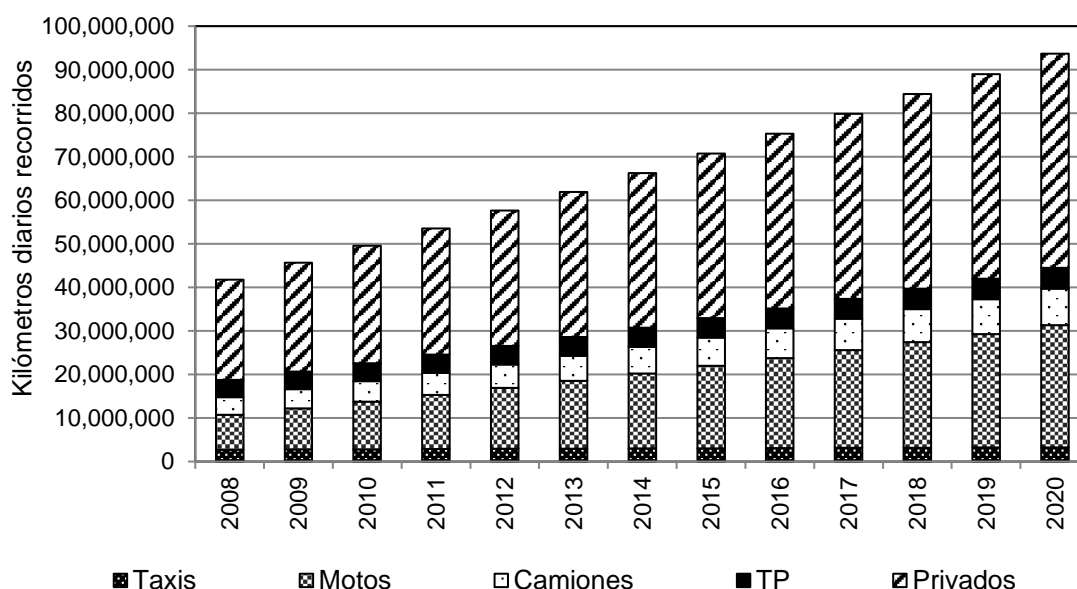
**Tabla 1.4.** Parámetros usados para la proyección del número de fuentes (taxis y motos).

Modo	Parámetros	2008	2012	2016	2020
MOTOS	Población de la Gran Bogotá	8,025,774	8,511,188	9,019,559	9,524,523
	Tasa de motorización (veh/hab)	0.0392	0.0648	0.0904	0.116
	Vehículos según tasa de motorización	314,610	551,525	815,368	1,104,845
	Vehículos ajustados según inventario validado y población de Bogotá	116,477	204,189	301,870	409,042
TAXIS	Número total de viajes	12,611,592	14,292,888	15,974,184	17,655,480
	Participación porcentual en viajes	3.29%	3.13%	2.96%	2.80%
	Viajes según participación porcentual	415,189	446,979	473,226	493,930
	Número de vehículos	51,000	54,905	58,129	60,672

### 3.2.3. Crecimiento del Número de Viajes de Transporte Público Colectivo

La revisión de las variaciones en la demanda de transporte, para cada uno de los diferentes modos, permite estimar de manera indirecta el crecimiento de la flota de transporte público colectivo. La dificultad asociada a este análisis radica en la imposibilidad de realizar una desvinculación entre el número de fuentes y el factor de actividad ya que la variable a estimar resulta siendo el número de vehículos-km asociado a la totalidad de la flota. Lo que se hizo entonces fue utilizar las proyecciones del crecimiento de los viajes en transporte público colectivo y calcular el número de kilómetros recorridos por toda la flota (veh-km) en una unidad de tiempo, conociendo el índice de pasajeros por kilómetro ( $1.61 \text{ pasajeros-km}^{-1}$ ) y la longitud promedio de los viajes realizados (11.3 km).

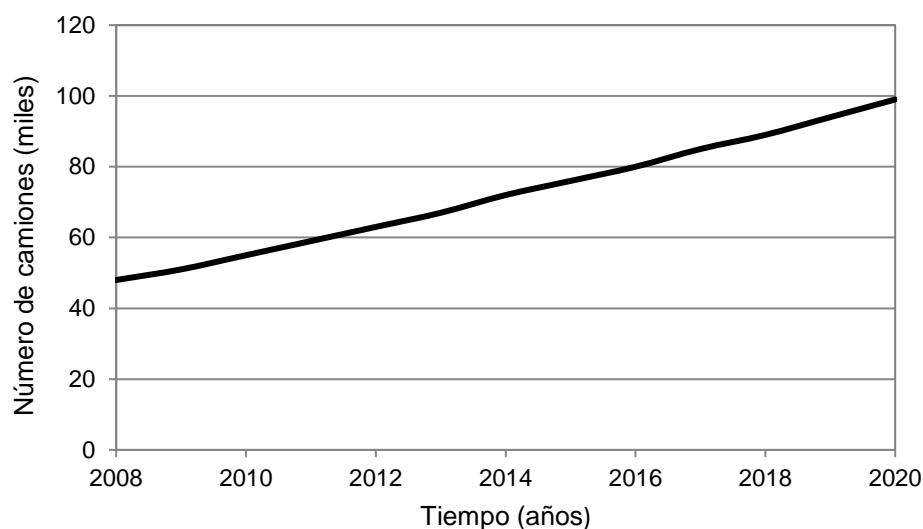
En la **Error! Reference source not found.** se presenta el crecimiento de los kilómetros recorridos por la flota de vehículos, y en ella es evidente cómo para el escenario tendencial el crecimiento de los vehículos particulares será significativamente mayor al del transporte público. Esta situación está relacionada con el rápido aumento de la tasa de motorización en la ciudad proyectada para los años 2008-2020, aunado a un esquema de transporte público que en la actualidad incentiva indirectamente el uso de vehículos particulares.



**Figura 1.6.** Crecimiento de los kilómetros recorridos por las distintas categorías de transporte de la ciudad.

### 3.2.4. Crecimiento del Número Vehículos de Carga

La proyección del número de fuentes se realizó considerando el crecimiento esperado del PIB en los próximos años. Debido a que el transporte de carga depende en gran medida del crecimiento económico, se espera que este ajuste sea una buena aproximación al comportamiento futuro del número de camiones que transitan en Bogotá (ver Figura 1.7).



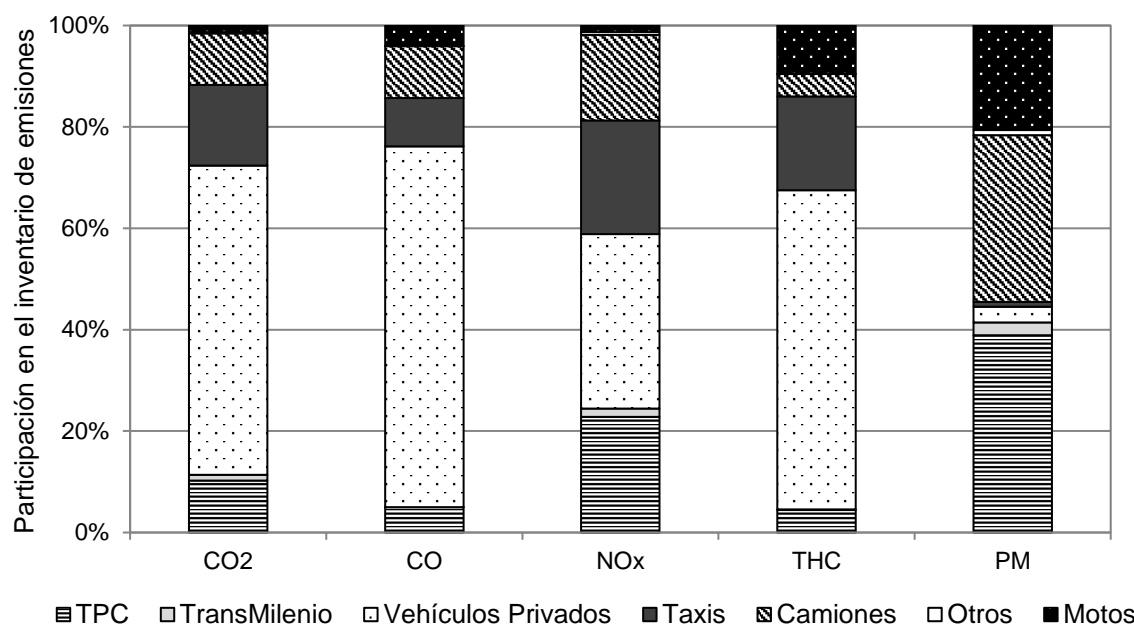
**Figura 1.7.** Proyección de número de fuentes 2010-2020.

## 3.2. Emisiones Año Base y Proyección de Emisiones

### 3.2.4. Emisiones año 2008

En Bogotá, la influencia de las fuentes móviles sobre el inventario de contaminantes atmosféricos es muy importante pues sus emisiones aportan más del 80% del inventario total de CO, CO<sub>2</sub>, y NO<sub>x</sub>. Además, este tipo de fuentes cobran relevancia desde una perspectiva de exposición personal dado que, por ejemplo, a pesar de que las fuentes industriales emiten el 45% del PM, éstas no tienen implicaciones tan directas como las fuentes móviles sobre la salud de los ciudadanos.

Las fuentes móviles en el año 2008 emitieron cerca de 6,000,000 de toneladas de CO<sub>2</sub>, 500,000 de CO, 55,000 de NO<sub>x</sub>, 60,000 de THC y 1,500 de PM. El aporte de las diferentes categorías a la emisión total de fuentes móviles se presenta en la Figura 1.8.



**NOTA:** TPC se refiere a vehículos que prestan el servicio de transporte público colectivo. La categoría "otros" se refiere todos los buses, busetas y microbuses del servicio privado de transporte.

**Figura 1.8.** Aporte de las categorías vehiculares al inventario de emisiones del año base.

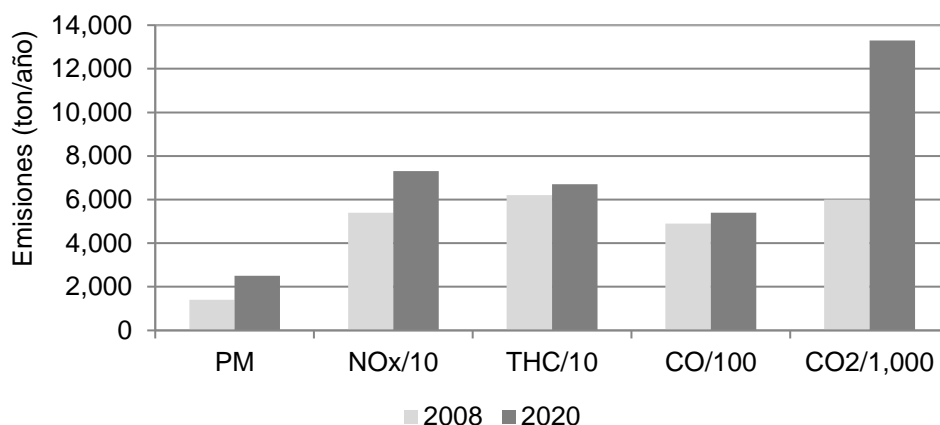
Las categorías de mayor aporte al inventario de PM son los buses de transporte público colectivo (39%), la flota de vehículos de carga (33%) y las motocicletas (21%). Por su parte las categorías de mayor aporte a las emisiones de NO<sub>x</sub> son los vehículos particulares (34%) seguido por buses de transporte público colectivo y los taxis, las cuales aportan cada una alrededor del 22% de las emisiones de este contaminante. En cuanto a las emisiones de TOC y CO, los vehículos particulares aportan más del 60% de las emisiones generadas por las fuentes móviles.

### 3.2.4. Escenario Tendencial

Como ya se mencionó, la construcción del escenario tendencial permite evaluar a qué punto llegarían las emisiones del sector transporte en la ciudad de Bogotá dentro de diez años en caso de no implementarse ningún proyecto o medida de descontaminación. La creación de este escenario contempla las siguientes variables: **1)** Crecimiento económico, **2)** Crecimiento de la población, **3)** Variaciones en la demanda de transporte para cada uno de los diferentes modos y **4)** Crecimiento de la tasa de motorización.

Las emisiones para el año base y para el final del periodo de análisis de los distintos contaminantes se presentan en la Figura 1.9. Los contaminantes de mayor crecimiento son el material particulado y el dióxido de carbono, observándose para el año 2020 un incremento de las emisiones respecto al año base de alrededor de 80% para PM y de más del 100% para CO<sub>2</sub>.





**Figura 1.9.** Proyección de las emisiones de fuentes móviles para el horizonte 2008-2020.

Para el año 2020, las categorías de mayor aporte al inventario de emisiones siguen siendo los buses de la flota de transporte público colectivo, las motocicletas y los vehículos de transporte de carga, siendo el aporte de los camiones y las motos superior al de TPC, categoría que en el año base era la de mayor aporte a las emisiones de este contaminante. Al final del horizonte de análisis la categoría de mayor aporte en las emisiones de CO y THC sigue siendo la de vehículos privados.

El PM es el contaminante de mayor crecimiento, observándose para el año 2020 un incremento cercano al 80%. Por su parte para  $\text{NO}_x$  se proyecta un crecimiento en las emisiones anuales de más del 30%. Finalmente, según la proyección de las emisiones anuales para de CO y THC se presentarán incrementos cercanos al 10%.

#### 4. FORMULACION DE PROYECTOS PARA VEHÍCULOS DIÉSEL

Las medidas encaminadas a reducir las emisiones provenientes de la flota de transporte público (TP) hacen hincapié en aquellos vehículos que usan combustible diésel, ya que es el más empleado por este sector y el que mayores implicaciones tiene sobre el inventario de PM (ver Tabla 1.5), hecho que se agrava considerando los fenómenos de exposición personal a los que se ven sometidos los peatones y los usuarios del servicio.

**Tabla 1.5.** Aporte por categorías al inventario de emisiones (año 2008) provenientes de la flota de transporte público colectivo y masivo.

COMBUSTIBLE	CATEGORÍA VEHICULAR	Aporte porcentual en las emisiones anuales				
		CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	THC	PM
Gasolina	Microbuses (MBg) Buses y busetas (B3 y B4)	12%	68%	8%	48%	1%
GNV	Microbuses colectivos (MC)	2%	4%	1%	<1%	<1%
Diésel	Buses y Busetas (B1 y B2) Buses Articulados (TM) Microbuses (MB)	86%	28%	91%	52%	98%

La metodología para calcular el inventario de emisiones provenientes de las fuentes vehiculares que prestan el servicio de transporte público, se resume en la Ecuación 2.

$$E_{i,j} = \sum (FE_{i,j}) \cdot \left( \frac{C_{i,j} \cdot VD}{IPK_i} \cdot k_{da} \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde *FE* corresponde al factor de emisión de la categoría *i* del modo *j*, *C* corresponde a la participación de cada categoría *i* en la flota del modo *j*, *VD* representa los viajes diarios realizados por todo el parque automotor de transporte público<sup>3</sup>, *IPK* es el índice de pasajeros por kilómetro para cada uno de los modos *i*, y *k<sub>da</sub>* es un factor de conversión de días a años.

De esta forma, la gestión sobre este tipo de fuentes puede enfocarse en el primer multiplicando de la ecuación (*FE*) a través del mejoramiento del desempeño ambiental de los vehículos; y/o en el segundo, que representa la actividad del parque y que puede afectarse mediante la optimización de la operación de la flota. Estos dos enfoques son los que se exponen a continuación.

##### 4.1. Implementación del Sistema Integrado de Transporte Público

A pesar de que las últimas administraciones distritales han hecho ingentes esfuerzos en la organización del sistema de transporte, y en espera de la adjudicación e implementación del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP), la ciudad aún carece de un esquema operacional que le garantice resolver los problemas de sobreoferta, de ilegalidad y de ineficiencia (en términos de los tipos de vehículo que prestan el servicio). Dichos problemas encontrarán respuesta en el SITP, a través del cual se pretende mejorar las condiciones del servicio y garantizar la ampliación de la oferta de modos de transporte, a saber: transporte público colectivo, transporte masivo (TM), metro (M) y tren de cercanías (TC).

De esta forma, la implementación del SITP requiere de una intervención integral que incluye:

<sup>3</sup> Este número de viajes es específico para cada uno de los años que comprende el horizonte de aplicación del Plan Decenal de Descontaminación, y fueron calculados a su vez usando la metodología descrita en

- Implementación de un nuevo sistema de rutas, jerarquizadas y optimizadas a través de esquemas de operación zonal.
- Desarrollo de un sistema integrado de recaudo, control e información.
- Integración tarifaria y medio de pago electrónico.
- Cambio del esquema empresarial actual (en el que operan 66 empresas afiladoras y centenares de otro tipo de empresas y cooperativas de propietarios de buses) a un esquema de concesión de zonas de operación a través de licitaciones, que reducirá el número de empresas prestadoras del servicio a un total de 13 empresas.

Sin embargo, es necesario analizar las estrategias que han sido consideradas para integrar el componente ambiental a la implementación del sistema y garantizar que su consolidación tenga repercusiones positivas en la calidad del aire bogotano. Bajo esta perspectiva, en este documento se tienen en cuenta tres fases entre el año 2008 y el año 2020 en lo que tiene que ver con la implementación del SITP:

- Periodo 1 (2008 – 2011): El parque automotor de TP mantiene su composición actual, con el 78% de los viajes provistos por el TPC y el 22% restante por el TM. Por su parte, el IPK del primer modo se conservaría en principio su nivel de 1.6 pasajeros/km de acuerdo con los análisis adelantados por el Observatorio de Movilidad de Bogotá (CCB, 2009), pero crecerá paulatinamente para alcanzar la valor fijado como meta para el segundo periodo. El IPK del sistema Transmilenio seguiría siendo 5.1 como ocurre actualmente.
- Periodo 2 (2012 – 2016): Tras la finalización de las obras de la Fase III de Transmilenio y el comienzo de la implementación del SITP, el modo de transporte público que no es TM mejorará su desempeño operando con 14,730 vehículos<sup>4</sup> (a diferencia de los 16,168 que usa actualmente) alcanzando un IPK de 1.8, mientras que el de TM se mantendrá constante, aunque el sistema aumentará su flota pasando de los 1,070 vehículos que operaban en el periodo anterior a 1,224. De esta forma, el transporte masivo llegará en este periodo a proveer el 30% de los viajes totales que se efectuarían en la ciudad.
- Periodo 3 (2017 – 2020): En este lapso se continúa con la consolidación del SITP, y se prevé que el modo de transporte público que no es TM alcance el nivel de máxima eficiencia posible con un IPK de 2.2 y una flota cercana a 10,600 vehículos, realizando el 50% de los viajes. Por su parte, con la entrada en operación del metro (modo que proveerá el 10% de viajes en su etapa inicial y que no generaría emisiones directas por usar electricidad como fuente de energía), el IPK del TM descenderá ligeramente (hasta 4.7) pero proveerá el 40% del total de viajes de la ciudad.

Estos tres lapsos son caracterizados esquemáticamente en la **Error! Reference source not found.1.10**, en donde se presenta la participación de los modos de transporte público en el total de viajes transportados en la ciudad. Además, en ella se muestra cómo las medidas tendientes a mejorar el servicio de transporte público provocarían un desestimulo del uso del vehículo privado, lo cual se vería reflejado a su vez en que la participación de este modo se mantenga constante en 40% a partir del año 2012, lo cual marca una clara diferencia con respecto al escenario tendencial (en donde los viajes llevados a cabo por este modo al finalizar el año 2020 corresponderían al 49% de los viajes totales).

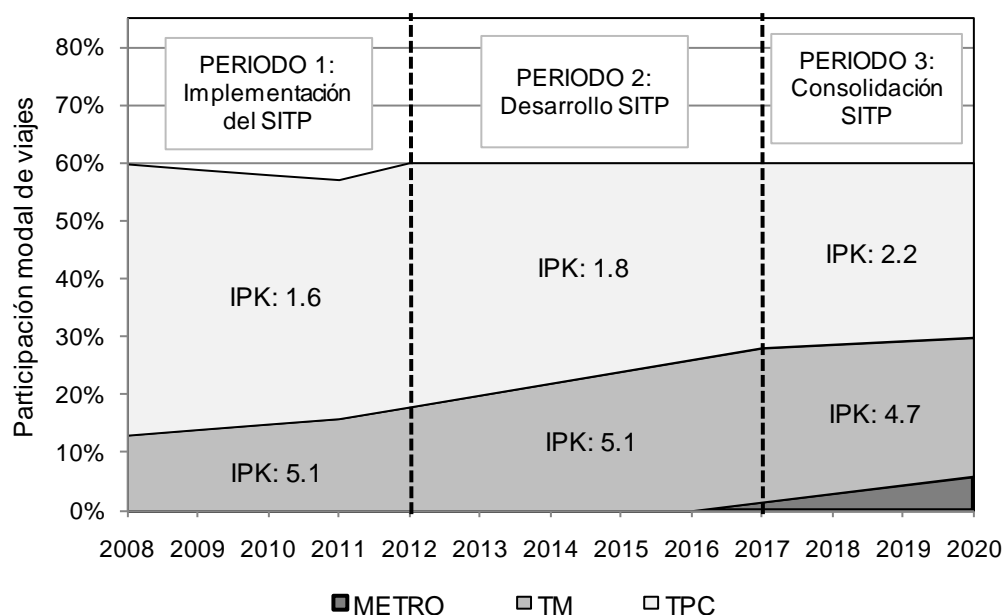
De esta forma se conseguiría una reducción en las emisiones derivada de la disminución del factor de actividad de los vehículos privados, evitando que la tasa de crecimiento anual de sus viajes supere a la de transporte público. Los beneficios ambientales de este

---

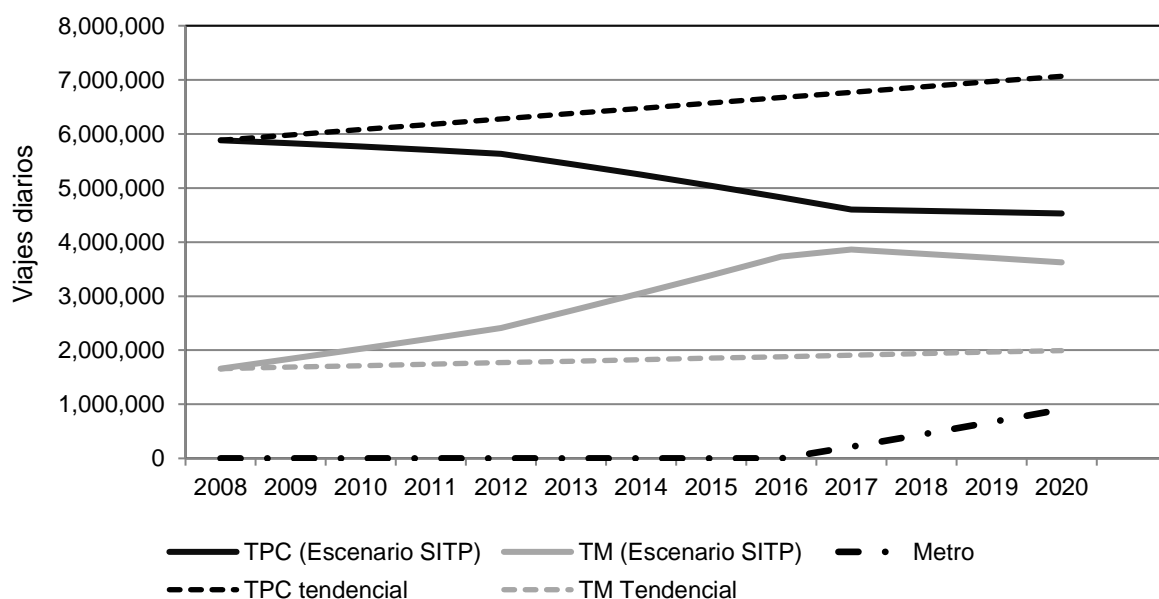
<sup>4</sup> Este valor corresponde al parque automotor proyectado según los planes de ajuste de la SDM, y cuyo cumplimiento constituiría el primer paso hacia la disminución de la sobreoferta. En el Anexo 1.2 se presentan los planes de ajuste para cada una de las empresas transportadoras que operan en la actualidad.

fenómeno se presentan en el Capítulo 5 de esta sección dedicado a los vehículos de gasolina.

La composición modal propuesta para los tres periodos se configurará de forma gradual en el horizonte de aplicación del PDDB y en sincronía con la proyección de los viajes totales de la ciudad. En la Tabla 1.61.6 se presenta la evolución de los indicadores modales por cuatrienios y en la **Error! Reference source not found.** se presenta la proyección de los viajes en la ciudad en el escenario tendencial (sin considerar SITP) así como la proyección de los viajes en el escenario deseable, articulado a través de los tres periodos expuestos. Por otro lado, en la **Error! Reference source not found.** se expone la situación actual del parque automotor de TP, en términos de factores de actividad y de emisión.



**Figura 1.10.** Diagrama esquemático de los periodos de afianzamiento del SITP.



**Figura 1.11.** Proyección de la participación modal de transporte entre el 2008 y el 2020.

**Tabla 1.6.** Proyección de los indicadores de movilidad para los diversos modos de transporte público.

Modo	Variable	2008	2012	2016	2020
TP	Número de viajes diarios	7,541,000	8,047,000	8,553,000	9,058,000
	Crecimiento de los viajes	NA	1.60%	1.50%	1.42%
TP (no TM)	Participación modal estimada	78%	70%	56%	50%
	Número de viajes diarios	5,882,000	5,633,000	4,824,000	4,529,000
	FA <sub>F</sub> (Km·dia <sup>-1</sup> )	3,676,000	3,129,000	2,275,000	2,059,000
	FA <sub>V</sub> (Km·año <sup>-1</sup> ·veh <sup>-1</sup> )	83,000	77,000	72,000	71,000
	Número de vehículos	16,168	14,743	11,494	10,592
	Crecimiento de la flota	NA	-2.26%	-6.22%	-0.57%
	IPK (Viajes·Km <sup>-1</sup> )	1.6	1.8	2.12	2.2
TM	Participación modal estimada	22%	30%	44%	40%
	Número de viajes diarios	1,659,000	2,414,000	3,729,000	3,623,000
	FA <sub>F</sub> (Km·dia <sup>-1</sup> )	325,300	473,300	731,200	773,000
	FA <sub>V</sub> (Km·año <sup>-1</sup> ·veh <sup>-1</sup> )	111,000	141,200	171,500	179,000
	Número de vehículos	1,070	1,224	1,557	1,576
	Crecimiento de la flota	NA	3.03%	5.23%	0.00%
	IPK (Viajes·Km <sup>-1</sup> )	5.1	5.1	5.1	4.69
METRO	Participación modal estimada	0	0	0	10%
	Número de viajes diarios	0	0	0	906,000

**NOTA:** La modelación del SITP en el diseño del plan de descontaminación se realizó con base en los pliegos de licitación publicados en el segundo semestre del año 2009 en la página Web de contratación del Distrito. Dicha información fue complementada con datos proveídos por la gerencia del SITP, tales como las variables relacionadas con la eficiencia del sistema y su desempeño ambiental.

A lo largo del proceso de elaboración del plan de descontaminación los pliegos en referencia sufrieron múltiples modificaciones para las que se hizo el mejor esfuerzo de ser incluidas en el proyecto aquí descrito en la medida en que tal información fue hecha disponible para el equipo de investigadores. Por ejemplo, en lo que se refiere a variables que afectan el desempeño ambiental del sistema y el número total de vehículos que hacen parte del mismo, se hicieron modificaciones en los tiempos y en la gradualidad de implementación previstos inicialmente por el Distrito.

En todos los casos considerados, el escenario desarrollado por la Universidad es de carácter conservador y en cada punto en que se encontraba incertidumbre se tomaron decisiones bajo dicho esquema. Lo que esto significa es que las desviaciones que puedan presentarse entre los resultados de la modelación y la implementación real del sistema, tendrían implicaciones favorables al sistema en lo que se refiere a su desempeño ambiental.

#### *4.1.1. Estrategias que hacen parte de la Implementación del SITP*

La implementación y operación del SITP desembocarán en beneficios ambientales derivados de la solución de dos de los problemas crónicos que desde hace varios años aquejan al transporte público en la ciudad: 1) Sobreoferta y 2) Elevada edad del parque automotor. De esta forma, el SITP incluye de forma implícita estrategias para la resolución de estos dos problemas.

**Tabla 1.7.** Estrategias que hacen parte del SITP

Medida de descontaminación	Énfasis	Descripción
Implementación del SITP	Sobreoferta	Implementación del SITP según los tres periodos estipulados en la <b>Error! Reference source not found.1.10</b> , enfocándose en la redistribución modal de los viajes en transporte público. La renovación de la flota vehicular solo se dará como un beneficio colateral del reajuste del parque automotor, según los requerimientos del nuevo sistema en términos del tipo de vehículos que operaran los concesionarios.
	Edad Vehicular	Adicionalmente al reajuste del parque automotor que implica el SITP y su consecuente disminución de la sobreoferta, en este modo se asume el compromiso de mantener la edad promedio de la flota de TP en un dígito (actualmente es de 13 años aproximadamente). Para esto se considera la adquisición anual de cerca de 400 vehículos en el marco de un programa de renovación continua que permitiría tener en el 2020 un parque con una edad promedio de 7 años.

*a. Énfasis en la reducción de la sobreoferta*

Según la Contraloría de Bogotá (2007) la sobreoferta de TPC en la ciudad en el año 2003 era cercana a los 8,000 vehículos (un 42% del total de la flota) y para el 2007 ya se podían contabilizar 9,635 vehículos. "Mientras que el promedio de pasajeros por vehículo en Bogotá es 200, los estándares internacionales sugieren que el nivel de ocupación debe ser cercano a los 500 pasajeros/día" (CCB, 2008).

Aunque se han tomado medidas para disminuir la sobreoferta, en particular las derivadas del Decreto 115 del 2003 el cual definió el "Índice de reducción de sobreoferta para el mejoramiento de la calidad del servicio" así como el "Fondo para el mejoramiento de la calidad del servicio", la chatarrización de vehículos no ha sido efectiva. Al respecto la Contraloría de Bogotá estima que en el periodo 2000 – 2007 se chatarrizaron 8,829 vehículos, pero tan solo 24 de ellos contribuyeron a la disminución de la sobreoferta efectivamente, ya que 3,247 vehículos se acogieron a la figura de reposición. Además, los planes vigentes de ajuste de la capacidad transportadora de las empresas, contemplan una reducción de 1,597 vehículos, esto es solo el 17% de la sobreoferta estimada en la ciudad.

Sin embargo, con la implantación del SITP sí se espera generar un impacto considerable en términos de disminución del parque de transporte público. El rediseño de rutas y la integración con Transmilenio, y posteriormente con el metro, apunta a un parque cercano a los 13,000 vehículos, generando un sistema más eficiente, rentable y ambientalmente adecuado. El diseño del SITP contempla la configuración de la flota que se presenta en la Tabla 1.8.

**Tabla 1.8.** Participación de las categorías de transporte público con la implementación del SITP.

Categorías vehiculares de TP	Participación (%) año 2020
Microbus	16%
Buseta	12%
Bus	37%
Padrones	22%
Padrones duales	<1%
Articulados	11%
Biarticulados	2%
TOTAL	100%

FUENTE: SDM, 2009

En resumen, durante este ejercicio se contempló el retiro paulatino del 34.5% de la flota actual de TPC, esto es unos 5,580 vehículos, aunque aunado con un incremento en la flota de Transmilenio del 47%, correspondiente a 506 articulados. Las metas en términos del número de vehículos para cada una de las categorías de TP se exponen en la Tabla 1.9.

**Tabla 1.9.** Cambio en la composición de la flota de transporte público (meta).

Categoría	Código	Combustible	2008	2020	Cambio porcentual <sup>1</sup>
Micro Bus	MBg	Gasolina	1,159	0	-100%
Buses y busetas	B3	Gasolina	476	0	-100%
Buses y busetas	B4	Gasolina	774	0	-100%
Micro Bus	MC	GNV	666	0	-100%
Buses y busetas	B1	ACPM	5,570	1,520	-73%
Buses y busetas	B2	ACPM	3,981	7,279	83%
Microbuses	MB	ACPM	3,542	1,959	-45%
SUBTOTAL TPC			16,168	10,758	-33%
Transmilenio	TM	ACPM	1,070	1,576	47%
TOTAL			17,238	12,334	-28%

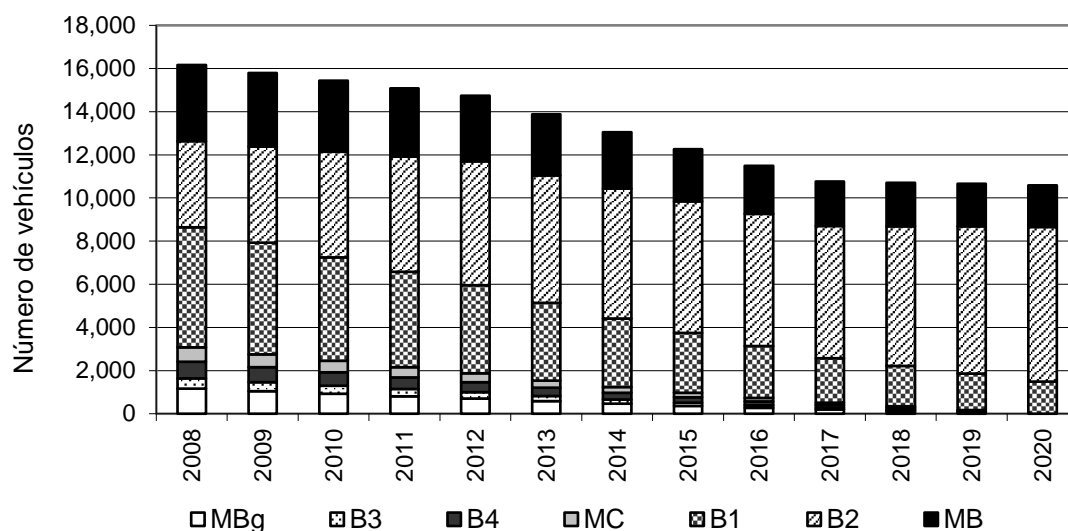
<sup>1</sup>El signo negativo hace referencia a una reducción en el número de vehículos.

La reconfiguración paulatina del parque automotor del transporte público así como la disminución de las fuentes, se presenta en la

2. Para calcular esta proyección se emplearon los parámetros supuestos para los periodos de consolidación del SITP (IPK y participación modal), así como la proyección de los viajes que moverá el transporte público bogotano hasta el año 2020, según la Ecuación 3 (véase una reseña más detallada de las distintas variables en el Anexo 1.3).

$$V_{C,i} = \frac{P_{c,i} \cdot VD_{TPC_i}}{IPK_{TPC_i}} \cdot \frac{1}{FA_{vehículo_i}} \quad \text{Ecuación 3}$$

En donde  $V_C$  representa el número de vehículos de la categoría  $C$  en el año  $i$ ,  $P$  es la participación de la categoría  $c$  en el parque actualizado para el año  $i$ ,  $VD_{TPC}$  es el número de viajes que en el año  $i$  provee el total del parque de buses, y  $FA_{vehículo}$  representa el factor de actividad (en términos de viajes diarios) de cada vehículo de la categoría  $c$ .



MBg: Microbus a gasolina; B3: Buses y Busetas <5,000 c.c. a gasolina; B4: Buses y busetas >5.000 c.c. a gasolina; MC: Microbus a GNV; B1: Buses y busetas < 5,000 c.c.; B2: Buses y busetas > 5,000 c.c.; MB: Microbuses diesel.

**Figura 1.12.** Evolución del tamaño del parque desagregado por categoría vehicular.

Con respecto al esquema de operación zonal propuesto para el SITP, cabe resaltar que este componente tiene una injerencia importante sobre la reducción de las emisiones provenientes de la flota. Esta estrategia, que puede considerarse como una de las herramientas fundamentales para garantizar la reducción de la sobreoferta en el horizonte de implementación del SITP, organizará la ciudad en 13 zonas operacionales (cada una concesionada a una empresa prestadora del servicio) y una zona neutra en el centro expandido de la ciudad; esto con el fin de articular más eficientemente los desplazamientos de los usuarios mediante la integración de varios tipo de rutas (troncales, auxiliares, alimentadoras y complementarias y especiales).

Este nuevo esquema de operación zonal, que se implementará paulatinamente en el tiempo afectará los factores de actividad del parque, en la medida en que reducirá la longitud promedio de las rutas en un 16% (pasando de 54 km a 45 km), según pudo establecerse tras comparar los diseños operacionales de las zonas del SITP con la cifra oficial de la longitud promedio de rutas (CCB, 2009). Para integrar este factor a la proyección del inventario de emisiones anuales, se incorporó en la Ecuación 2 un factor de corrección que representa la disminución anual en la actividad del parque, derivado de la consolidación paulatina de las zonas operacionales.

Por otro lado, la reducción de la sobreoferta no solo implicaría un mejoramiento en la calidad del aire por sí misma, sino también una serie de sinergias importantes que acarrearían beneficios ambientales colaterales, tales como la reducción en el traslapo de rutas, la disminución en los factores de actividad (al aumentar la ocupación de los vehículos, disminuye el número de ciclos y la frecuencia de las rutas), y el aumento de la velocidad media en las vías. En Colombia, por ejemplo, una ocupación media de los vehículos de 300 pasajeros/bus-día está relacionada con 3,500 kilómetros de rutas por cada millón de habitantes y con una velocidad promedio en corredores principales de 10 Km/hr, mientras en algunas ciudades modelo latinoamericanas<sup>5</sup>, una ocupación de 650 pasajeros/bus-día, corresponde a 1,200 kilómetros de rutas por cada millón de habitantes y con 22.5 Km/hr de velocidad promedio (DNP, 2003).

<sup>5</sup> Las ciudades con las que el DNP realizó la comparación, son Buenos Aires, Recife, Curitiba y Sao Pablo.



## *b. Énfasis en el control de la edad vehicular*

A pesar de que la gestión sobre el número de fuentes de emisión puede tener repercusiones directas sobre la calidad del aire, el envejecimiento paulatino del parque podría limitar el beneficio ambiental obtenido en un principio. Esto se debe a que una de las variables que afecta el valor de los factores de emisión es el modelo de los vehículos, el cual es un indicador del desgaste mecánico del mismo (por el kilometraje recorrido durante toda su vida útil) que reduce a su vez en una pérdida de eficiencia y, por ende, en un aumento de las emisiones.

Aparte de un menor kilometraje, los modelos más recientes tienen también innovaciones técnico-mecánicas derivadas del desarrollo de la industria automotriz, que hacen más eficientes los vehículos al mismo tiempo que menos contaminantes. Entre dichas innovaciones, impulsadas habitualmente por legislaciones estrictas como las de la Unión Europea y Estados Unidos, pueden encontrarse los sistemas de inyección de combustible, los sistemas de refrigeración y los sistemas de control de emisiones, cuya injerencia sobre los FE será objeto de disertaciones más adelante en este documento.

Así pues, de forma paralela a la estrategia de disminución de la sobreoferta en el marco del SITP se debe garantizar que la flota de TPC remanente tenga una edad promedio baja que garantice un mejoramiento en el factor de emisión promedio de la flota. Por esta razón se podría plantear como un escenario deseable que los 5,600 vehículos que se requiere sacar de circulación para cumplir con las metas del SITP sean los más viejos del parque. Por ejemplo, si se garantizara la ejecución de esta estrategia en el primer año de implementación del PDDb, la edad promedio del parque automotor pasaría de cerca de 11 años a casi 7 años, que a su vez se traduciría en una reducción de los factores de emisión de PM, para el caso de la categoría B2 (buses con motor mayor a 5,000 cc) significaría una reducción de alrededor del 50%.

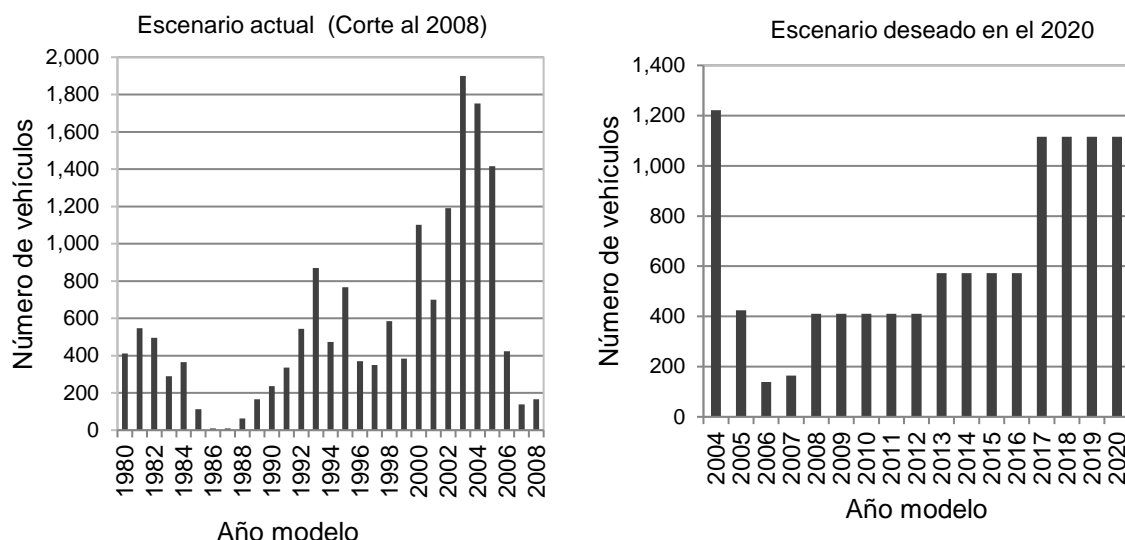
Sin embargo, debido al horizonte de implementación del plan de descontaminación, es imposible desconocer que la edad promedio del parque es variable y depende de las tasas de chatarrización y adquisición de vehículos nuevos a lo largo del decenio. Estas tasas fueron calculadas con base en los siguientes supuestos:

- Todos los vehículos de transporte público tienen un factor de actividad similar (km/año) que no depende de su edad, por lo que el año del modelo es un indicador fiable para estimar el deterioro del factor de emisión debido a los kilómetros recorridos.
- No existen fuentes oficiales que definan la tasa de chatarrización natural<sup>6</sup> de la flota, por lo que ésta se asume implícita al valor de la tasa calculada según las metas de edad promedio definidas para los distintos periodos del plan.
- Existe una tasa de chatarrización asociada a la reconfiguración de la flota propuesta para la implementación del SITP, sin embargo no está asociada a una política de renovación a lo largo del decenio que de no implementarse implicaría que en el año 2020 la ciudad podría tener una flota de TPC con una edad promedio superior a los 15 años.
- Las metas concernientes a la edad promedio de la flota son de 10 años para el 2012, 9 para el 2017 y 7 para el 2020. Estas metas podrían ser más estrictas si en su fijación se incluye un análisis de la capacidad financiera de las empresas transportadoras y del Distrito para promover la política de renovación.

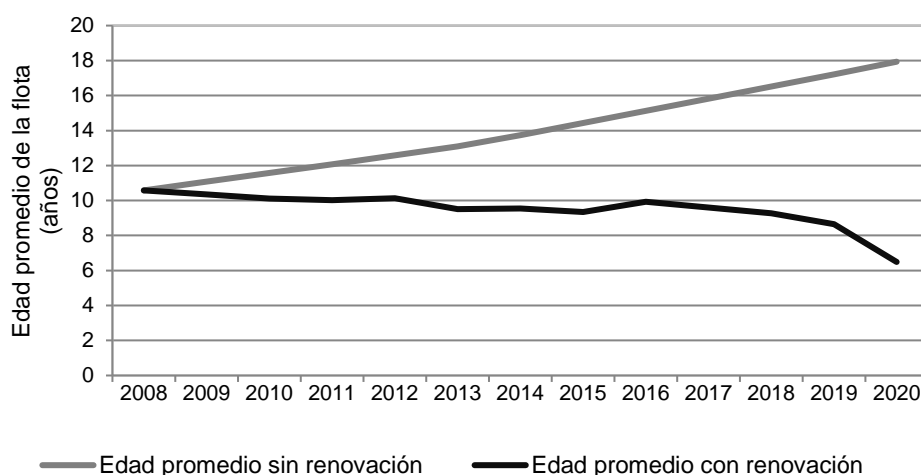
---

<sup>6</sup> Este tipo de chatarrización se refiere a la que está sometida a las dinámicas del mercado del transporte, la cual implica que cuando un vehículo se vuelve obsoleto y no representa un activo productivo para su propietario, es descartado. Por su parte las tasa de chatarrización "forzadas" son derivadas de políticas de renovación de la flotas, aún cuando el vehículo puede ser rentable para los prestadores del servicio.

En la **Error! Reference source not found.13** se presenta la distribución actual de las edades de la flota de TPC en comparación con la distribución deseada para el año 2020. Por su parte, en la **Error! Reference source not found.4** se expone el comportamiento de la edad promedio del parque derivada de las tasas de chatarrización anuales (TC) y las tasas de ingreso de nuevos vehículos (TI) contempladas en el análisis (ver Anexo 1.5).



**Figura 1.13.** Contraste entre las frecuencias de modelos vehiculares para la flota de TPC.



**Figura 1.14.** Proyecciones de la edad promedio de la flota según esquema de renovación.

Con el fin de estimar las reducciones anuales que se obtendrían con la renovación continua de la flota, se modificaron los factores de emisión validados para este estudio. Se generaron factores de corrección según los factores de emisión de la base de datos integrada al modelo MOBILE 6, desarrollado por la EPA (2003) y validado en el modelo IVE. Una vez hechos los ajustes pertinentes de los factores de emisión base, se calcularon los factores de corrección y los nuevos factores de emisión anuales a partir de la Ecuación 4.

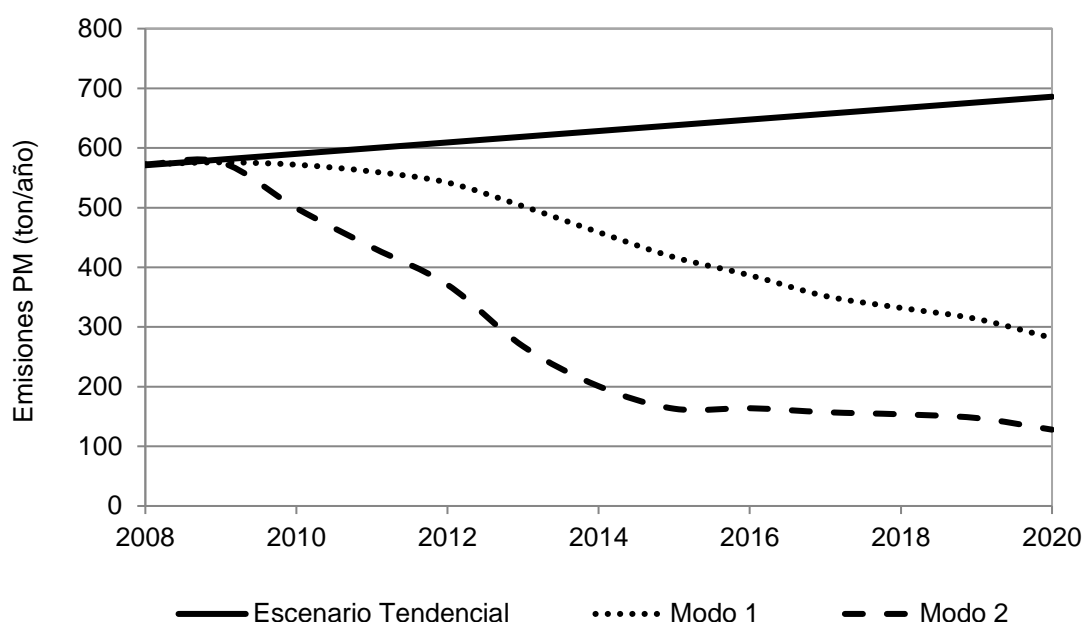
$$\overline{FE}_C = \sum \frac{n_m}{N} \cdot (V_m \cdot FE_{C_{\text{Linea Base}}})$$

Ecuación 4

En donde  $n_m$  corresponde al número de vehículos de la categoría  $C$  de modelo  $m$ ,  $N$  es el número total de vehículos de la categoría  $C$ , y  $\gamma_m$  representa el factor de corrección para el modelo  $m$  de la categoría  $C$ .

#### 4.1.2. Beneficios Ambientales de la Implementación del SITP

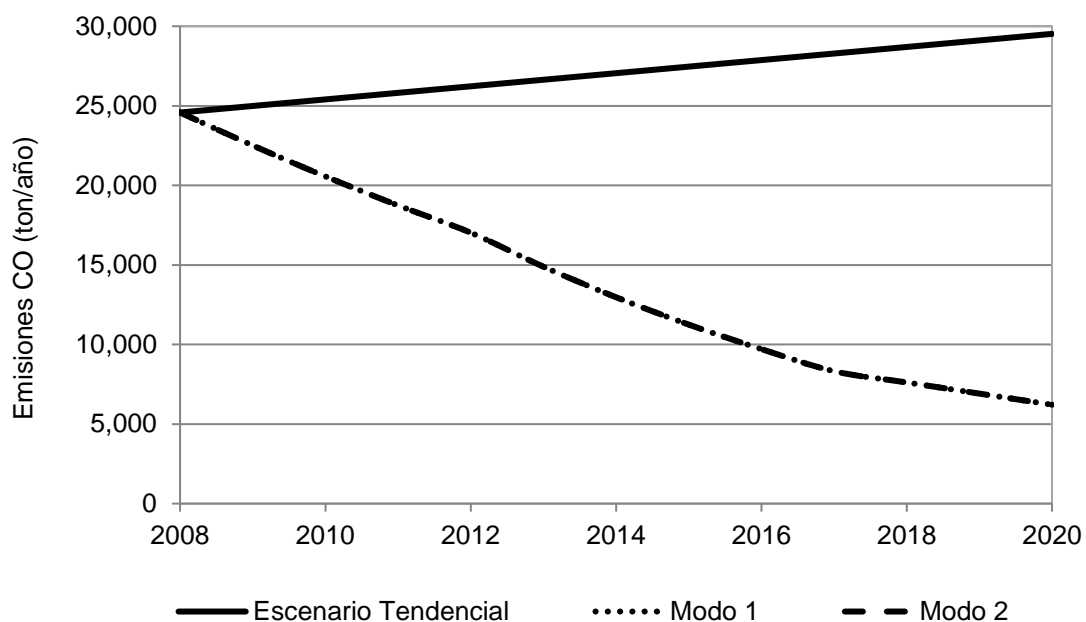
En las figuras 1.15 a 1.19 se muestran los beneficios derivados de la implementación del SITP. Sin embargo, solo la Figura 1.15 reseña los dos modos de la medida expuesta con anterioridad, ya que los beneficios derivados del esquema propuesto en el modo 2 solo fueron calculados para material particulado, por ser el contaminante de mayor impacto sobre la salud pública. Vale la pena aclarar también, que las series de tiempo rotuladas como "Escenario tendencial" no contemplan la ampliación del sistema Transmilenio, por lo que la proyección de las emisiones parte del supuesto de que la distribución modal del transporte público se mantendrá constante a partir del 2008 y hasta que finalice el decenio en cuestión.



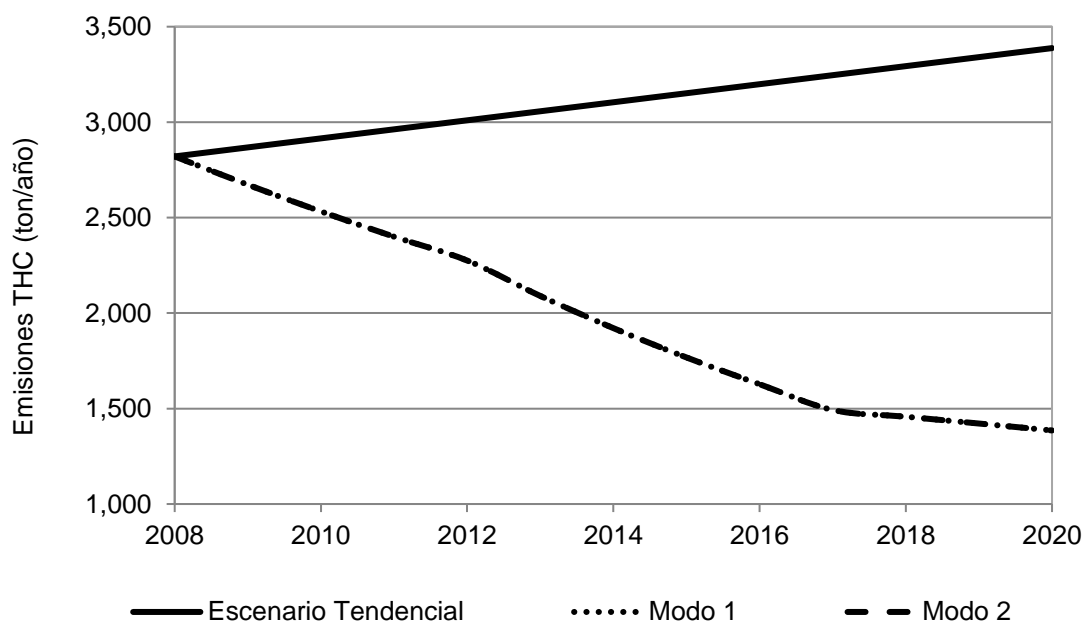
**Figura 1.15.** Proyecciones de las emisiones de PM tras la implementación del SITP.

El crecimiento de las emisiones en el escenario tendencial se debe al aumento en el número de viajes totales y, por ende, en el número de fuentes (bajo el supuesto de que el indicador de eficiencia IPK, se mantiene constante en el lapso estudiado). Por su parte, la disminución de las emisiones derivadas de la implementación de esta medida en sus modos 1 y 2 tiene dos causas principales: 1) El retiro paulatino de las fuentes en concordancia con el diseño operativo del SITP, y 2) por el mejoramiento de los factores de emisión debido a la incorporación a la flota de vehículos más modernos.

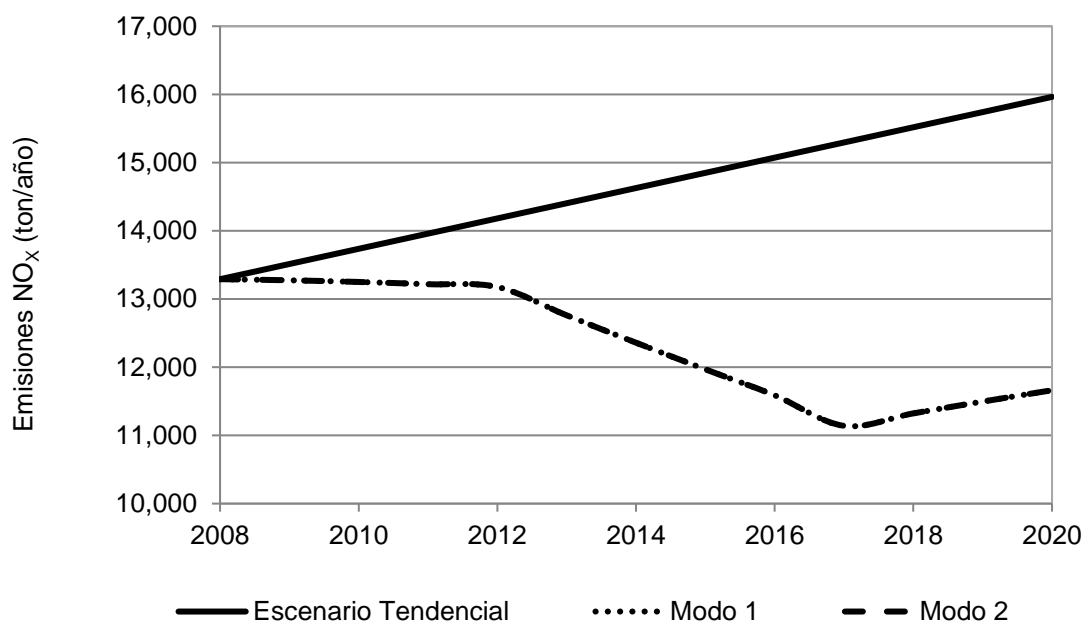
La brecha entre los modos 1 y 2 se debe principalmente a que en el segundo el cambio en los factores de emisión es más acelerado debido a un programa de renovación continua de la flota, mientras que en la primera solo serían retirados los vehículos más viejos del parque, sin que esto repercuta sobre la modernización de los vehículos remanentes.



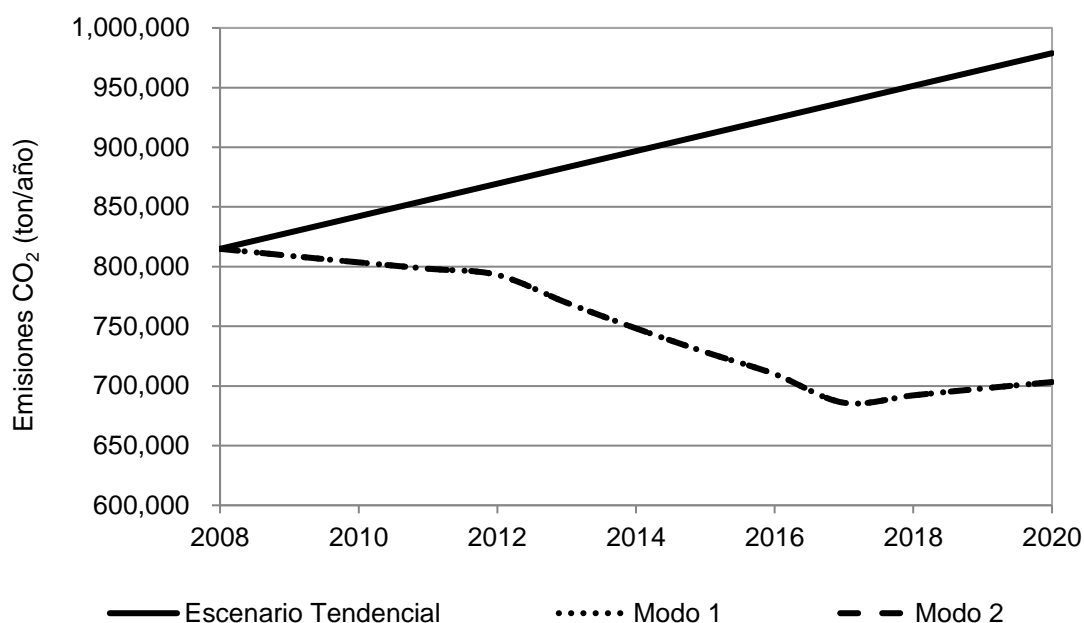
**Figura 1.16.** Proyecciones de las emisiones de CO tras la implementación del SITP.



**Figura 1.17.** Proyecciones de las emisiones de THC tras la implementación del SITP.



**Figura 1.18.** Proyecciones de las emisiones de NO<sub>x</sub> tras la implementación del SITP.



**Figura 1.19.** Proyecciones de las emisiones de CO<sub>2</sub> tras la implementación del SITP.

Por otro lado, los beneficios mencionados corresponden específicamente a la gestión que se haga sobre los vehículos que prestan el servicio de transporte público, por lo que es pertinente mencionar los efectos que tendrá el SITP sobre las emisiones del transporte masivo (Transmilenio). Al respecto, en la Tabla 1.10 se presenta la evolución de distintos parámetros que definen el sistema de transporte masivo, bajo el supuesto de que en todos los escenarios el factor de emisión de PM para este tipo de vehículos es constante. En el Modo 1 de implementación del SITP, Transmilenio podría llegar a aportar el 65% de las emisiones de PM del transporte público de Bogotá, aunque el inventario de este contaminante solo llegaría a las 280 toneladas anuales, cuando en el escenario tendencial se podría alcanzar 640 toneladas.

**Tabla 1.10.** Participación de Transmilenio en los escenarios propuestos tras la implementación del SITP.

Escenario	Variable	2008	2012	2016	2020
Tendencial	Viajes diarios aprox.	1,660,000	1,770,000	1,882,000	1,993,000
	FA (Km/día)	325,312	347,125	368,937	390,750
	PM - TM (ton/año)	35	37	40	42
	PM -TPC (ton/año)	540	570	610	640
	Participación (%)*	6%	6%	6%	6%
SITP	Viajes diarios aprox.	1,660,000	2,415,000	3,729,000	3,623,000
	FA (Km/día)	325,312	473,352	731,167	772,926
	PM-TM (ton/año)	35	50	79	83
	Modo 1	PM-TPC (ton/año)	538	491	308
		Participación (%)	6.11%	9.39%	20.32%
	Modo 2	PM-TPC (ton/año)	538	320	85
		Participación	6.11%	13.73%	47.97%

FA: Factor de actividad; PM-TM: Emisiones de PM provenientes de Transmilenio; PM-TPC: Emisiones de PM provenientes del transporte público colectivo (excluye el transporte masivo).

\* "Participación" se refiere a la comparación de las emisiones de TransMilenio con las emisiones totales de la flota de transporte público.

#### 4.1.3. Herramientas Institucionales Requeridas

El mejoramiento de la eficiencia del sistema de transporte público a través del SITP cuenta con las bases jurídicas e institucionales adecuadas para llevarse a cabo. Adicionalmente a la definición planteada en el Decreto 319 de 2006 que adopta el Plan Maestro de Movilidad, la estructura y principales componentes del SITP han sido detallados en el Decreto 309 de 2009. Es así como el SITP cuenta ya con diseños detallados y se encuentra en proceso de adjudicación de 13 zonas que estarán a cargo de igual número de empresas. Se alista así mismo la licitación del sistema integrado de recaudo.

Sin embargo, aunque la base del SITP ya ha sido establecida, y su implementación permitiría obtener los beneficios ambientales que aportaría la reducción de flota y su renovación, aún no se garantizan beneficios adicionales por mayores exigencias ambientales que podrían solicitarse a los vehículos que operen en el sistema, ni un aumento hasta el 50% de viajes realizados en Transmilenio y metro. Esto requeriría probablemente de la expansión del sistema Transmilenio a partir del año 2015.

De acuerdo con el marco jurídico establecido, será Transmilenio S.A. el encargado de la gestión del SITP. Se considera conveniente revisar las exigencias que plantean los pliegos y el contrato en términos de desempeño ambiental de los vehículos y características de operación. Se considera necesario que las decisiones sobre el SITP y su control tengan un fuerte componente ambiental. Los resultados mostrados en esta sección demuestran que pueden obtenerse mejoras ambientales significativas con la inclusión de la medida en cualquiera de sus modos, y como se presentará más adelante en este informe medidas como el uso de sistemas de control de emisiones para la flota que entra a ser parte del SITP maximizan los beneficios ambientales de dicho sistema.

#### 4.1.4. Costos

Los costos directos en los que incurriría la ciudad para la ejecución de este proyecto están asociados a la adquisición de nuevos vehículos y a la compra de los vehículos que sean objeto del esquema de chatarrización propuesto. Para este caso en particular no se incluirán los costos de operación y mantenimiento de los vehículos, debido a que estos

rubros deben ser asumidos por las empresas prestadoras del servicio y no deben ser considerados como un costo adicional generado por el PDDB.

Algunas consideraciones que se tuvieron en cuenta en el proceso de estimación de costos son las siguientes:

- A pesar de que para el inventario de emisiones los buses padrones y los padrones duales se integraron a la categoría B2, ya que cumplen con el criterio de clasificación definido, esta categoría se desagregó en la estimación de costos.
- El modelo de renovación propuesto a lo largo del decenio supone que se adquieren vehículos de las diferentes categorías en la misma proporción en la que está compuesta la flota.
- Aunque la tasa de chatarrización usada en este estudio incluye la tasa de chatarrización natural del parque, es la primera quien define los vehículos que serán adquiridos por el Distrito dentro del programa de chatarrización.
- Los costos unitarios de compra de vehículos corresponden a los establecidos en el mercado nacional, mientras que aquellos definidos para la adquisición de vehículos obsoletos, sujetos al programa de chatarrización, fueron obtenidos de los antecedentes de los esquemas de chatarrización implementados en Bogotá. En estos programas el Distrito ha pagado un promedio de \$40 millones por vehículo.

En las tabla 1.Tabla 1.111 se presentan los costos estimados para todo el horizonte del plan, en precios constantes del año 2009, tanto para la compra de vehículos nuevos como para la adquisición de vehículos en el proceso de chatarrización.

**Tabla 1.11.** Costos del proyecto derivados de la adquisición y chatarrización de vehículos.

Rubro	Costo unitario [\$ M]	SITP - Modo 1		SITP - Modo 2	
		N° de vehículos	Costo total [\$MM]	N° de vehículos	Costo total [\$MM]
Chatarrizados para reajuste	40*	5,576	223	5,576	223
Vehículos nuevos	130**	0	0	7,986	1,038
Chatarrizados netos	NA	5,576	NA	11,380	NA
TOTAL			223	TOTAL	1,261

\* El costo reseñado acá está basado en los datos reportados por la Contraloría de Bogotá.

\*\* Este costo corresponde al precio medio de los vehículos nuevos, entendiendo que los precios en el mercado pueden fluctuar entre los \$100 y los \$150 millones dependiendo de las características del automotor. Este rango fue corroborado con información provista por Buscar S.A.

De esta forma, para el primer enfoque (reconfiguración de la flota sin renovación permanente) se obtendrían unos costos globales de 223 mil millones de pesos aproximadamente, con un potencial de reducción de hasta 2,200 toneladas de PM a lo largo del decenio, mientras que adoptando el segundo enfoque (reconfiguración de la flota con programa de renovación continua del TPC) el proyecto costaría alrededor de 1.3 billones de pesos con un potencial de reducción de 4,000 toneladas de PM. En la Tabla 1.12 se presentan los costos por unidad de tonelada de PM reducida.

**Tabla 1.12.** Costo por unidad de PM reducida.

Modo de implementación	Costo por tonelada de PM (millones de pesos/ton PM)
Modo 1	101
Modo 2	311

Sin embargo, es importante destacar que este proyecto tiene otros beneficios considerables desde el punto de vista de la política de transporte tales como los ahorros en tiempo de los bogotanos. El aspecto ambiental se considera usualmente como beneficio colateral más no como un objetivo primordial de este tipo de medidas, por lo que buena parte de los gastos en los que incurriría la ciudad serían gestionados a través del arreglo institucional liderado por la Secretaría de Movilidad. Siendo así, solo una parte menor del costo del SITP debería incluirse como un costo directo del plan de descontaminación.

#### 4.2. Instalación de Sistemas de Control de Emisiones

A diferencia del proyecto anterior a través del cual se pretende reducir el número de fuentes y modificar los factores de actividad con una operación que es acorde a los términos del contrato de la concesión del SITP, el propósito de la medida descrita en esta parte del documento representa un esfuerzo adicional y cuyo objeto es mejorar los factores de emisión mediante la implantación de tecnologías de control de emisiones (SCE). Estas mejoras se estimaron haciendo uso de la Ecuación 5.

$$FE_{\text{corregido}} = (K_{TCE} \cdot K_{CML}) \cdot FE_{\text{original}} \quad \text{Ecuación 5}$$

En donde  $K_{TCE}$ , corresponde al factor de corrección derivado de la instalación de tecnologías de control de emisiones y  $K_{CML}$  representa el factor correspondiente al uso de combustibles más limpios.

Actualmente, existen varias tecnologías viables (desde el punto de vista de su costo-eficiencia y aplicabilidad) para el control de emisiones provenientes de la operación de motores diésel. Sin embargo, aún existen algunas barreras técnicas y económicas para reducir simultáneamente PM y NOx, razón por la cual el análisis del contexto de calidad del aire bogotano es indispensable para elegir la tecnología más apropiada entre las que ofrece el mercado.

En la

Tabla 1.131.13 se exponen los sistemas de control más recomendables según la experiencia internacional, con los rangos de reducción de emisiones garantizados por los proveedores, los costos aproximados de adquisición y los requerimientos en términos del contenido de azufre en el ACPM, variable fundamental al momento de analizar la viabilidad de implementación de este tipo de sistemas.



**Tabla 1.13.** Características de los sistemas de control de emisiones propuestos para vehículos diésel.

Sistema de Control	Reducción en emisiones			Costos unitarios [\$M*]	Contenido de azufre requerido (ppm)
	THC	PM	NOx		
Catalizador oxidativo para vehículos diesel (DOC)	50-90%	25-50%	-	1 - 4	500
Filtro activo de partículas para vehículos Diesel (a-DPF)	50-95%	>85%	-	15 - 21	15**
Filtro pasivo de partículas para vehículos diesel (p-DPF)	50-95%	>85%	-	31 - 63	500
Filtro de paso (FTF)	50-95%	30-60%		10 - 15	500
Catalizador para NOx integrado a un DPF (LNC + DPF)	-	>85%	5-30%	31 - 42	15**
Sistema de reducción con catálisis selectiva (SCR)	80%	20-30%	80%	38 - 63	500
Sistema de recirculación de gases de escape, integrado con un DPF (EGR + DPF)	-	>85%	40-50%	38 - 42	15**
Control de emisiones en el cárter	-	5-10 %	-	1 - 2	500

Fuente: MECA, 2009.

\*\$M: Millones de pesos.

\*\* Los proveedores de estos sistemas de control aconsejan usarlos si los vehículos emplean ULSD (Ultra Low Sulfur Diesel). Un combustible con 50 ppm podría ser catalogado como ULSD y podría permitir la operación de estos sistemas pero con eficiencias menores, por lo cual se aconseja que el contenido de azufre en el mismo sea inferior a 15 ppm para obtener las eficiencias reseñadas.

Nótese que entre las tecnologías reseñadas en la

Tabla 1.131.13, las más eficientes son aquellas que requieren que el mercado local le provea al parque automotor un diesel con bajo contenido de azufre.

Por su parte, los amplios rangos de los costos reseñados se deben a su dependencia del tamaño de los motores, los volúmenes de venta, el tipo de instalación (si se aplica a un vehículo en uso, o directamente en una línea de ensamblaje de vehículos nuevos) y las reducciones necesarias según el factor de emisión base del vehículo en el que se pretenda instalar.

En la valoración de los beneficios ambientales de la presente medida se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se usaron los porcentajes de reducción medios para cada uno de los sistemas evaluados, teniendo en cuenta los valores máximos y mínimos reportados por los proveedores de las tecnologías.
- Se supuso que la instalación de los sistemas de control de emisiones se llevará a cabo de manera paulatina, durante 5 años. Por ende cada año se le instalarían sistemas a un 20% del parque.
- La eficiencia de remoción de los sistemas de control no varía en el horizonte de tiempo del plan decenal de descontaminación.

#### *4.2.1. Modos de Implementación*

Se evaluó el efecto de la implementación de los siguientes sistemas que se mencionan a continuación.

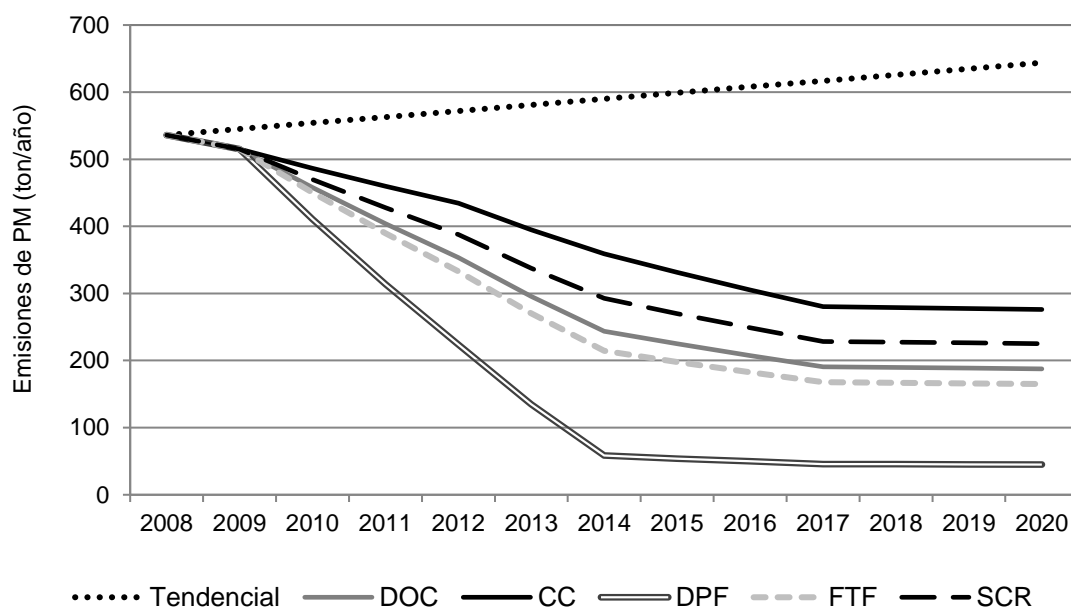
- 
- Modo 1: Instalar catalizadores oxidativos (DOC) en todos los vehículos de la flota de transporte público y aquellos que entran al SITP, según el escenario de evaluación.
- Modo 2: Instalar sistemas de control de emisiones del cárter en todos los vehículos de la flota de transporte público y aquellos que entran al SITP, según el escenario de evaluación.
- Modo 3: Instalar filtros de partículas para diésel (DPF) en todos los vehículos de la flota de transporte público y aquellos que entran al SITP según el escenario de evaluación.
- Modo 4: Instalar filtros de paso (FTF) en todos los vehículos de la flota de transporte público y aquellos que entran al SITP, según el escenario de evaluación.
- Modo 5: Instalar sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR) en todos los vehículos de la flota de transporte público y aquellos que entran al SITP, según el escenario de evaluación.

Adicionalmente, para cada sistema de control de emisiones se evaluaron dos posibles escenarios:

- SCE 1: El número de fuentes (vehículos) pertenecientes a la flota de transporte público crece según lo estimado bajo el escenario tendencial (en donde no hay SITP).
- SCE 2: La instalación de los sistemas de control se hará de manera paralela a la puesta en marcha del SITP, es decir, solo se instalarán SCE a los vehículos que entren a formar parte del esquema de operación del SITP.

#### *4.2.2. Beneficios Ambientales*

En las figuras 1.20 y 1.21 se presentan las proyecciones de las emisiones de PM bajo los dos escenarios (SCE1 y SCE2) y para las diferentes opciones de los sistemas de control de emisiones. Estos resultados hacen referencia exclusiva al sector de transporte público.

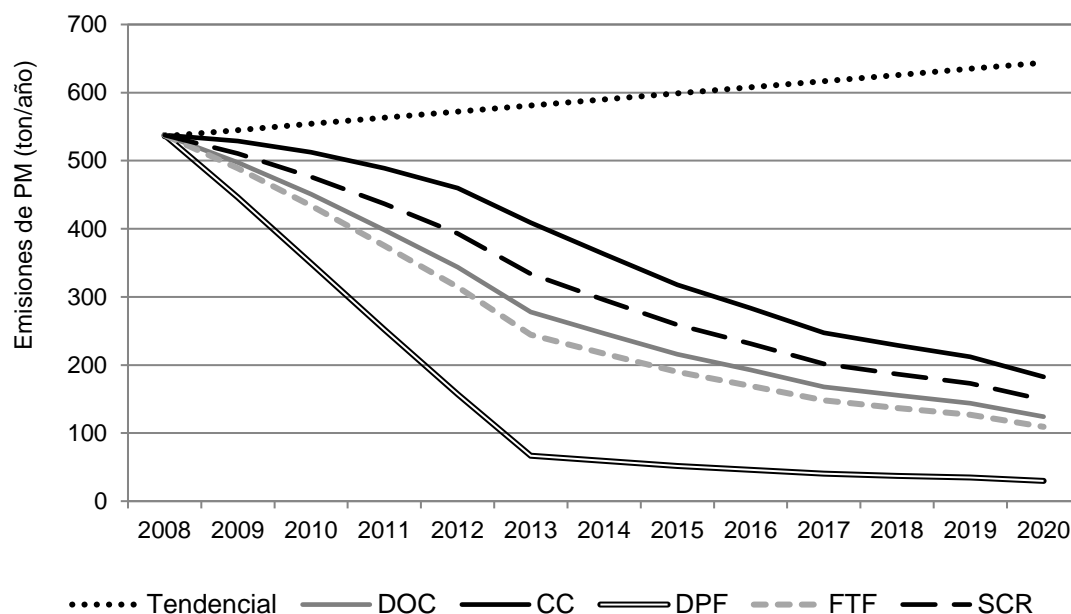


DOC: Catalizador oxidativo para vehículos diesel; CC: Control de emisiones en el cárter; DPF: Filtro de partículas para vehículos diésel (en este caso corresponde a filtros pasivos, los cuales son menos restrictivos para el contenido de azufre); FTF: Filtros de paso; SCR: Sistemas de reducción con catálisis reductiva.

**Figura 1.20.** Proyección de las emisiones de PM de la flota de TPC para la medida SCE1 (sin SITP) en sus 5 modos.

La diferencia entre los comportamientos de las series de tiempo en esta figura se explica por la brecha entre las eficiencias de remoción de PM dadas las tecnologías con las que contarían los vehículos.

Por otro lado, el cambio en la pendiente de las series obedece a la finalización de los periodos de implementación de la medida. Mientras que en los primeros 5 años del decenio la disminución en las emisiones de PM son aceleradas, en la última mitad el inventario de emisiones tiende a estabilizarse bajo el supuesto de que todas las fuentes han alcanzado sus factores de emisión deseables (de hecho puede existir un ligero incremento en las mismas, derivado del incremento en el número de viajes totales que deberá movilizar la ciudad).



DOC: Catalizador oxidativo para vehículos diesel; CC: Control de emisiones en el cárter; DPF: Filtro de partículas para vehículos diésel (en este caso corresponde a filtros pasivos, los cuales son menos restrictivos para el contenido de azufre); FTF: Filtros de paso; SCR: Sistemas de reducción con catálisis reductiva.

**Figura 1.21.** Proyección de las emisiones de PM de la flota de TPC para la medida SCE2 (considerando SITP) en sus 5 modos.

En la Tabla 1.144 se presentan las reducciones en las emisiones para los tres contaminantes afectados por las tecnologías de control respecto a las emisiones de este mismo sector en el escenario tendencial. Es evidente que el único sistema de control que reduce simultáneamente NOx y PM (el SCR) presenta beneficios menores que las otras tecnologías en términos de éste último contaminante, al mismo tiempo que implica unos costos de implementación más elevados.

Teniendo en cuenta la preponderancia del material particulado y los requerimientos en términos de azufre para las tecnologías de control de NOx, es aconsejable diseñar una estrategia en la cual se promueva la implementación prioritaria de las tecnologías de control de PM (DPF, FTP y DOC) que podría ser complementada con sistemas LNC, SCR y EGR.

**Tabla 1.14.** Reducción porcentual en el inventario acumulado de emisiones de transporte público respecto al escenario tendencial.

Tecnología	Instalación de SCE sin SITP (SCE1)			Instalación de SCE con SITP (SCE2)		
	THC	PM	NOx	THC	PM	NOx
DOC	58%	41%	-	60%	42%	-
DPF	58%	60%	-	60%	60%	-
FTF	58%	44%	-	60%	44%	-
SCR	62%	36%	26%	64%	37%	54%
CC	-	30%	-	-	31%	-

DOC: Catalizador oxidativo para vehículos diesel; CC: Control de emisiones en el Carter; DPF: Filtro de partículas para vehículos diesel (en este caso corresponde a filtros pasivos, los cuales son menos restrictivos para el contenido de azufre); FTF: Filtros de paso; SCR: Sistemas de reducción con catálisis reductiva.

\* Con "inventario acumulado de emisiones" se hace referencia a la suma de las toneladas anuales emitidas a lo largo del decenio, según las proyecciones calculadas.

Por otro lado, es necesario hacer hincapié en una de las tecnologías listadas: el control de emisiones en el cárter. La implementación de esta tecnología puede no tener impactos notables en la concentración ambiente de la ciudad, por cuanto no implica una reducción muy importante del inventario de emisiones, pero goza de un par de ventajas comparativas que pueden hacerla atractiva: es la medida de más bajo costo y es útil para reducir los fenómenos de auto-contaminación al interior de los vehículos de transporte colectivo. De hecho, es aconsejada por la EPA y se ha aplicado ampliamente a través de programas de mejoramiento de buses escolares.

De esta forma es aconsejable diseñar una política que permita instalar sistemas de control de emisiones en el cárter en los vehículos de transporte colectivo privados, en especial en los escolares. Estas tecnologías pueden disminuir notablemente los niveles de exposición de las personas en edad escolar.

En la Tabla 1.15 se presenta el beneficio de la medida en términos de reducción de la concentración de PM en el año 2020 en la ciudad con la implementación de la medida en comparación con la concentración que se tendría en el escenario tendencial.

**Tabla 1.15.** Reducción en los niveles de concentración de PM en el año 2020 respecto al escenario tendencial.

Modo	Reducción en la concentración de PM año 2020	
	SCE 1	SCE2
DOC	3%	8%
CC	<1%	7%
DPF	8%	9%
FTF	4%	8%
SCR	2%	7%

DOC: Catalizador oxidativo para vehículos diesel; CC: Control de emisiones en el Carter; DPF: Filtro de partículas para vehículos diesel (en este caso corresponde a filtros pasivos, los cuales son menos restrictivos para el contenido de azufre); FTF: Filtros de paso; SCR: Sistemas de reducción con catálisis reductiva.

#### 4.2.3. Herramientas Institucionales Requeridas

La experiencia internacional demuestra que una de las herramientas fundamentales para garantizar la reducción de las emisiones provenientes de fuentes móviles, es el establecimiento de normas específicas para los factores de emisión. Esta es la filosofía de normas como las Euro (aplicables para la Comunidad Europea), las Tier (establecidas por la EPA) y las Nation (fijadas en China), las cuales definen los factores de emisión máximos permisibles para las diferentes categorías vehiculares, al mismo tiempo que los lapsos de implementación. De esta forma se crea un nicho en el mercado de sistemas de control de emisiones, se promueve el desarrollo y la investigación tendientes a generar tecnologías más eficientes, y se impulsa el sector automotriz hacia la producción de vehículos más limpios.

En Colombia la Resolución 910 de 2008 expedida por el MAVDT define este tipo de umbrales, pero no establece las herramientas de gestión necesarias para cumplir con los factores de emisión fijados como permisibles. En este sentido el MAVDT se ha comprometido recientemente con la implementación de tecnologías de control de emisiones alineadas con la norma Euro IV, obedeciendo a los requerimientos de esta Resolución. Según un comunicado del pasado 13 de febrero del 2010, “esta medida se aplicará a todos

los buses, busetas y colectivos convencionales nuevos que se vinculen a la prestación del servicio público de transporte de pasajeros en Bogotá D.C. a partir del 1 de julio de 2010”.

Sin embargo, esta norma contiene un vacío jurídico al obligar únicamente a los vehículos que se ensamblen o importen a partir del 2010 a cumplir con los estándares de emisión, quedando todo el parque automotor usado eximido de la obligación de implementar medidas tendientes a disminuir sus emisiones mediante el uso de las tecnologías aquí discutidas (por eso el compromiso del MAVDT se restringe a los vehículos nuevos que eventualmente entren a operar como consecuencia del SITP). Por esta razón es recomendable establecer esquemas regulatorios más estrictos y que logren imponer responsabilidades para todos los propietarios de vehículos, tanto de transporte público como privado.

#### 4.2.4. Costos

En la Tabla 1.16 se presentan los costos totales estimados para los diferentes sistemas de control de emisiones bajo los dos escenarios analizados. Los costos de inversión para esta medida a lo largo del decenio pueden variar entre alrededor de \$4,000 millones y \$880,000 millones dependiendo del escenario de implementación y el sistema de control de emisiones seleccionado, esto es equivalente a un costo entre 2 y 300 millones de pesos por tonelada de PM reducida (ver Tabla 1.17).

**Tabla 1.16.** Costos totales.

Sistema de control	Costo total (millones de pesos)	
	SCE1	SCE2
Modo 1 (DOC)	44,000	5,500
Modo 2 (CC)	30,000	3,300
Modo 3 (DPF)	775,000	110,000
Modo 4 (FTF)	215,000	29,000
Modo 5 (SCR)	880,000	110,000

DOC: Catalizador oxidativo para vehículos diesel; CC: Control de emisiones en el cárter; DPF: Filtro de partículas para vehículos diésel (en este caso corresponde a filtros pasivos); FTF: Filtros de paso; SCR: Sistemas de reducción con catálisis reductiva.

**Tabla 1.17.** Costo por tonelada de PM reducida.

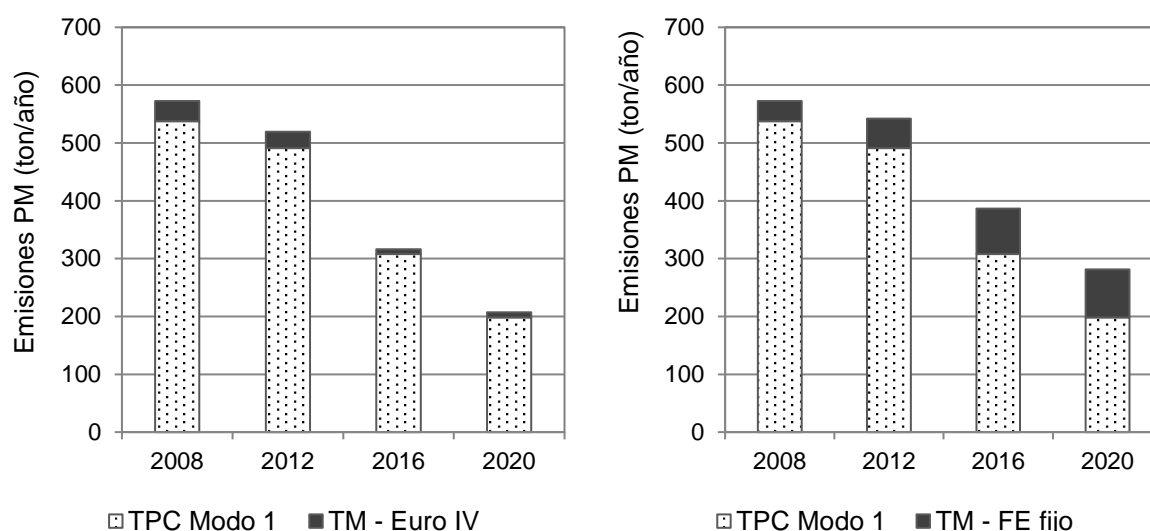
Modo de implementación	Costo por tonelada de PM (millones de pesos/ton PM)	
	SCE1	SCE2
Modo 1 (DOC)	13	1.6
Modo 2 (CC)	12	1.3
Modo 3 (DPF)	159	22.6
Modo 4 (FTF)	60	8.1
Modo 5 (SCR)	297	37.1

DOC: Catalizador oxidativo para vehículos diesel; CC: Control de emisiones en el cárter; DPF: Filtro de partículas para vehículos diésel (en este caso corresponde a filtros pasivos); FTF: Filtros de paso; SCR: Sistemas de reducción con catálisis reductiva.

Esta estimación no contempla la reducción de costos derivada de la importación y ensamblaje de vehículos que ya cumplan con estándares de emisión, pues esta inversión estaría ya incluida en los cálculos correspondientes a la adquisición de nuevos vehículos reseñada en la medida de disminución de la edad promedio de la flota. Es importante mencionar que el perfil de costos de la medida también depende del año en el que se empiece a implementar, siendo este parámetro más importante para el análisis del escenario SCE2. Estas variaciones fueron incluidas en el diseño metodológico del proceso de optimización (ver Sección 3 del Documento de Trabajo).

#### 4.2.5. Implicaciones de la Norma Euro IV en las Emisiones de Transmilenio.

Tal como se mostró en la Tabla 1.100, una vez se encuentre totalmente implementado el SITP, el sistema TM pasará a ser el de mayor aporte al inventario de emisiones de PM en la ciudad. De esta forma, la medida de instalación de SCE debe ampliarse en algún momento a las fases de TM que se encuentran actualmente en operación.

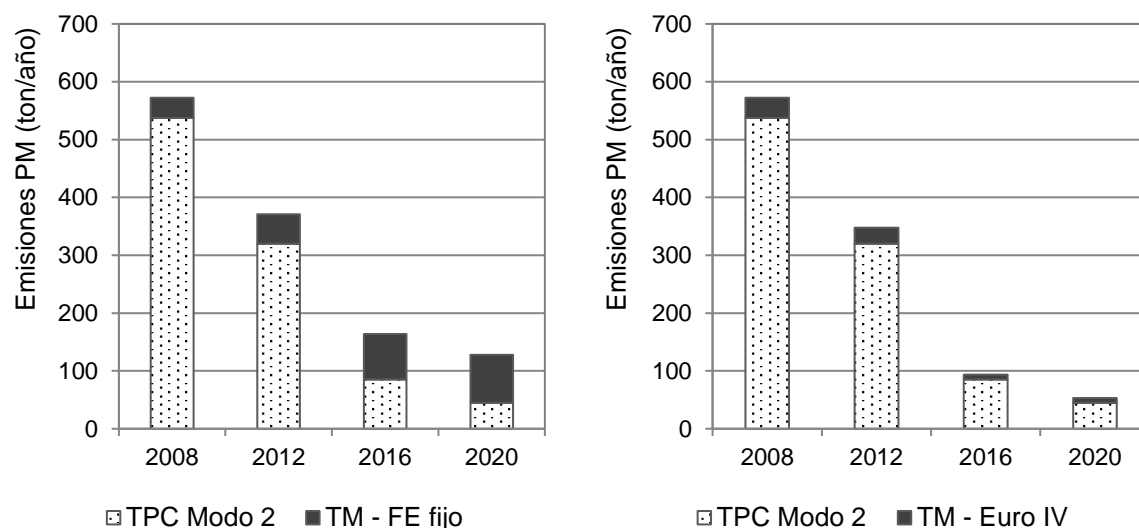


TP: Transporte público; TPC: Transporte público colectivo (no incluye Transmilenio); TM: Transporte masivo; FE fijo: Factor de emisión constante a lo largo del decenio con un valor de 0.29 g/km; Euro IV: Mejoramiento progresivo del FE actual hasta que en el 2016 se alcanza un estándar de 0.03 g/km; Modo 1: Implementación del SITP con reducción de sobreoferta como prioridad; Modo 2: Implementación de SITP con reducción de sobreoferta y control permanente de la edad promedio de la flota.

**Figura 1.22.** Comparación de las emisiones de PM del parque de transporte público en el marco del SITP – Modo 1.

En particular, se deben hacer los esfuerzos necesarios para que para el 2016, todos los vehículos del sistema TM tengan un factor de emisión de PM que corresponda al límite fijado por la norma Euro IV ( $0.03 \text{ g km}^{-1}$  de PM; Kousoulidou, 2008). Actualmente solo existen 9 buses articulados de los 1,135 que con los que actualmente cuenta el sistema, que tienen instalados sistemas SCR (tecnología recomendada para cumplir con Euro VI).

En las figuras 1.22 y 1.23 se comparan los escenarios en los que no se ejecutan acciones para disminuir el factor de emisión de TM (FE fijo) y en el que se acoge la propuesta aquí descrita.



TP: Transporte público; TPC: Transporte público colectivo (no incluye articulados del sistema Transmilenio); TM: Transporte masivo (articulados del sistema Transmilenio); FE fijo: Factor de emisión constante a lo largo del decenio con un valor de 0.29 g/km; Euro IV: Mejoramiento progresivo del FE actual hasta que en el 2016 se alcanza un estándar de 0.03 g/km; Modo 1: Implementación del SITP con reducción de sobreoferta como prioridad; Modo 2: Implementación de SITP con reducción de sobreoferta y control permanente de la edad promedio de la flota

**Figura 1.23.** Comparación de las emisiones de PM del parque de transporte público en el marco del SITP – Modo 2.

#### 4.2.6. Mejoramiento Continuo de la Calidad del ACPM

La disponibilidad de ACPM con bajo contenido de azufre es fundamental para garantizar la implementación de sistemas de control de emisiones, razón por la cual el mejoramiento del ACPM se concibe en este documento como una herramienta institucional de apoyo a la medida de instalación de SCE (ver DOC: Catalizador oxidativo para vehículos diesel; CC: Control de emisiones en el cárter; DPF: Filtro de partículas para vehículos diésel (en este caso corresponde a filtros pasivos, los cuales son menos restrictivos para el contenido de azufre); FTF: Filtros de paso; SCR: Sistemas de reducción con catálisis reductiva.

4). Las implicaciones más problemáticas del azufre en el diésel son la formación secundaria de material particulado ultrafino (en forma de sulfatos), el incremento en el consumo de combustible, y relacionado con lo anterior la imposibilidad de cumplir con estándares de emisión más estrictos como los aplicables en otras partes del mundo como Europa, Estados Unidos y China.

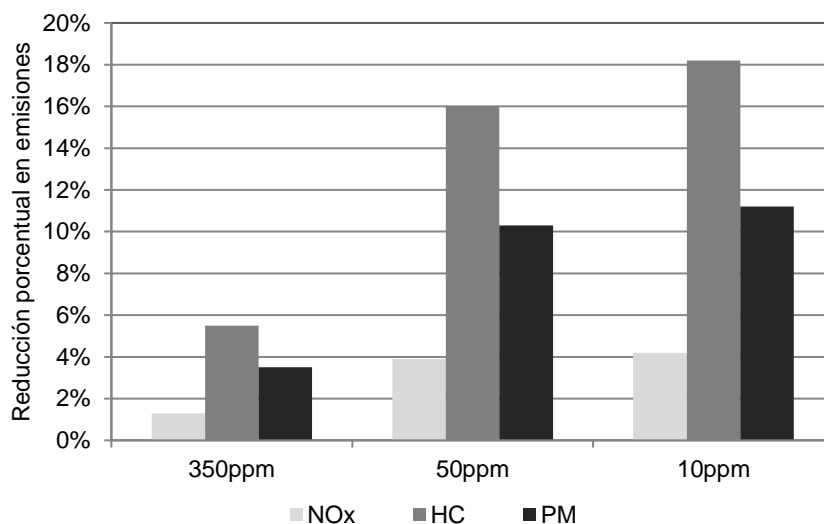
En Colombia las estrategias encaminadas al mejoramiento del diésel son básicamente: **1)** Inversión en unidades especiales de refinación en Cartagena y Barrancabermeja, en especial implementando esquemas de hidrotratamiento; **2)** Importación de combustible USLD para mezclar con el producido en el país; y **3)** Producción a gran escala de biodiesel, derivado principalmente de cultivos de palma.

En la **Error! Reference source not found.5** se presenta la forma en que varía la proyección de las emisiones de PM provenientes del TPC si se afectan los factores de emisión según la calidad del combustible disponible. Hacia el final del período se supone la disponibilidad de un combustible diésel con contenido de azufre inferior a 10 ppm que permitiría implementar además sistemas de control de emisión aún más eficientes y más económicos (véase el caso del DPF mostrado en la



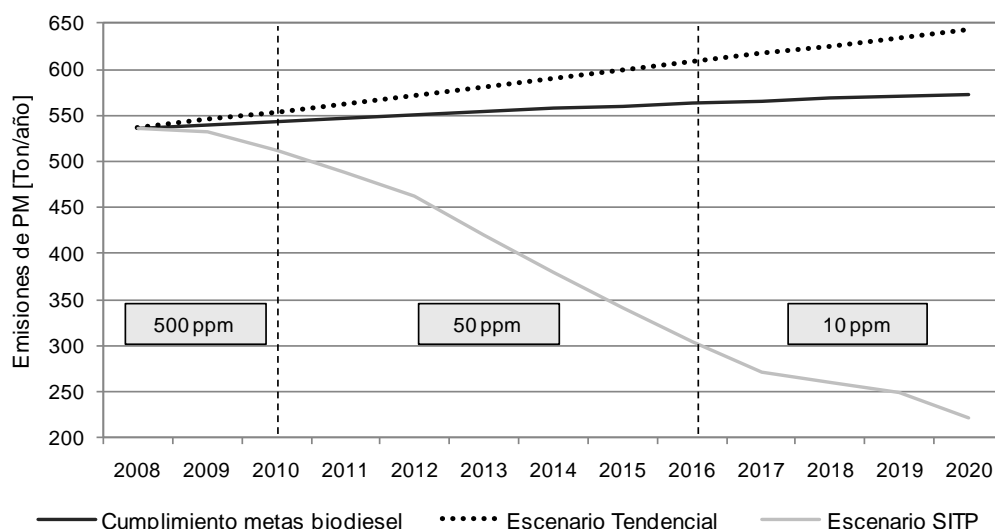
Tabla 1.131.13) y sistemas combinados que permitirían la reducción simultánea de NO<sub>x</sub> y PM.

El mejoramiento del ACPM se considera como una actividad de apoyo que ya está regulada y cuyo valor agregado será la creación de sinergias positivas con la instalación de sistemas de control de emisiones.



Fuente: LIUA et al. 2008

**Figura 1.24.** Reducciones porcentuales obtenidas tras la disminución del contenido de azufre en el diésel con respecto a las emisiones derivadas de un combustible con 500 ppm de azufre.



**Figura 1.25.** Emisiones de PM corregidas según el contenido de azufre del ACPM.

La disminución del contenido de azufre hace parte de un plan integral de Ecopetrol (en donde se están invirtiendo más de US\$4,500 millones). Estos costos no se incluyen como parte de la inversión del PDDB.

#### 4.3. Uso de sistemas de Control de Emisiones en el Transporte de Carga

Las emisiones de PM provenientes del sector de transporte de carga representan el 30% de las emisiones de las fuentes móviles, siendo el sector de mayor aporte después del transporte público colectivo. Además, según las proyecciones del escenario tendencial para el año 2020, el aporte de esta categoría podría llegar a ser incluso superior al del sector de transporte público, razón por la cual se considera necesario diseñar medidas de reducción de emisiones para este sector.

Como medida para reducir las emisiones en el transporte de carga, se propone la instalación de sistemas de control de emisiones en la totalidad de la flota de camiones que usan ACPM como combustible. Se proponen cinco sistemas de control con distintos niveles de reducción y distintos costos.

##### 4.3.1. *Modos de Implementación de la Medida.*

Los cinco modos consisten en la implementación gradual de sistemas de control de emisiones a los vehículos de la flota diésel de carga. Se supone además que los vehículos nuevos deben incluir la tecnología propuesta por la medida o una equivalente.

En la Tabla 1.18 se presenta la reducción esperada en las emisiones con la aplicación de diferentes sistemas de control de emisiones.

**Tabla 1.18.** Eficiencia media de reducción de los sistemas de control de emisiones.

Tecnología	Eficiencia en la reducción de emisiones				Requerimientos de calidad de ACPM
	HC	PM	NOx	CO	
Catalizadores oxidativos (DOC)	50-90%	25-50%	--	>90	500 ppm azufre, pero con ULSD se mejora el rendimiento

Filtros de partículas (DPF)	>85%	85% - >90%	--	>85	500 ppm azufre, algunos específicos requieren ULSD
Filtro parcial de partículas (FTF)	50-95% si se le adiciona DOC	30-75%	--	50-95% si se le adiciona catalizador DOC	500 ppm azufre
Catalizador de reducción selectiva (SCR)	50-90%	20-30%, o en combinación con DPF hasta 85%	70- 90%	--	500 ppm azufre, o ULSD si se va a usar en combinación con un filtro que lo requiera

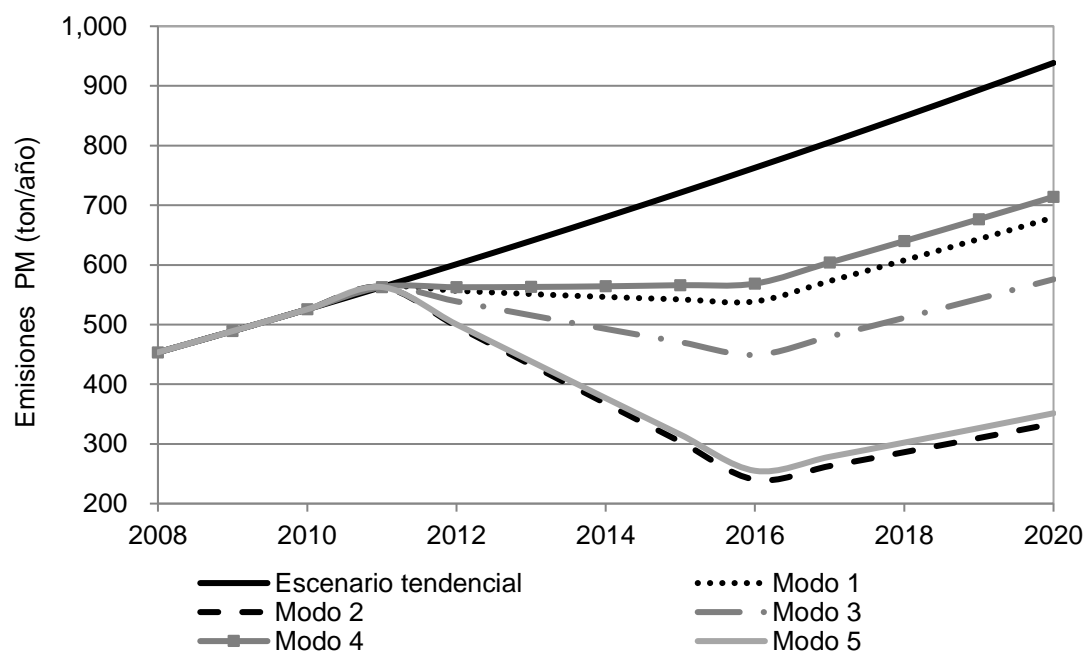
Fuentes: EPA, 2007; EPA, 2007a; MECA, 2006; EPA, 2003; EPA, 2003a.

Las tecnologías que conforman los diferentes modos de implementación de la medida son las que se mencionan a continuación.

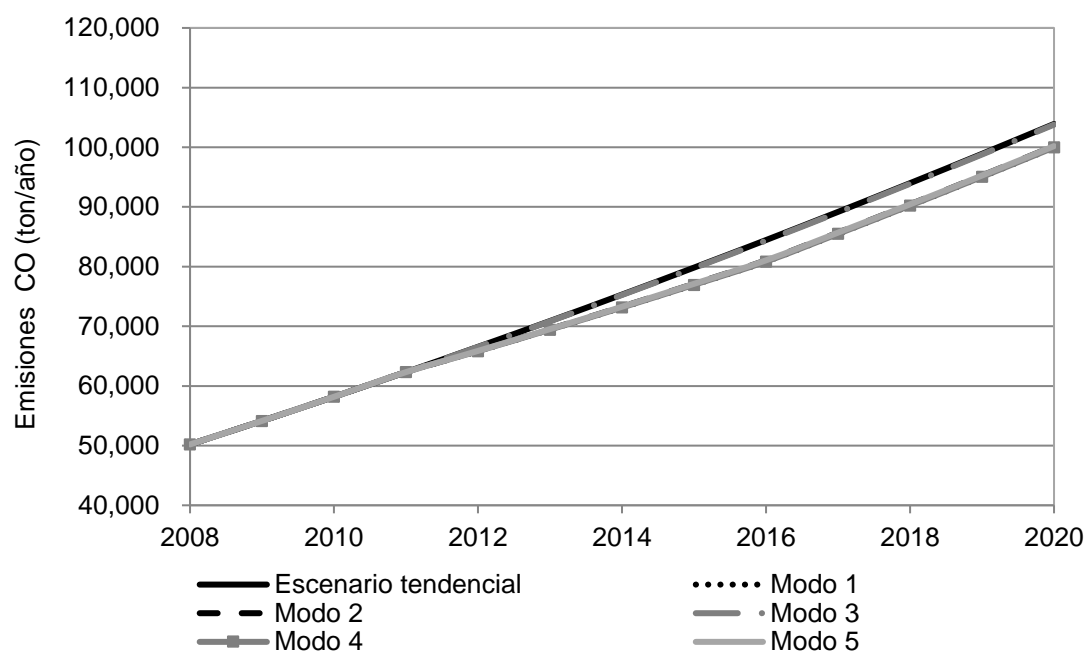
- Modo 1: Instalar catalizadores oxidativos para diésel (DOC) en todos los camiones de Bogotá. Todos los camiones que se registren a partir del año de implementación de la medida deben contar con un sistema de control de emisión que asegure reducciones en los factores de emisión comparables a los de dicho sistema.
- Modo 2: Instalar filtros de partículas (DPF) en todos los camiones de Bogotá. Todos los camiones que se registren a partir del año de implementación de la medida deben contar con un sistema de control de emisión que asegure reducciones en los factores de emisión comparables a los de dicho sistema.
- Modo 3: Instalar filtros parciales de partículas (FTF) en todos los camiones de Bogotá. Todos los camiones que se registren a partir del año de implementación de la medida deben contar con un sistema de control de emisión que asegure reducciones en los factores de emisión comparables a los de dicho sistema.
- Modo 4: Instalar un sistema compuesto por un catalizador de reducción selectiva (SCR) y un catalizador oxidativo para diésel en todos los camiones de Bogotá. Todos los camiones que se registren a partir del año de implementación de la medida deben contar con un sistema de control de emisión que asegure reducciones en los factores de emisión comparables a los de dicho sistema.
- Modo 5: Instalar un sistema compuesto por un catalizador de reducción selectiva y un filtro de partículas en todos los camiones de Bogotá. Todos los camiones que se registren a partir del año de implementación de la medida deben contar con un sistema de control de emisión que asegure reducciones en los factores de emisión comparables a los de dicho sistema.

#### 4.3.2. Beneficios Ambientales

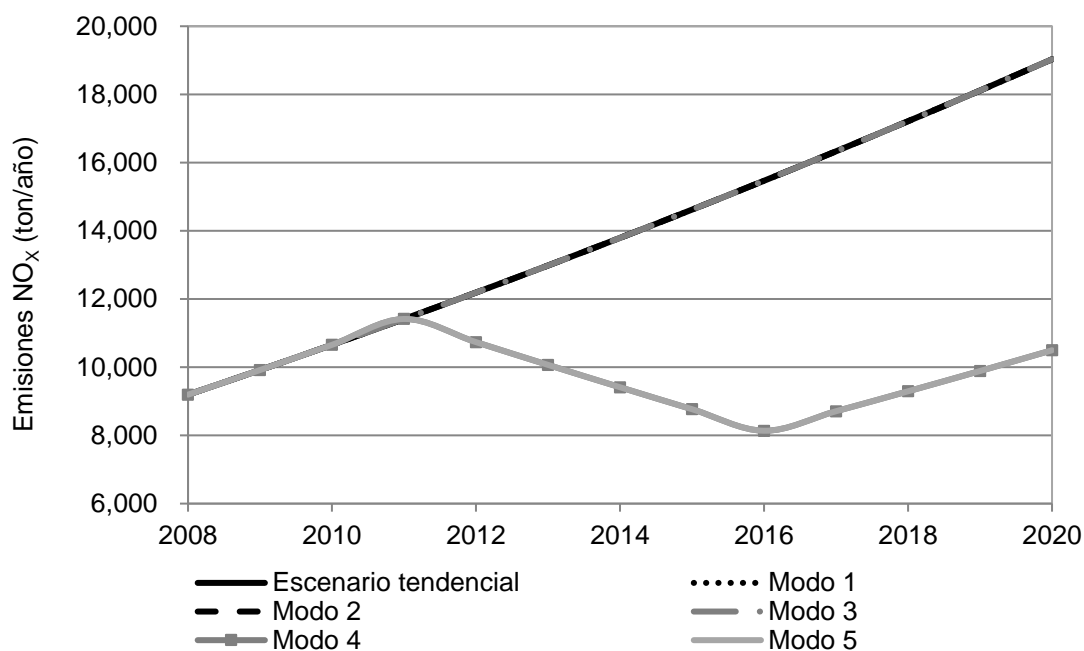
En las figuras 1.26 a 1.29 se presenta el efecto de los sistemas de control en las emisiones de acuerdo al modo de implementación de la medida y a cada uno de los contaminantes evaluados. En ellas es evidente que la tecnología con mayores beneficios en la reducción de emisiones de PM es la DPF. El uso de estos sistemas de control implica un aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, el aumento es menor al 1% en comparación con las toneladas acumuladas en el escenario tendencial para esta misma categoría.



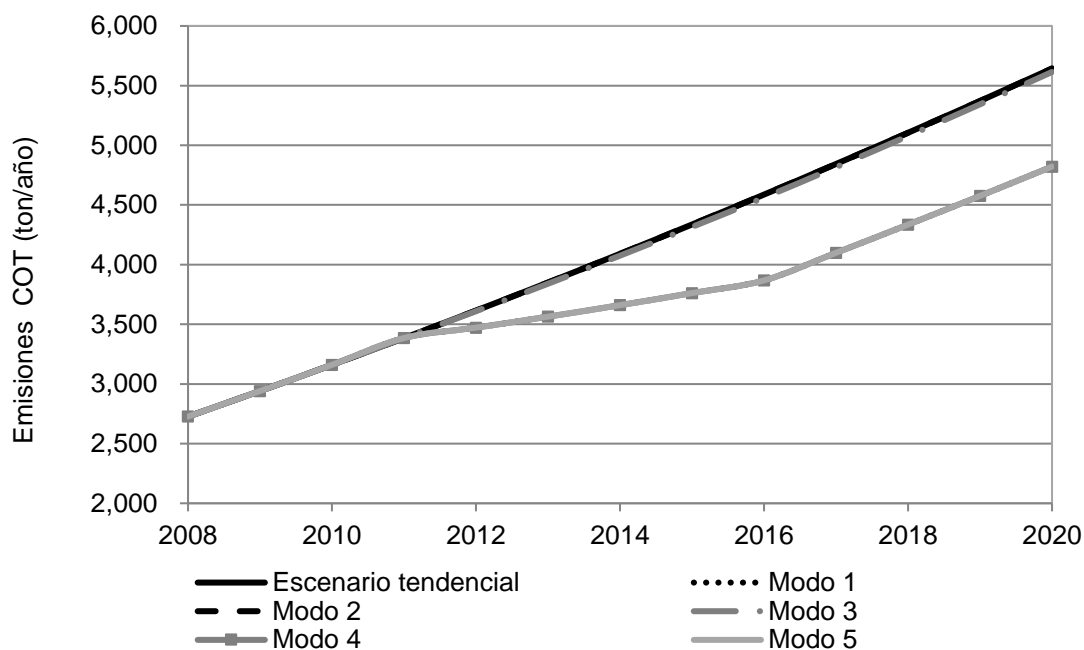
**Figura 1.26.** Emisiones anuales de PM de la flota de camiones de Bogotá.



**Figura 1.27.** Emisiones anuales de CO de la flota de camiones en Bogotá.



**Figura 1.28.** Emisiones anuales de NOx de la flota de camiones de Bogotá.



**Figura 1.29.** Emisiones anuales de COT de la flota de camiones de Bogotá.

En la siguiente tabla se presentan los beneficios asociados a cada modo en términos de toneladas reducidas en los diez años del Plan y su diferencia porcentual respecto a las emisiones de los camiones en el escenario tendencial.

**Tabla 1.19.** Reducciones en toneladas acumuladas según el modo (2010-2020) con respecto al escenario tendencial.

Modo	Reducción emisiones acumuladas (%)			
	CO	NOx	THC	PM

Modo 1 (DOC)	3%	0%	10%	19%
Modo 2 (DPF)	2%	0%	0%	43%
Modo 3 (FTF)	0%	0%	0%	36%
Modo 4 (DOC+SCR)	3%	30%	10%	19%
Modo 5 (DPF+SCR)	2%	30%	10%	43%

#### 4.3.3. Costos

Para este caso en particular la estimación de la inversión necesaria está supeditada a la elección de las tecnologías de control de emisiones que se pretenda implementar, así como al momento en el tiempo en que se implemente la medida. En la Tabla 1.20 se presentan los costos medios de adquisición de los sistemas de control. En la Tabla 1.21 se presentan los costos totales de la medida, así como los costos por tonelada de PM reducida suponiendo que ésta se implementa en el año 2012. Los costos de inversión pueden variar entre \$140,000 millones de pesos y \$3.37 billones de pesos y unos costos entre \$80 y \$1,440 millones de pesos por tonelada de PM reducida.

**Tabla 1.20.** Costos unitarios de los sistemas de control de emisiones.

Sistema de control	Costo medio por unidad (pesos)
DOC	\$ 2,700,000
DPF	\$ 48,800,000
FTF	\$ 14,100,000
DOC + SRC	\$ 39,100,000
DPF + SRC	\$ 65,100,000

Fuentes: EPA, 2007; EPA, 2007a; MECA, 2006; EPA, 2003; EPA, 2003a.

**Tabla 1.21.** Costos.

Tipo de tecnología	Costos Totales (\$MM)	Costo eficiencia (\$M/Ton reducida de PM)
Modo 1 (DOC)	140	85
Modo 2 (DPF)	2,530	655
Modo 3 (FTF)	730	315
Modo 4 (DOC+SCR)	2,020	1,400
Modo 5 (DPF+SCR)	3,370	900

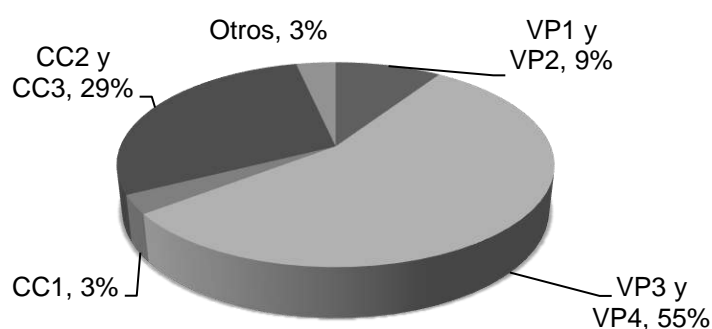
\$MM: Miles de Millones de pesos; \$M: Millones de pesos

## 5. FORMULACION DE PROYECTOS PARA VEHICULOS LIVIANOS QUE UTILIZAN GASOLINA COMO COMBUSTIBLE

De los cerca de 1.2 millones de vehículos con los que cuenta la ciudad hoy en día, el 75% son vehículos particulares y de éstos el 95% usa gasolina. A pesar de esta alta participación en el parque automotor, las emisiones de material particulado relacionadas a estos vehículos no superan las 40 toneladas al año, es decir menos del 4% del total del aporte de las fuentes móviles. Caso contrario es el que se presenta en sustancias promotoras de ozono como los óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos totales de los que los vehículos particulares de pasajeros aportan el 55% y 60% respectivamente. Los motores a gasolina se encuentran adicionalmente relacionados con emisiones de monóxido de carbono. Debido a esto resulta fundamental buscar medidas que reduzcan los factores de emisión de los vehículos particulares que circulan por la ciudad.

Una fracción importante de las emisiones totales de hidrocarburos totales por parte de los vehículos particulares proviene de vehículos que no cuentan con convertidor catalítico debido a su edad. En la

se presenta la distribución porcentual de acuerdo a las categorías definidas en el presente documento.



VP1 y VP2: Vehículos de pasajeros que usan gasolina como combustible y tienen TWC. VP3 y VP4: Vehículos de pasajeros que usan gasolina como combustible y no tienen TWC. CC1: Camperos y camionetas que usan gasolina como combustible y tienen TWC. CC2 y CC3: Camperos y camionetas que usan gasolina como combustible y no tienen TWC.

**Figura 1.30.** Distribución de las emisiones de hidrocarburos totales de vehículos particulares.

De acuerdo a lo que se observa en la figura anterior, más de la mitad de las emisiones de THC son emitidas por las categorías VP3 y VP4 que corresponden a vehículos que no cuentan con un sistema de control de emisiones y tienen más de 13 años de uso. El número de vehículos en estas categorías no supera los 310,000 vehículos. Esto implica que menos del 40% de los vehículos particulares son responsables de más del 55% de las emisiones de THC. Algo similar sucede para las emisiones de CO donde estas mismas categorías aportan más del 50%.

Por otra parte se deben considerar cambios en los factores de emisión debido a dos fenómenos importantes. El primero es el envejecimiento del catalizador. Los convertidores catalíticos tienen en promedio una vida útil de diez años y a lo largo de este tiempo su desempeño se deteriora gradualmente. El segundo está relacionado con mejoras tecnológicas en vehículos nuevos y estándares más altos de calidad. De acuerdo a lo que se mencionó con anterioridad, las emisiones de las fuentes móviles se estiman según la Ecuación 1. Sin embargo, para las proyecciones de vehículos particulares se consideraron estos dos efectos adicionales por medio de los coeficientes de corrección que se explican a

continuación. La  $Fe = Fe_b \cdot C_c \cdot C_t$  corregido.

Ecuación 6 define el factor de emisión

$$Fe = Fe_b \cdot C_c \cdot C_t$$

Ecuación 6

En donde  $Fe$  es el factor de emisión corregido,  $Fe_b$  es el factor de emisión base<sup>7</sup>,  $C_c$  es el coeficiente de corrección por envejecimiento del catalizador y  $C_t$  es el coeficiente de corrección por mejoras en las tecnologías de control de emisiones.

Para mejorar los factores de emisión del parque automotor de vehículos privados, se deben adelantar acciones que se verán reflejadas en la modificación paulatina de los factores  $C_c$  y  $C_t$ . Por una parte se puede buscar reemplazar los convertidores catalíticos que han cumplido con su ciclo de vida útil, lo cual implica bajos costos y compensa en buena parte el desgaste del vehículo con el tiempo en términos de emisión de contaminantes criterio. Sin embargo, cabe mencionar que es de esperar que los fabricantes de vehículos nuevos incluyan tecnologías que permitan reducciones en las emisiones, lo cual traería beneficios aún mayores que los alcanzados a través del reemplazo de catalizadores. Es por esto que se presenta una segunda medida que busca reducir la edad promedio de los vehículos de uso particular que circulan por la ciudad; esta segunda medida presenta mejores resultados en el largo plazo pero implica costos más elevados. Finalmente, se propone una medida en la cual se combinan las dos anteriores con el fin de obtener reducciones significativas en las emisiones con unos costos intermedios.

### 5.1. Renovación de Convertidores Catalíticos

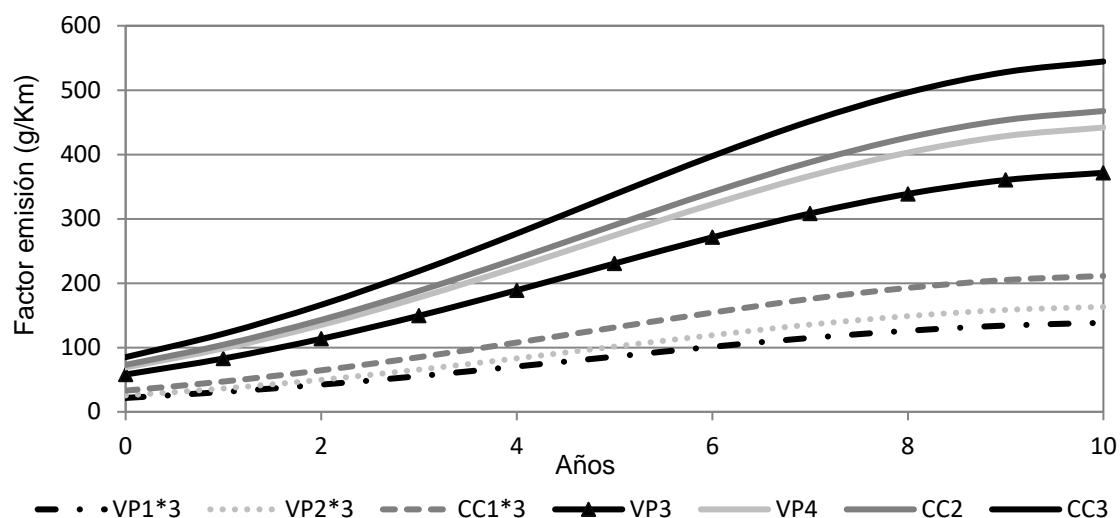
Los convertidores catalíticos de tres vías (TWC) son sistemas de control de emisiones con los que cuentan la mayoría de vehículos de gasolina. En el país su uso es obligatorio en modelos posteriores a 1996 como consecuencia de la Resolución 909 de 1996 del Ministerio del Medio Ambiente. De acuerdo a la Asociación de Empresas Europeas Manufactureras de Automóviles (ACEA, 2000), la eficiencia en la reducción de las emisiones al usar TWC depende de los niveles de azufre en el combustible. Para el caso colombiano, las reducciones serán del orden del 30%, 25% y 18% de CO, NO<sub>x</sub> y COT, respectivamente.

Lo anterior implica que un vehículo con un sistema de control de emisiones que ha superado su tiempo de vida útil emitirá entre un 22% y un 43% más de contaminantes criterio. Los factores de emisión para CO obtenidos para vehículos con convertidor catalítico en Bogotá se presentan en la Figura 1.31 En ella se presenta como va cambiando este valor para cada categoría según su tiempo de uso.

---

<sup>7</sup> El factor base de emisión ( $Fe_b$ ) corresponde a los factores determinados para los vehículos bogotanos según la campaña de campo que se realizó en la fase anterior del proyecto (SDA-SUR, 2008).





VP1: Vehículos de pasajeros con TWC y cilindraje  $\leq 1,400\text{cc}$ . VP2: Vehículos de pasajeros con TWC y cilindraje  $> 1,400\text{cc}$ . VP3: Vehículos de pasajeros sin TWC y cilindraje  $\leq 1,400\text{cc}$ . VP4: Vehículos de pasajeros sin TWC y cilindraje  $> 1,400\text{cc}$ . CC1: Camperos y camionetas con TWC. CC2: Camperos y camionetas sin TWC y cilindraje  $< 2,500\text{cc}$ . CC3: Camperos y camionetas sin TWC y cilindraje  $\geq 2,500\text{cc}$ .

**Figura 1.31.** Factores de emisión de monóxido de carbono según el envejecimiento del catalizador.

#### 5.1.1. Modos de Implementación

La renovación de convertidores catalíticos se propone de acuerdo a tres posibles modos de implementación que se presentan en la **Error! Not a valid bookmark self-reference.2**. Los porcentajes en la tabla se refieren a la fracción de vehículos con catalizadores de más de diez años de uso a los que se les debe cambiar dicho sistema de control de emisiones. El primer modo es el más exigente y por consiguiente está relacionado a mayores reducciones y mayores costos.

**Tabla 1.22.** Modos de implementación propuestos para renovación del convertidor catalítico.

Año	Modo 1	Modo 2	Modo 3
2012	50%	20%	20%
2013	55%	25%	20%
2014	60%	30%	20%
2015	65%	35%	20%
2016	70%	40%	20%
2017	75%	45%	20%
2018	80%	50%	20%
2019	80%	0%	0%
2020	80%	0%	0%

#### 5.1.2. Beneficios Ambientales

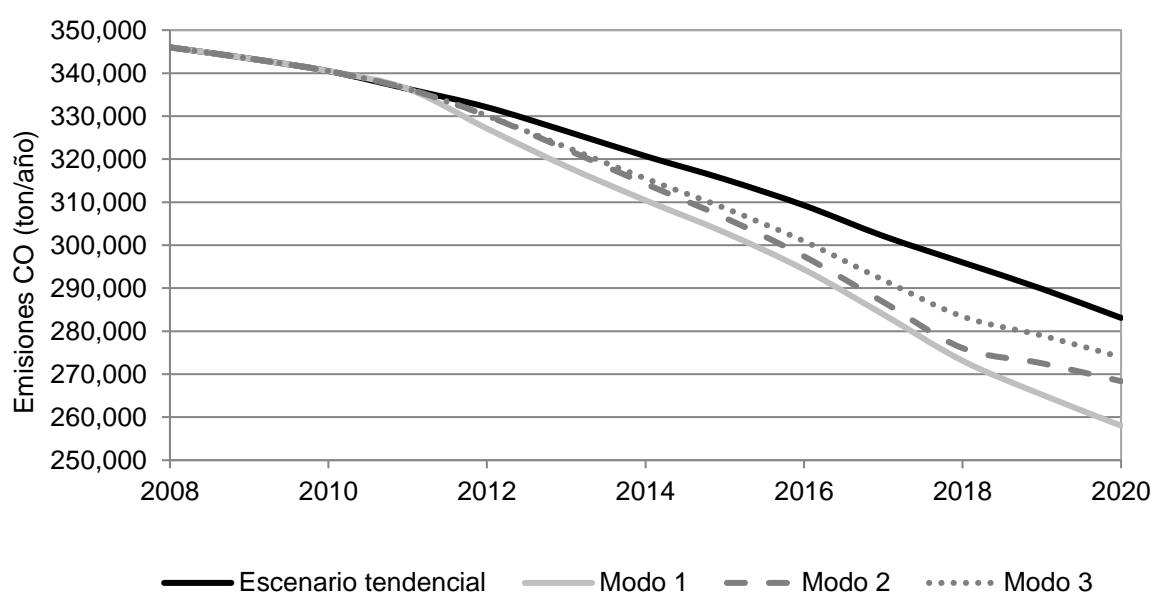
En la Tabla 1.23 se presenta la reducción en las toneladas acumuladas (2010-2020) respecto a las emisiones que se tendría para esta misma categoría vehicular en el escenario tendencial.

Con la implementación de esta medida, aumentan las emisiones de CO<sub>2</sub> respecto al escenario tendencial. Sin embargo, para todos los modos el aumento es inferior al 1%. Esta medida no tiene impacto en las emisiones de PM.

**Tabla 1.23.** Reducciones totales (2008-2020) para cada contaminante según el modo de implementación.

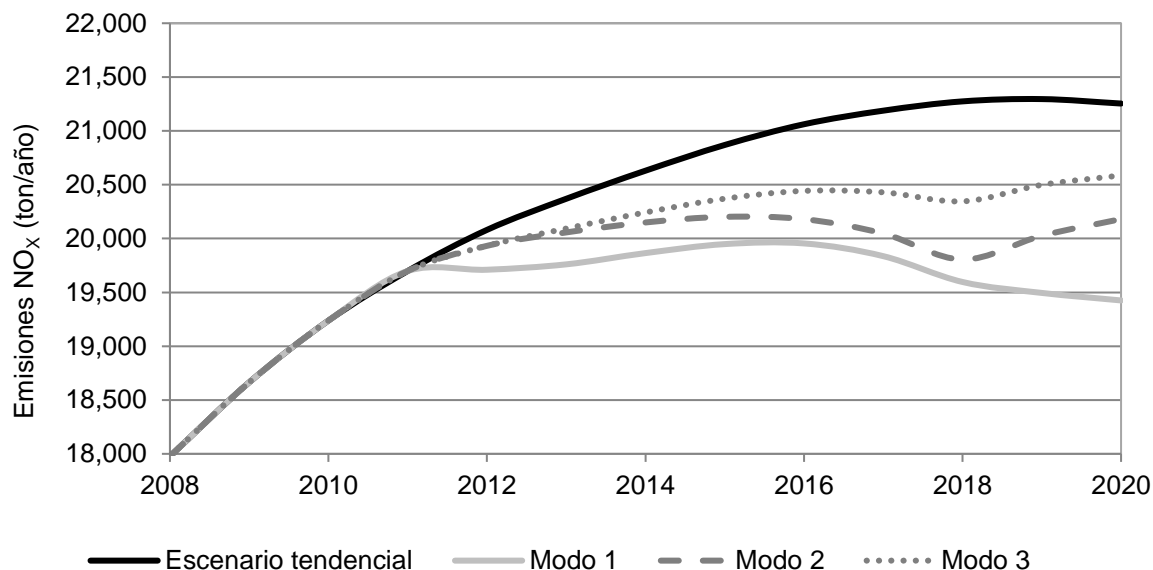
Modo	CO	NOx	THC
Modo 1	4%	5%	2%
Modo 2	3%	3%	1%
Modo 3	2%	2%	1%

A continuación se presentan las tendencias año a año para cada uno de los contaminantes con la implementación de la medida de renovación de los convertidores catalíticos.



**Figura 1.32.** Emisiones de CO debido a la renovación de los convertidores catalíticos.

En la Figura 1.32 se observa que las emisiones de CO tienen un comportamiento similar al que se presenta para COT, pero para el monóxido de carbono el efecto de cada modo es más marcado. Esto se debe a que el proceso de envejecimiento del catalizador afecta porcentualmente en mayor medida las emisiones de CO que de COT. De acuerdo a la metodología seguida para estimar los beneficios de la medida, el cambio de un catalizador de diez años de edad permite reducciones del 30% en las emisiones de CO mientras que el beneficio en COT es de un 17%.

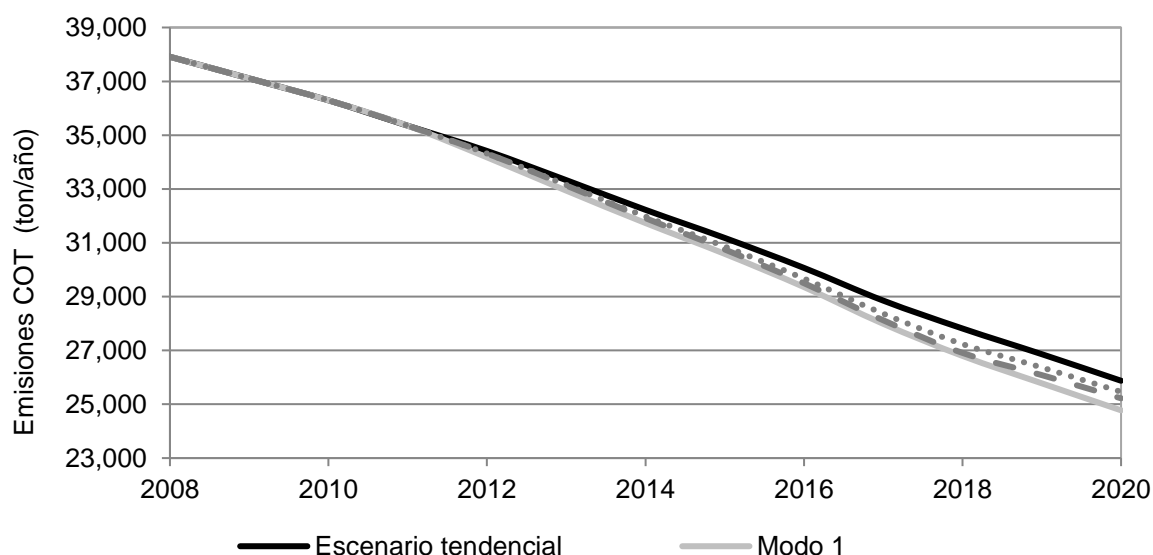


**Figura 1.33.** Emisiones de NO<sub>x</sub> debido a la renovación de los convertidores catalíticos.

En la Figura 1.33. se presenta el comportamiento de las emisiones totales de NO<sub>x</sub> de la flota de vehículos particulares en Bogotá. En el escenario tendencial, principalmente como consecuencia del crecimiento de la flota aumentan las emisiones en el tiempo. Sin embargo, como se evidencia en la figura con el paso del tiempo la tasa de crecimiento del NO<sub>x</sub> se hace más lenta e incluso cerca al año 2020 tiende a caer. Este comportamiento se espera como consecuencia de dos factores: 1) la mejora tecnológica asociada a los modelos más recientes y 2) la salida de circulación de los vehículos más antiguos debido a la tasa natural de chatarrización de la flota. Este comportamiento en el escenario tendencial significa que si bien en Bogotá habrá más vehículos particulares, éstos serán más limpios que los existentes hoy en día.

Las tres líneas grises representan cada uno de los modos de implementación de la medida. Es claro que los efectos del Modo 1 son mayores que los de los otros dos modos, esto es consecuencia de metas más exigentes en comparación a las de los otros dos modos de implementación.

Para los tres modos se puede ver que una serie de oscilaciones hacia el final del horizonte de implementación. Este fenómeno está asociado al efecto de la interacción entre el número de fuentes nuevas y el mejoramiento del desempeño de catalizadores antiguos. Nótese que a partir del año 2016 el crecimiento de las emisiones tiene una tendencia negativa, esto es porque el efecto de catalizadores renovados y mejoras tecnológicas de los nuevos vehículos es más importante que el efecto en las emisiones debido al aumento en el número de fuentes. En los modos 2 y 3 se observa un crecimiento en los últimos dos años debido a que estos modos se proponen sólo hasta el año 2018 de manera que la tendencia recupera su crecimiento natural.



**Figura 1.34.** Emisiones de COT debido a la renovación de los convertidores catalíticos.

La Figura 1.34 muestra las tendencias de las emisiones de COT según el modo de implementación. En el escenario tendencial las emisiones tienden a disminuir en el tiempo. Esto se debe a que las mejoras tecnológicas proyectadas para este contaminante superan el impacto que tiene el aumento en el número de fuentes. La gradualidad de las mejoras tecnológicas se estimó considerando la gradualidad observada en el comportamiento histórico de las normas de emisión de otras regiones del mundo.

### 5.1.3. Costos

Los costos de los convertidores catalíticos corresponden al valor medio estimado a partir de los valores identificados en el mercado local. El valor unitario de un convertidor catalítico para un vehículo de pasajeros es de aproximadamente \$1,200,000, mientras que el valor de este dispositivo para un campero es de alrededor de 1,500,000. Estos valores incluyen el costo de adquisición, costo de instalación y accesorios requeridos para la instalación.

En la Tabla 1.24 se presenta el costo total de la medida y el costo por unidad de tonelada de contaminante (CO, NO<sub>x</sub> y COT) reducida. Se presentan los costos de las medidas si estas se implementaran en el año 2012. El costo de la medida varía dependiendo del número de fuentes a las que se le instalen los sistemas de control, este efecto se consideró en el proceso de optimización mediante el cual se seleccionaron las medidas que conforman el PDDB (ver Sección 3 del Documento de Trabajo).

**Tabla 1.24.** Costo de la medida y costo por unidad de tonelada de contaminante reducida.

Modo	Costos (\$MM)	Costo eficiencia (\$M/ton)		
		CO	NO <sub>x</sub>	COT
Modo 1	950	7	91	147
Modo 2	620	9	128	204
Modo 3	420	14	187	296

\$MM: Miles de Millones de pesos; \$M: Millones de pesos

#### 5.1.4. Herramientas Institucionales Requeridas

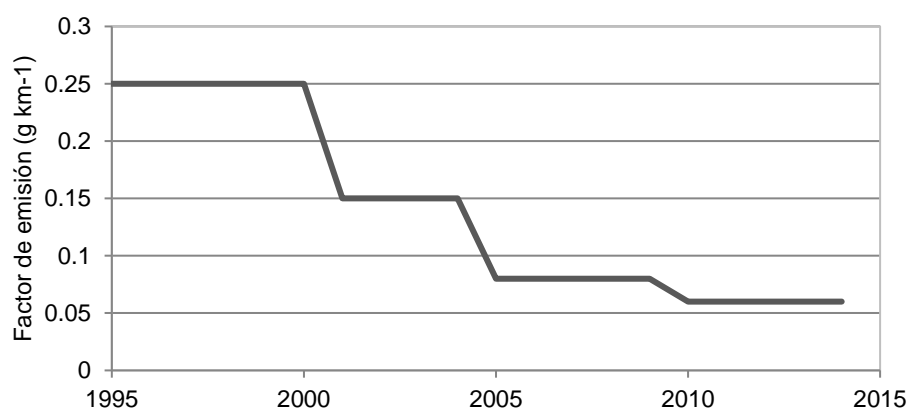
Para el cambio de convertidores catalíticos es importante que se facilite la importación de los repuestos necesarios. Actualmente en la ciudad no es fácil adquirir catalizadores de tres vías de tipo genérico como los que se necesitan para la implementación de esta medida. Los distintos establecimientos de servicio mecánico no cuentan con catalizadores dentro de su inventario de manera que sería necesario importarlos.

#### 5.2. Renovación de la Flota

Si bien la renovación del catalizador de un vehículo usado mejora los factores de emisión, existen diferencias en el desempeño entre carros nuevos y usados que no se deben a un envejecimiento de dicho equipo. Mejoras tecnológicas en modelos más nuevos, desgaste de otros componentes del motor, estándares más altos de calidad, entre otros factores, son variables que juegan un papel importante en las emisiones de un vehículo. Al reducir la edad promedio de los vehículos en Bogotá se logra ajustar las emisiones en la ciudad en función de los nuevos estándares internacionales de emisión. Además, los vehículos que no tienen convertidor catalítico se pueden reemplazar por nuevos, los cuales sí cuentan con tecnologías de control de emisiones.

Un ejemplo del mejoramiento de los factores de emisión para los vehículos con año modelo más reciente se presenta en la Figura 1.35. En esta se muestra el cambio histórico de los niveles máximos permitidos por las normas Europeas para  $\text{NO}_x$  en los últimos años, el cual está asociado con las mejoras en los factores de emisión de nuevos vehículos.

Según proyecciones realizadas por Kousoulidou et al. (2008), cada cinco años se presentan reducciones en el factor de emisión de  $\text{NO}_x$  cercanas al 50% cada, tendencia que se mantiene hacia el futuro. El comportamiento para otros contaminantes es similar aunque a medida que las exigencias se van haciendo más estrictas, el cambio se acerca a reducciones del 25% quinquenal. Usando los factores de emisión medidos para Bogotá y comparándolos con tendencias internacionales como las que aquí se presentan se puede predecir el cambio de éstos a lo largo de los años debido a mejoras tecnológicas y estándares de calidad más exigentes.



**Figura 1.35.** Factores de emisión de  $\text{NO}_x$  exigidos por la legislación Europea actual.

Por otra parte, en la estimación de los efectos en las emisiones debido a la renovación de la flota de vehículos es importante tener en cuenta que el factor de actividad tiende a aumentar. Este fenómeno fue evidenciado en la fase anterior del proyecto y de la misma manera lo afirman estudios internacionales (Zachariadis et al., 2001).

En la

Tabla 1.25 se presentan los factores de actividad promedio para las distintas categorías de transporte privado (vehículos de pasajeros) de la ciudad. Según como se presenta en ésta, los factores de actividad de las categorías que corresponden a los vehículos más antiguos (VP3, VP4, CC2 y CC3) son menores que las de los vehículos de modelos más recientes (VP1, VP2 y CC1).

**Tabla 1.25.** Factores de actividad según categorías vehiculares.

Categoría vehicular	Factor de actividad (Km·año <sup>-1</sup> )	Categoría vehicular	Factor de actividad (Km·año <sup>-1</sup> )
VP1	13,000	CC1	22,000
VP2	18,000	CC2	12,500
VP3	9,500	CC3	12,500
VP4	9,500	-	-

VP1: Vehículos de pasajeros con TWC y cilindraje  $\leq 1,400$ cc. VP2: Vehículos de pasajeros con TWC y cilindraje  $> 1,400$ cc. VP3: Vehículos de pasajeros sin TWC y cilindraje  $\leq 1,400$ cc. VP4: Vehículos de pasajeros sin TWC y cilindraje  $> 1,400$ cc. CC1: Camperos y camionetas con TWC. CC2: Camperos y camionetas sin TWC y cilindraje  $< 2,500$ cc. CC3: Camperos y camionetas sin TWC y cilindraje  $\geq 2,500$ cc.

### 5.2.1. Modos de Implementación

En la

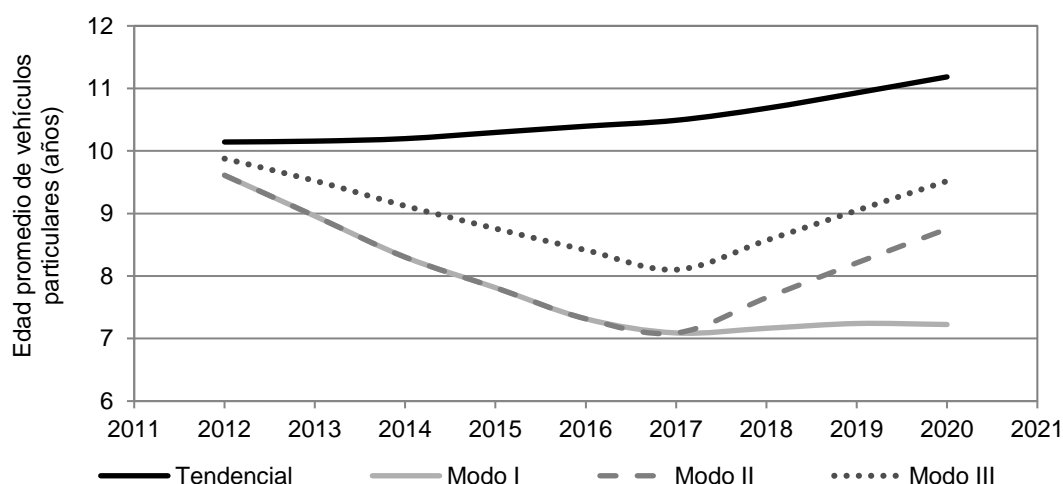
Tabla 1.26 se presentan tres modos de implementación propuestos para esta medida. En éstos se varía la meta de renovación de los vehículos que tengan más de 20 años y que tengan año modelo igual o menor a 1996. Cabe mencionar que con este esquema no se reduce el número de vehículos sino la edad promedio de éstos.

**Tabla 1.26.** Modos de implementación propuestos para renovación de la flota.

Año	Modo 1		Modo 2		Modo 3	
	Fracción de la flota	Edad vehículo (años)	Fracción de la flota	Edad vehículo (años)	Fracción de la flota	Edad vehículo (años)
2012	20%	20	20%	20	10%	20
2013	30%	20	30%	20	15%	20
2014	40%	20	40%	20	20%	20
2015	50%	20	50%	20	25%	20
2016	50%	19	50%	19	30%	20
2017	50%	18	50%	18	35%	20
2018	50%	17				
2019	50%	16				
2020	50%	15				

En la

6 se presentan los cambios en las edades promedio del total de la flota de vehículos particulares para cada año entre el escenario tendencial y los modos propuestos.



**Figura 1.36.** Edades promedio de la flota de vehículos particulares según el modo.

### 5.2.2. Beneficios Ambientales

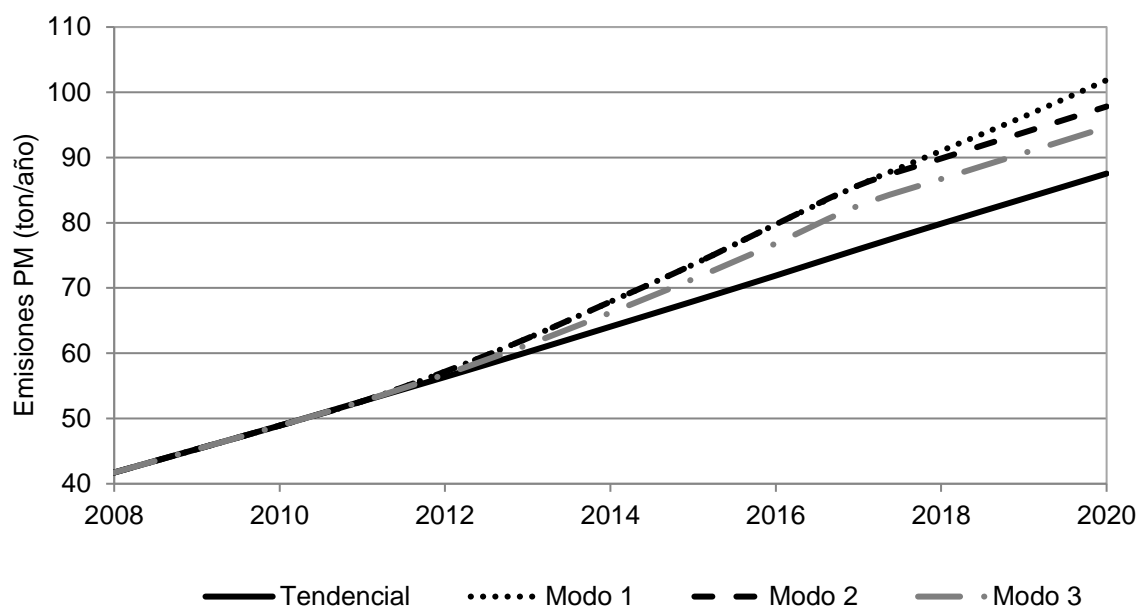
En la Tabla 1.27 se presenta el efecto de la medida en las emisiones acumuladas (2008-2020) de los vehículos particulares. La reducción se estimó respecto a las emisiones del mismo sector en el escenario tendencial. Esta medida implica un aumento entre el 5% y el 8% en las emisiones de CO<sub>2</sub> y PM dependiendo del modo de implementación de la medida. Mientras que para CO y COT se logran porcentajes de reducción hasta del 18% siendo éste último el que mayores reducciones alcanza.

**Tabla 1.27.** Reducciones totales para vehículos de gasolina y para cada contaminante debido a la implementación de los modos de renovación de la flota.

Modo	CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	COT	PM
Modo 1	-8%	15%	5%	18%	-8%
Modo 2	-7%	14%	5%	17%	-7%
Modo 3	-5%	10%	3%	12%	-5%

Nota: el signo negativo (-) en las emisiones de CO<sub>2</sub> y PM se refiere a un aumento en las emisiones de estos contaminantes para la flota de gasolina.

En las figuras 1.37 a 1.41 se presenta el comportamiento de las emisiones con la implementación de la medida en comparación con el escenario tendencial.

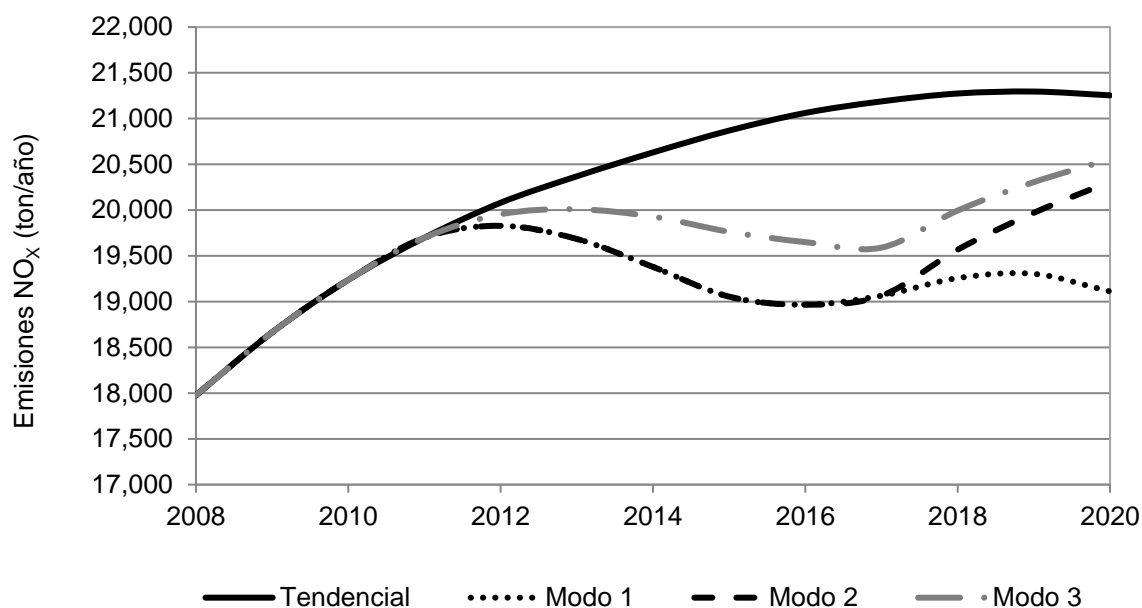


**Figura 1.37.** Emisiones de PM de los vehículos privados según los modos de renovación de la flota.

En la Figura 1.37.A se presenta el comportamiento de las emisiones de material particulado para los años 2008 a 2020. Debido a que los motores de gasolina presentan factores de emisión de PM relativamente bajos en comparación con los diesel, éste contaminante no ha sido prioridad en las mejoras tecnológicas que se hacen a los vehículos y por lo tanto el factor de emisión es constante en el periodo de análisis del plan. Esto explica el comportamiento lineal creciente del escenario tendencial ya que no hay cambios importantes en las variables que determinan las emisiones salvo en el aumento del número de fuentes.

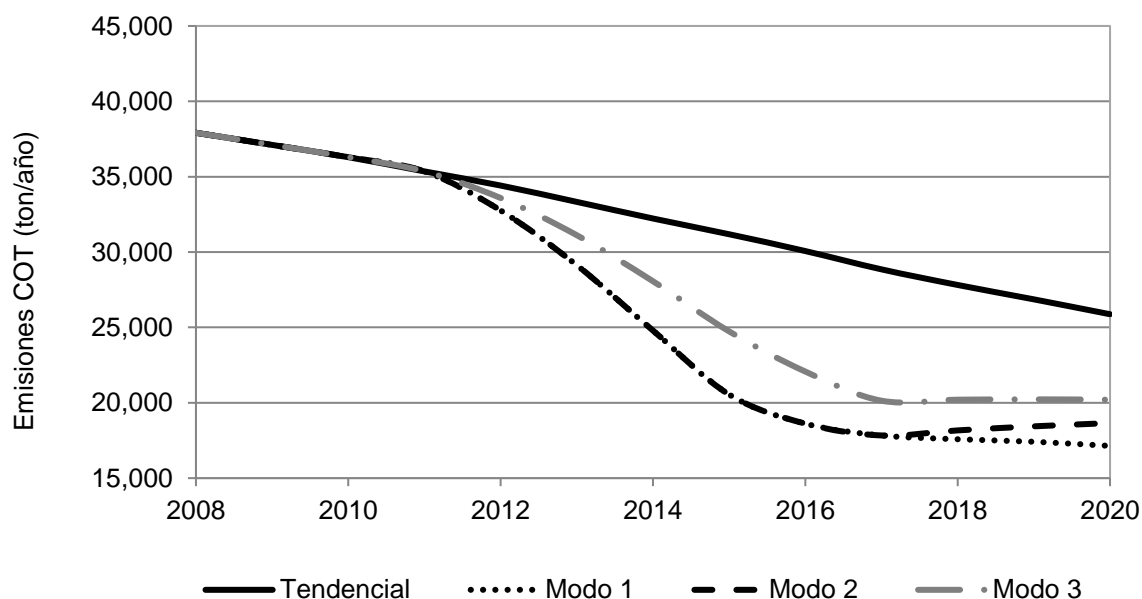
Las tendencias de los modos de implementación de la medida muestran un claro aumento las emisiones totales, siendo el Modo 1 el que presenta los mayores incrementos. Esto se debe a que según como ha sido evidenciado en diferentes estudios los vehículos nuevos están asociados a un mayor uso. La combinación de aumentar el factor de actividad promedio de la flota sin alterar significativamente los factores de emisión resulta en un aumento en las emisiones de PM al renovar la flota de vehículos particulares. Cabe anotar que el aumento no es significativo en el total del inventario de emisiones.





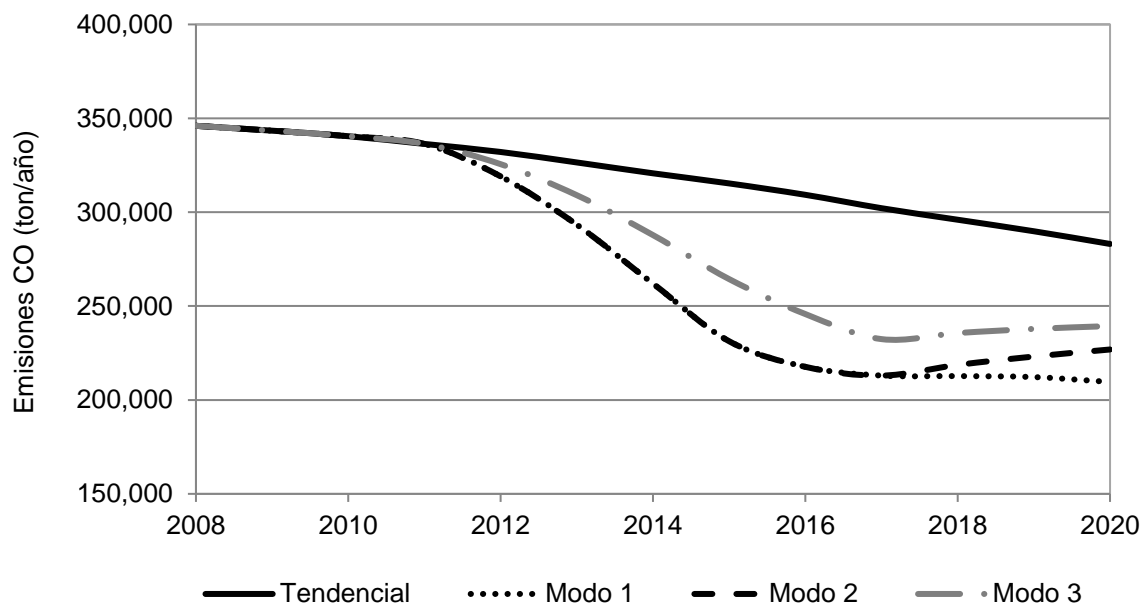
**Figura 1.38.** Emisiones de NO<sub>x</sub> de los vehículos privados según los modos de renovación de la flota.

En la Figura 1.38 se presenta el comportamiento de las emisiones de NO<sub>x</sub> de los vehículos particulares para los distintos modos de implementación de la medida. Los modos 2 y 3 presentan una reducción importante desde el año 2012 como consecuencia de la implementación de la medida, seguida por un aumento desde el año 2017 cuando finaliza la medida. En el Modo 1 existe un ligero aumento en las emisiones en el año 2017 esto es consecuencia de la interacción de diferentes factores como son: 1) por el método de implementación cada año se renuevan menos vehículos y 2) hacia el final del horizonte las tasas de crecimiento de la flota son mayores. Aun así este escenario representa ventajas respecto al escenario tendencial.

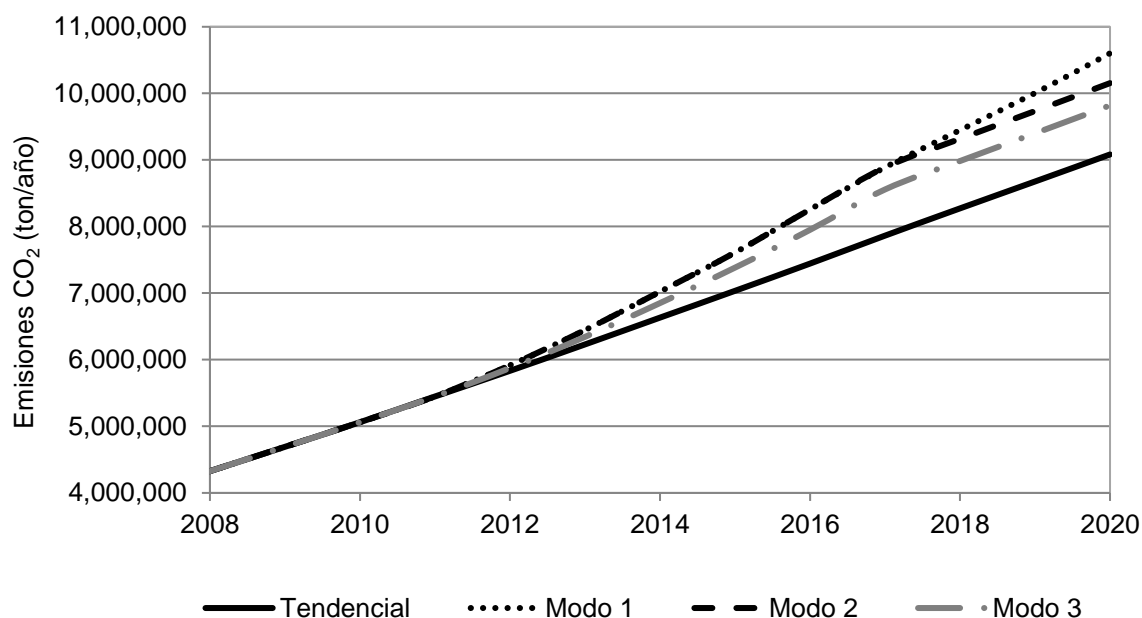


**Figura 1.39.** Emisiones de COT de los vehículos privados según los modos de renovación de la flota.

La figura 1.39 muestra una clara reducción en las emisiones de COT con la implementación de la medida en los tres modos. Como se puede ver en la figura, los mayores efectos se dan en los primeros años debido a que en esos años se reemplaza un mayor número de vehículos antiguos. En los últimos años la tendencia que de traía en reducción de emisiones se ve compensada por el crecimiento de la flota.



**Figura 1.40.** Emisiones de CO de los vehículos privados según los modos de renovación de la flota.



**Figura 1.41.** Emisiones de CO<sub>2</sub> de los vehículos privados según los modos de renovación de la flota.

El comportamiento del CO es similar al de COT y se explica por las mismas razones. A diferencia del mayor impacto para CO en la medida de cambio de catalizadores, en la medida de renovación se ve un impacto similar para éstos dos contaminantes. Esto se debe a que los porcentajes de reducción en los factores de emisión debido a una mejora

tecnológica (adquisición de vehículos nuevos) son similares para monóxido de carbono y los compuestos orgánicos totales.

De las figuras anteriores resulta evidente que las reducciones derivadas de esta medida son mayores en comparación con las reducciones que se logran con la medida de renovación de catalizadores. Esto se debe a que afecta a un mayor número de fuentes y en una mayor proporción así como a que los vehículos nuevos contarán con sistemas de control de emisiones más eficientes. El aumento en las emisiones de PM responde al incremento del factor de actividad asociado a la reducción en la edad promedio de la flota.

### 5.2.3. Costos

El costo unitario de los vehículos nuevos se calculó con base en el precio promedio de los vehículos más vendidos en el año 2008 en Colombia. A partir de dicha información se estimó en 38 millones aproximadamente el costo de un vehículo liviano de pasajeros, mientras que el costo de un vehículo nuevo de la categoría de camperos y camionetas se estimó en alrededor de 70 millones.

En la Tabla 1.28 se presenta el costo total de la medida para cada uno de los modos de implementación. Adicionalmente, se presenta el costo por tonelada de contaminante reducida (CO, NO<sub>x</sub>, COT).

**Tabla 1.28.** Costo total y costo por tonelada de contaminante reducido.

Modo	Costos (\$MM)	Costo-eficiencia (\$M/ton)		
		CO	NO <sub>x</sub>	COT
Modo 1	22,100	37	1,538	295
Modo 2	14,360	25	1,177	200
Modo 3	9,480	24	1,146	189

\$MM: Miles de Millones de pesos; \$M: Millones de pesos.

### 5.2.4. Herramientas Institucionales Requeridas

La renovación de la flota debe articularse a través de incentivos tributarios y arancelarios. Una de las opciones que podría ser considerada es la reducción de los aranceles para la importación de vehículos nuevos. Estos beneficios aplicaría únicamente para los vehículos que hagan parte de los esquemas de reemplazo de vehículos antiguos, esto es, los ciudadanos solo podrán adquirirlos si ofrecen su vehículo viejo como garantía de que efectivamente se realizará un reemplazo y no se añadirá un vehículo más al parque automotor.

## 5.3. Combinación entre los Esquemas de Renovación de Vehículos Particulares y Renovación de Convertidores Catalíticos

La medida de renovación de la flota presenta mayores beneficios ambientales que la renovación de catalizadores. Como se ha mencionado antes, esto se debe a la imposibilidad de cambiar o instalar catalizadores en vehículos de modelos anteriores a 1996. Sin embargo, los costos asociados a la renovación de la flota son significativamente mayores. Se propone entonces una tercera medida que consiste en la combinación de las dos anteriores de manera que se obtengan reducciones en las emisiones sin incurrir en gastos tan elevados.

### 5.3.1. Modos de Implementación

En la Tabla 1.291.29 se presenta el plan de implementación propuesto para los diferentes modos de la medida. Para todos los modos, el porcentaje que se presenta en la columna referenciada como “cambio de catalizador” se refiere a la fracción de la flota con catalizadores de más de 10 años de uso a la que se propone cambiar el equipo. En las columnas de renovación se muestra la fracción de la flota en la que se renovarán los vehículos con año modelo igual o anterior a 1996.

**Tabla 1.29.** Esquema de implementación de las medidas combinadas según modos.

Año	Modo 1		Modo 2		Modo 3	
	Cambio de Catalizador	Renovación de la flota	Cambio de Catalizador	Renovación de la flota	Cambio de Catalizador	Renovación de la flota
2012	50%	10%	20%	10%	20%	20%
2013	55%	20%	25%	20%	20%	20%
2014	60%	30%	30%	30%	20%	20%
2015	65%	40%	35%	40%	20%	20%
2016	70%	50%	40%	50%	20%	20%
2017	75%	60%	45%	50%	20%	20%
2018	80%	60%	50%		20%	20%
2019	80%	60%				
2020	80%	60%				

### 5.3.2. Beneficios Ambientales

Los beneficios ambientales, en términos de reducciones de cada contaminante se presentan en la Tabla 1.30. La reducción se estimó con base en las toneladas acumuladas de cada contaminante con la implementación de la medida en comparación con el escenario tendencial.

**Tabla 1.30.** Reducciones totales para la flota de gasolina y para cada contaminante debido a la implementación de las medidas combinadas.

Modo	Reducción en las emisiones acumuladas (2008-2020)				
	CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	COT	PM
Modo 1	-7%	18%	9%	19%	-6%
Modo 2	-6%	16%	7%	18%	-6%
Modo 3	-5%	14%	6%	16%	-5%

Nota: el signo negativo (-) en las emisiones de CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> se refiere a un aumento en las emisiones de este contaminante.

### 5.3.3. Costos

En la Tabla 1.31 se presenta el costo total de implementar la medida en los diferentes modos analizados, asimismo se presenta el costo por unidad de contaminante reducido para CO, NO<sub>x</sub> y COT.

**Tabla 1.31.** Costo total y costo por tonelada de contaminante reducida.

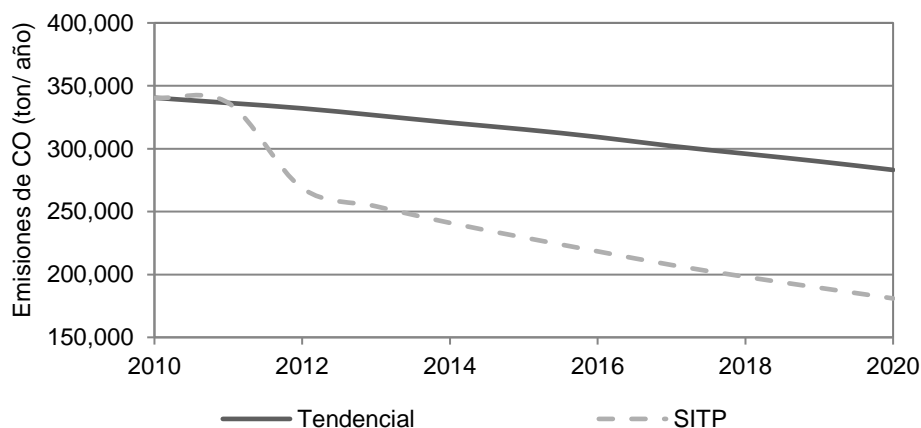
Modo	Costos (\$MM)	Costo eficiencia (\$M/ton)		
		CO	NOx	COT
Modo 1	12,960	18	568	160
Modo 2	11,930	18	614	155
Modo 3	9,700	17	643	145

\$MM: Miles de Millones de pesos; \$M: Millones de pesos.

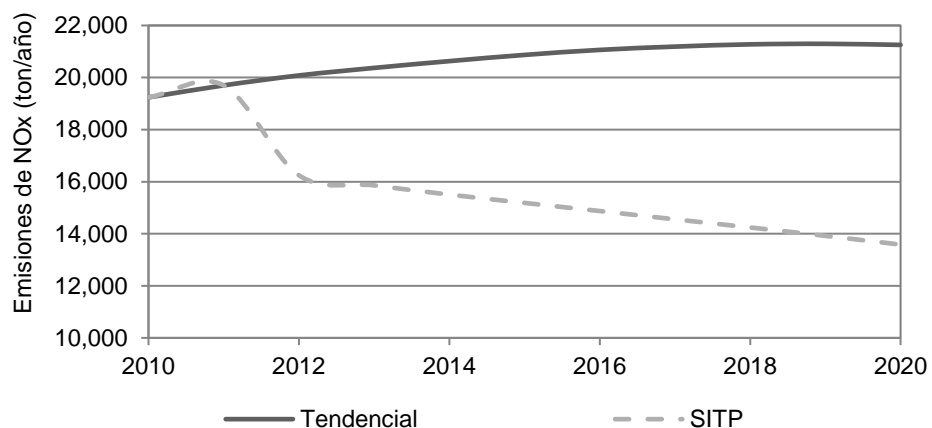
#### 5.4. Reducción de los Factores de Actividad Debido a la Implementación de SITP

Parte de los posibles efectos que puede llegar a tener la implementación de un sistema integrado de transporte público es el desincentivo en el uso del automóvil particular. Si bien, de acuerdo con la tasa de motorización existe un crecimiento económico que genera un aumento en el número de vehículos que circulan por la ciudad, este no se traduce en un incremento del factor de actividad de los mismos bajo este escenario. De hecho la implementación del SITP supone que la participación de los vehículos privados en el total de los viajes que se mueven en la ciudad no superará el 16%, cifra que contrasta con las proyecciones en el escenario tendencial que sugieren que dicha participación podría alcanzar el 24% al finalizar el decenio.

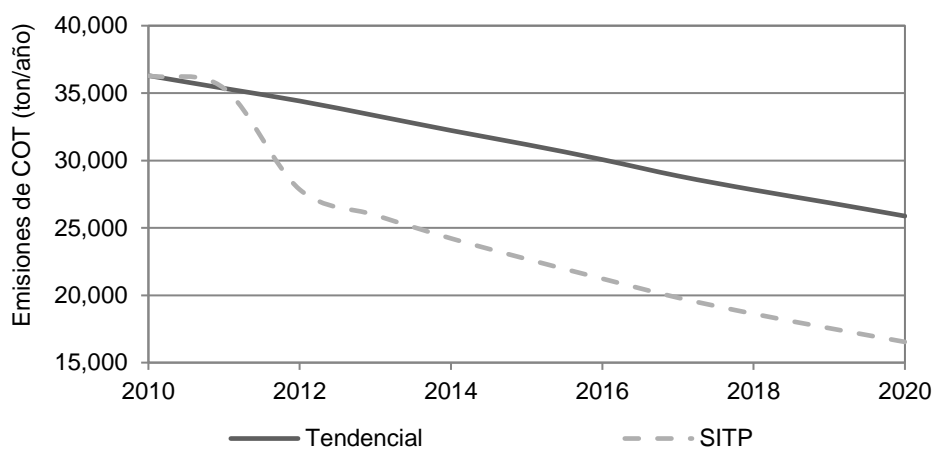
A continuación se presentan las reducciones asociadas al cambio en el uso de transporte particular para CO, NO<sub>x</sub>, THC y PM que podría generarse con la implementación del SITP. Cabe anotar que las reducciones que se presentaron anteriormente para el escenario SITP en las medidas para transporte público no consideran el cambio en las emisiones de vehículos particulares. En estas gráficas se presentan las emisiones de los vehículos particulares suponiendo la reducción en el factor de actividad mencionada anteriormente en comparación con las emisiones de este sector en el escenario tendencial.



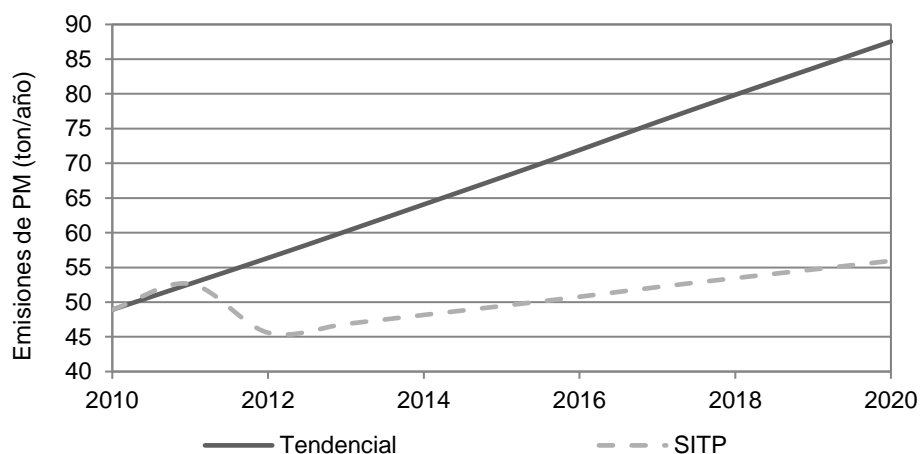
**Figura 1.42.** Emisiones de CO de vehículos particulares con la implementación del SITP.



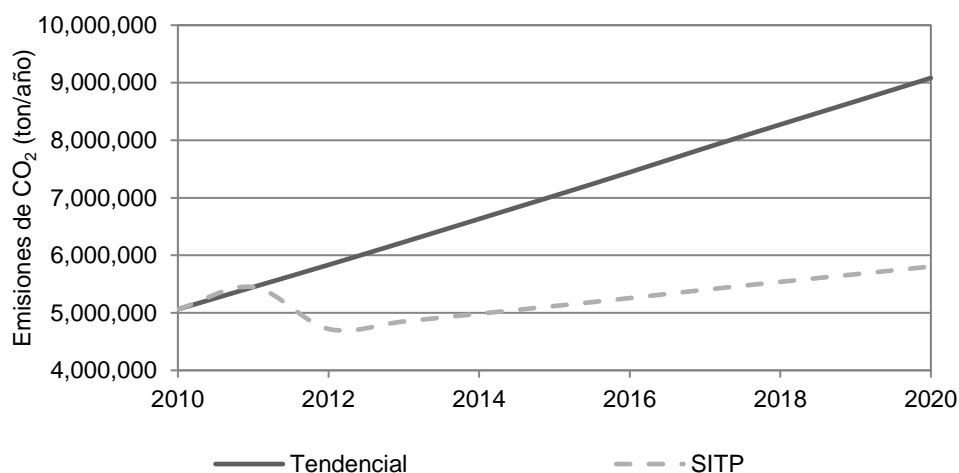
**Figura 1.43.** Emisiones de NO<sub>x</sub> de vehículos particulares con la implementación del SITP.



**Figura 1.44.** Emisiones de THC de vehículos particulares con la implementación del SITP.



**Figura 1.45.** Emisiones de PM de vehículos particulares con la implementación del SITP.



**Figura 1.46.** Emisiones de CO<sub>2</sub> de vehículos particulares con la implementación del SITP.

### 5.5. Medidas Tendientes a Mejorar el Desempeño de las Motocicletas

El parque de motos en Bogotá está conformado por 120,000 motocicletas aproximadamente y según las proyecciones del crecimiento este valor puede llegar a triplicarse en los próximos diez años.

El aporte de las motocicletas al inventario de PM de fuentes móviles es comparable al de la flota de camiones, aportando cerca del 20% de las emisiones de este contaminante. Dentro de este grupo, las motocicletas que cuentan con motor de dos tiempos, representan alrededor del 10% de las motos de la ciudad, pero aportan más del 20% de las emisiones de PM de esta categoría vehicular.

A nivel nacional se han realizado diferentes acciones con el fin de restringir la adquisición y la circulación de las motocicletas que utilizan motores de dos tiempos. Para el caso de Bogotá, según el Decreto 35 de 2009, a partir del año 2009 no podrán registrarse en la ciudad motocicletas con motor de dos tiempos y su tránsito estará restringido a partir del año 2011.

En el PDDB como complemento a las medidas ya mencionadas, se proponen medidas para las motos con motor a cuatro tiempos. El 90% de las motocicletas de la ciudad hacen parte de la categoría M2, y dentro de ésta el 95% corresponde a las motos con cilindraje inferior o igual a 250 c.c.

Según la literatura científica, el factor de emisión (FE) de PM de una moto típica de cuatro tiempos puede ser incluso mayor al de un vehículo de pasajeros de gasolina (dada la diferencia en los sistemas de control de emisiones, entre otros aspectos), y si bien para otros contaminantes criterio el FE es inferior en las motocicletas, el creciente número de fuentes en la ciudad hace que sea un sector a considerar en el plan de descontaminación.

Las tecnologías disponibles para reducir las emisiones de las motos se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- Mejoras relacionadas con la operación: mejora en la alimentación del combustible mediante la implementación de sistemas de inyección de combustible (fuel injection).
- Mejora en el diseño de la cámara de combustión, optimización de los tiempos de chispa y mejora del proceso de intercambio de aire.

- Instalación de sistemas de control de emisiones, específicamente de convertidores catalíticos oxidativos que controlan las emisiones de hidrocarburos y CO.

Las modificaciones al motor y la inclusión de sistemas de control de emisiones hacen parte del proceso de producción de las motos antes de que estas salgan al mercado en países con economías desarrolladas (European Commission, 2008). Exigir que las motos vendidas en el país cumplan con estos estándares hace parte de las recomendaciones para reducir las emisiones provenientes de este sector de la flota.

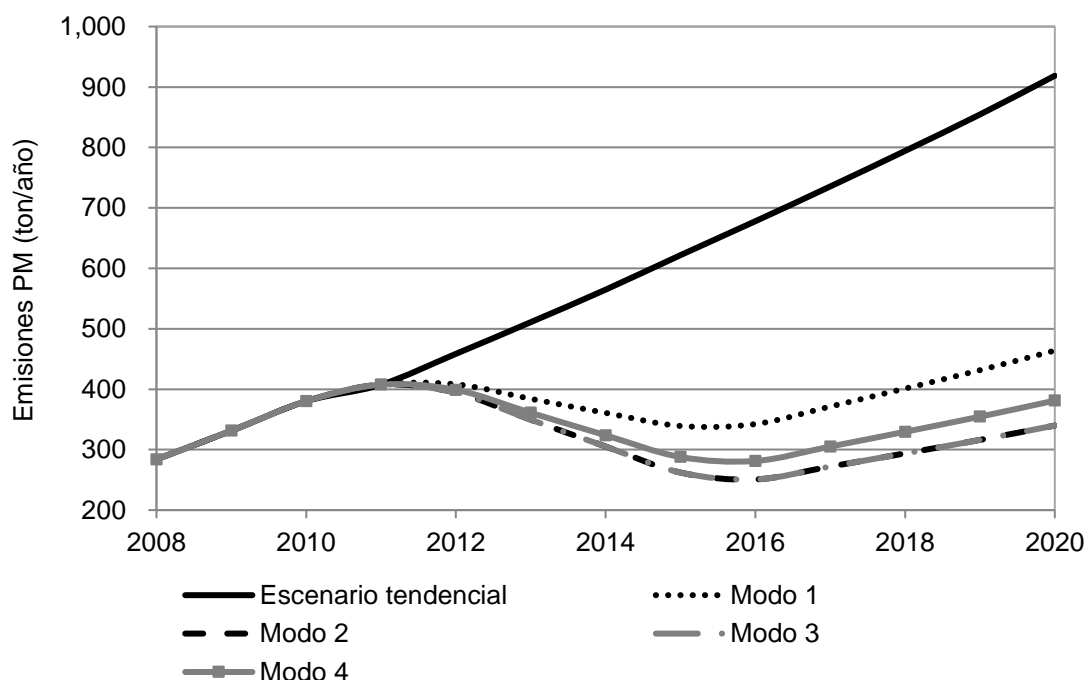
#### 5.5.1. Modos de Implementación

Se diseñaron cuatro modos de implementación de la medida en los que se varía el sistema de control de emisiones, según como se presenta a continuación. Los sistemas de control de emisiones se instalarían en todas las motocicletas de la categoría M2. Asimismo, la medida supone que las motocicletas nuevas tendrían el mismo sistema de control que se haya seleccionado o un sistema equivalente de reducción de emisiones.

- Modo 1: Instalar catalizadores oxidativos (OC).
- Modo 2: Instalar catalizadores de tres vías (TWC).
- Modo 3: Instalar catalizadores y un sistema de inyección secundario de aire (SAI).
- Modo 4: Instalar catalizadores oxidativos y un sistema de inyección secundario de aire.

#### 5.5.2. Beneficios Ambientales

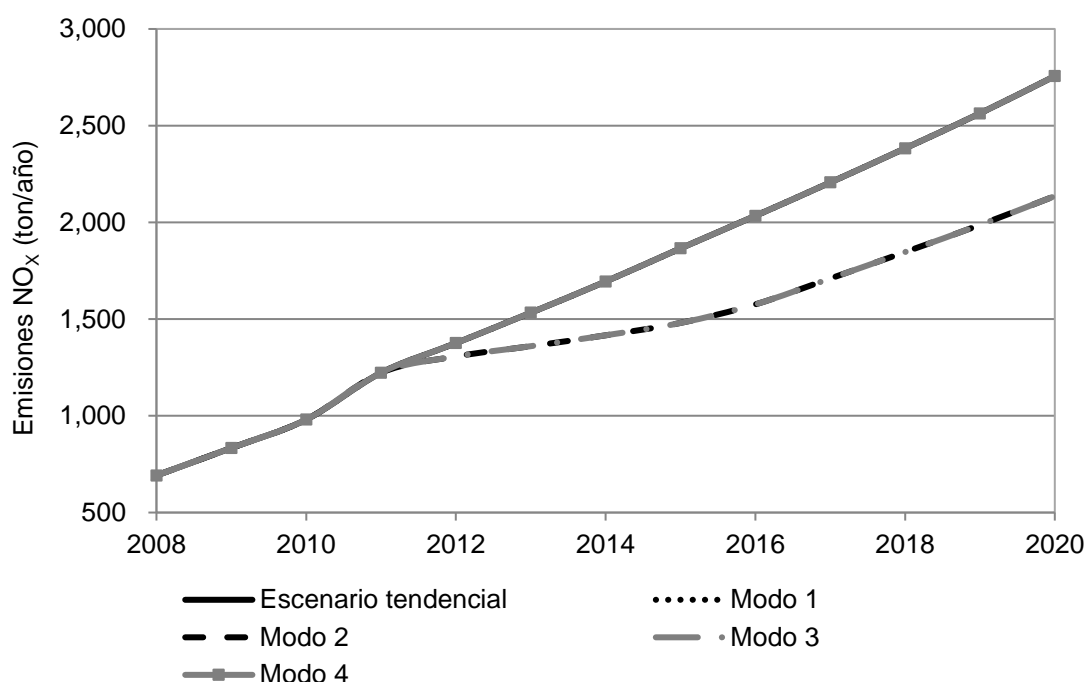
En las figuras 1.47 a 1.51 se presenta el impacto de la medida y sus diferentes modos de implementación en las emisiones de los contaminantes de la flota de motocicletas de la ciudad, en comparación con las emisiones que presenta este mismo grupo en el escenario tendencial.



**Figura 1.47.** Emisiones de PM de la flota de motocicletas de la ciudad.

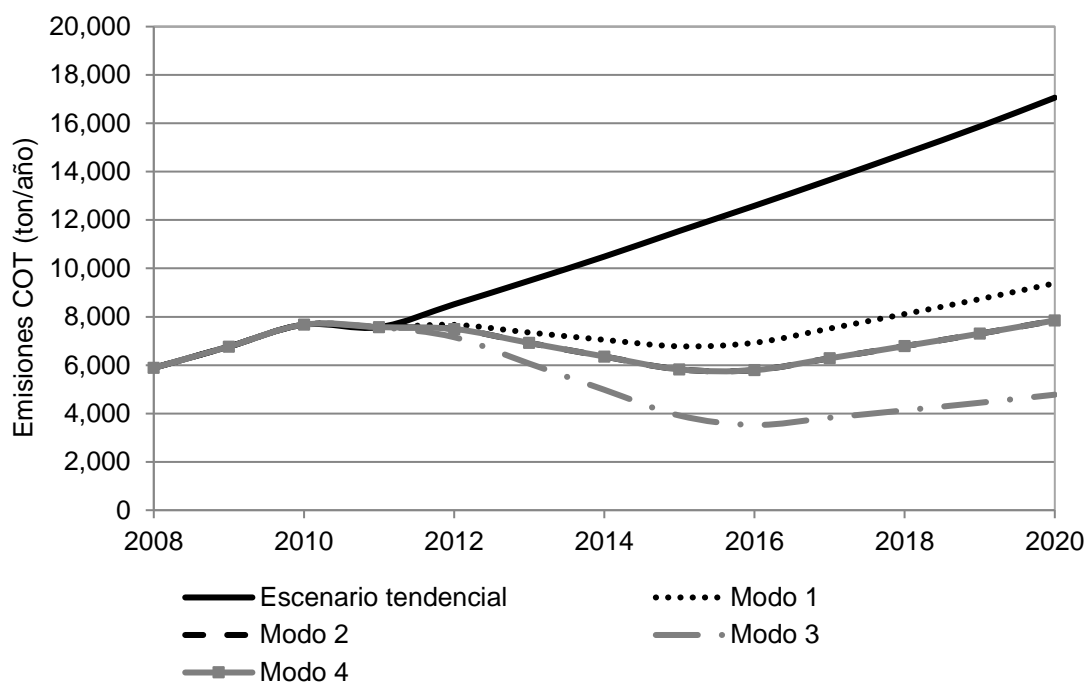


En la Figura 1.47 se muestra la tendencia de las emisiones de PM de las motocicletas para los diferentes modos de implementación de la medida. En el escenario tendencial para las motocicletas no se tuvo en cuenta ninguna eventual mejora en la tecnología que reduzca los factores de emisión de ningún contaminante. Es por esto que las emisiones en el escenario tendencial crecen al ritmo de la motorización de ésta categoría. De las otras cuatro líneas se puede ver un claro efecto en las emisiones de material particulado sin importar el tipo de equipo de control de emisiones que se emplee. El modo 2 y el modo 3 presentan el mismo comportamiento debido a que las diferencias en estos dos modos radican únicamente en la instalación de una inyección secundaria de aire (SAI). El aumento en los últimos años se debe al continuo crecimiento en la motorización causando así que las reducciones asociadas a los sistemas de control de emisiones no superen el efecto del aumento en el número de fuentes.



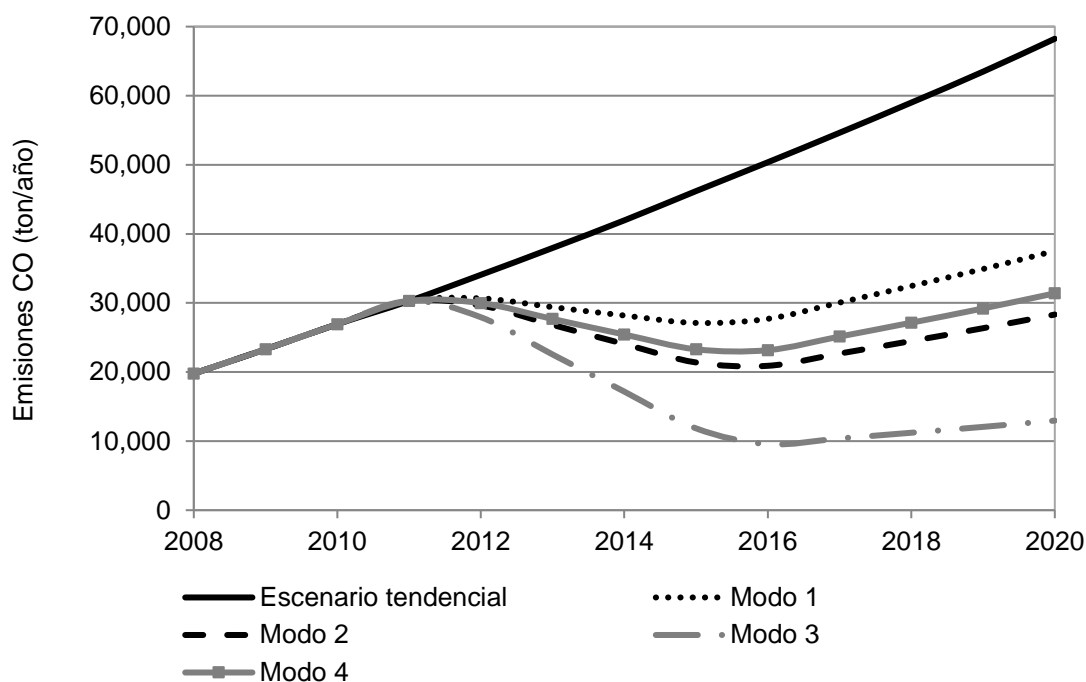
**Figura 1.48.** Emisiones de  $\text{NO}_x$  de la flota de motocicletas de la ciudad.

En la Figura 1.48 es posible observar que los modos 1 y 4 no tienen ningún efecto sobre las emisiones de  $\text{NO}_x$  mientras que los modos 2 y 3 representan una reducción progresiva en las emisiones durante todos los años hasta el 2020.

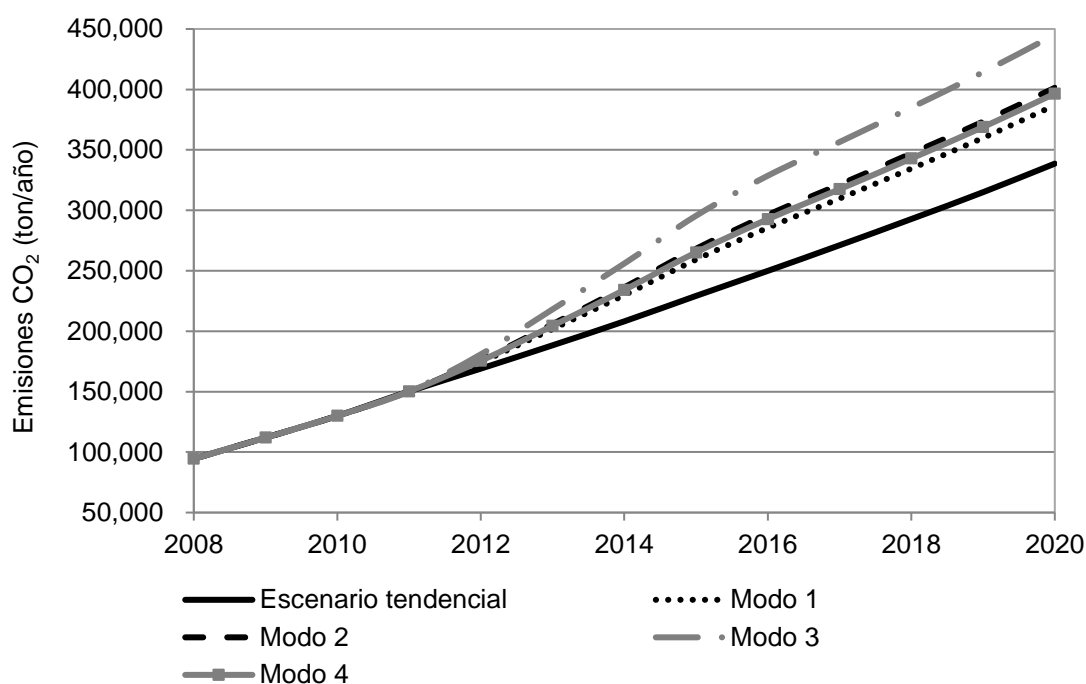


**Figura 1.49.** Emisiones de COT de la flota de motocicletas de la ciudad.

En la Figura 1.49 se presenta la evolución de los efectos en las emisiones totales de COT por parte de las motocicletas. Los resultados muestran las diferencias en las eficiencias de los distintos equipos de control de emisión empleados. Las emisiones de COT son un ejemplo del efecto que tiene la instalación de una inyección secundaria de aire (SAI) ya que los modos 2 y 3 muestran una clara diferencia en los resultados. Para este contaminante el escenario tendencial es creciente. Sin embargo, existe un efecto diferente entre los años 2010 y 2011 debido a que según la normativa nacional saldría de circulación las motocicletas que usan un motor de dos ciclos. Un comportamiento similar se ve para las emisiones de monóxido de carbono (ver Figura 1.50).



**Figura 1.50.** Emisiones de CO de la flota de motocicletas de la ciudad.



**Figura 1.51.** Emisiones de CO<sub>2</sub> de la flota de motocicletas de la ciudad.

En la Figura 1.51 se presentan los cambios en las emisiones totales de CO<sub>2</sub> cuando se instala alguno de los equipos de control de emisiones propuestos en los diferentes modos de implementación de las medidas. El escenario tendencial muestra una vez más un crecimiento continuo a lo largo del horizonte de estudio relacionado con el aumento en el número de fuentes. Resulta evidente que para todos los sistemas de control evaluados en esta medida, aumentan las emisiones de CO<sub>2</sub>. Esto se debe a que al incrementar la eficiencia de oxidación de gases de escape como CO y COT se produce un aumento en la formación de dióxido de carbono.

En la Tabla 1.32 se presentan la reducción en las emisiones acumuladas (2008-2020) de las motocicletas con la implementación de la medida en comparación con las emisiones de esta categoría vehicular bajo el escenario tendencial.

**Tabla 1.32.** Reducciones totales para cada contaminante.

Modo	Reducción en las emisiones acumuladas (2008-2020)				
	CO <sub>2</sub>	CO	NOx	COT	PM
Modo 1	-10%	32%	0%	31%	35%
Modo 2	-13%	42%	16%	38%	44%
Modo 3	-22%	58%	16%	50%	44%
Modo 4	-12%	38%	0%	38%	41%

Nota: el signo negativo (-) en las emisiones de CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> se refiere a un aumento en las emisiones de éste contaminante.

### 5.5.3. Costos

Los costos unitarios de los sistemas de control de emisiones se identificaron en literatura internacional (ver Tabla 1.33). En la Tabla 1.34 se presentan los costos totales de la medida y los costos por tonelada de PM reducida. Teniendo en cuenta que una restricción para la instalación de convertidores catalíticos es que las motocicletas sean de inyección, en el costo de este sistema de control se incluyó el costo asociado al cambio hacia el sistema de inyección.

**Tabla 1.33.** Costos unitarios de los sistemas de control de emisiones.

Sistema de control de emisiones	Costo unitario
Catalizador oxidativo	\$90,000
Convertidor catalítico TWC	\$660,000
Convertidor catalítico + Sistema de inyección de aire	\$760,000
Catalizador oxidativo + Sistema de inyección de aire	\$190,000

Fuente: CERT, 2008.

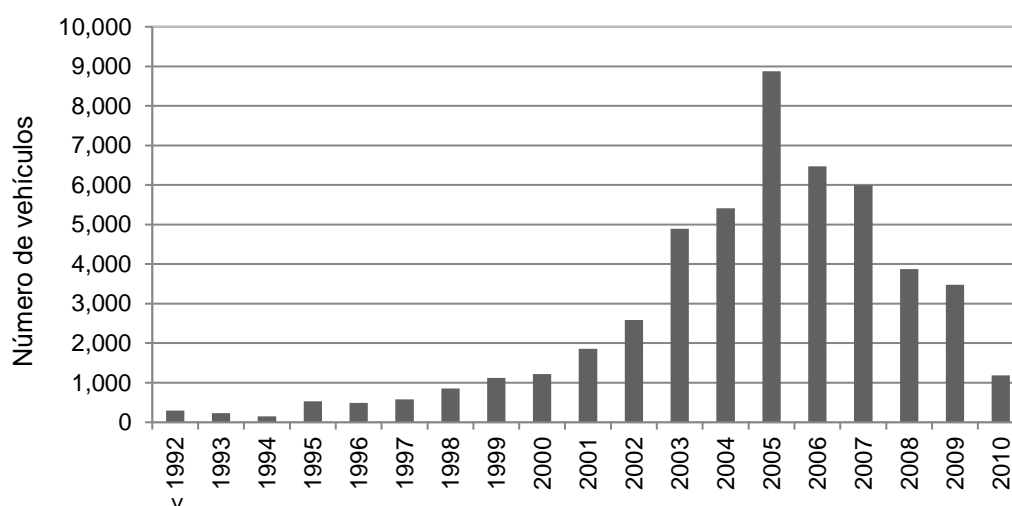
**Tabla 1.34.** Costo total.

Modo de implementación	Costo total (millones de pesos)	Costo por tonelada de PM (millones de pesos/ton PM)
Modo 1	33,000	13
Modo 2	242,000	72
Modo 3	279,000	83
Modo 4	79,000	25

## 5.6. Medidas Tendientes a Mejorar el Desempeño de los Taxis

Actualmente la flota de taxis está compuesta por cerca de 52,000 vehículos (equivalentes al 5% del parque automotor de Bogotá), los cuales ocupan el 32% de la red vial para transportar el 5% de los viajes. En el año 1993, con la expedición del Decreto 613, el Distrito intentó controlar el fenómeno de la sobreoferta congelando de forma indefinida el número de cupos para el transporte público individual (TPI) en 36,000, suponiendo una tasa de 1 taxi por cada 200 habitantes para calcular la oferta requerida por la ciudad. Sin embargo, hasta la fecha no parece haberse respetado el veto y la expedición tanto de tarjetas de operación como de cupos ha aumentado. De los 52,000 taxis existentes, cerca del 60% usan gasolina como combustible mientras los restantes emplean Gas Natural Vehicular (GNV).

A pesar de que el problema de sobreoferta es evidente, no ocurre así con el de antigüedad de la flota. Tal como se aprecia en la **Error! Reference source not found.53** la edad promedio de los taxis no supera los 5 años ya que la dinámica del mercado se encarga de renovar constantemente el parque. Lo anterior debido a que las máquinas están supeditadas a grandes jornadas de trabajo que desgastan con mayor rapidez el vehículo y hacen que pierdan rentabilidad rápidamente, pues los dueños deben asumir cada vez costos más altos de operación y mantenimiento.



**Figura 1.52.** Distribución de frecuencia de los modelos de la flota de taxis bogotana.

Entre las medidas específicas que se sugieren para reducir las emisiones del Transporte Público Individual (TPI) se encuentran las siguientes:

- Modificación del factor de actividad:** Los taxis son los vehículos livianos que más kilómetros recorren anualmente entre aquellos que usan GNV y gasolina, con cerca de 89,000 Km/año por vehículo. Sin embargo, según encuestas adelantadas por el Centro de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional de la Universidad de los Andes, los conductores de TPI afirman que cerca del 30% del tiempo de circulación están sin pasajero.

Considerando que el parque automotor de taxis recorre cerca de 12.5 millones de kilómetros al día, existe una posibilidad de estandarizar los métodos de búsqueda y recolección de pasajeros para lograr una reducción de 4 millones de kilómetros, lo cual representaría un descenso proporcional en las emisiones provenientes de esta flota.

Para lograr esta reducción en el factor de actividad es necesario:

- Reactivar el programa de Zonas Amarillas, que a pesar de ser avalado por el Decreto 1253 de 1997 tiene ciertas inconsistencias con el Plan de Ordenamiento Territorial de la ciudad, el cual ha interpuesto barreras a la promoción de estas zonas.
  - Promover una operación en la que sea prioritaria la búsqueda de pasajeros a través de tecnologías de información (radioteléfono o ubicación satelital) y evitar así los tiempos prolongados de circulación para cumplir este propósito.
  - Formalizar los esquemas de contratación de los conductores de TPI para disminuir la recurrencia de turnos de trabajo de más de 12 horas. Actualmente los turnos largos (14 – 16 horas) representan el 70% de la actividad global del parque.
- b. Modificación del número de fuentes: Dotar de las suficientes herramientas de seguimiento y control a las autoridades pertinentes para combatir delitos como la expedición ilegal de cupos y de tarjetas de operación, y la utilización de un sólo cupo por parte de dos vehículos distintos (fenómeno conocido como “gemeleo”). Además, se considera necesario definir una metodología clara para modelar la demanda de TPI y de esta forma garantizar la expedición de los cupos que requiera la ciudad.
- c. Modificación de factores de emisión: Se aconseja implementar medidas equivalentes a las recomendadas para los vehículos livianos particulares, en especial aquellas tendientes a implementar sistemas de control de emisiones. Una ventaja operativa de este tipo de estrategias para el parque de TPI podría ser la existencia de canales administrativos que permitirían hacerle un mejor seguimiento a la implementación de las tecnologías de control, dentro de los plazos y condiciones que llegaren a implementarse.

## 6. CONCLUSIONES

Del análisis de la situación actual de fuentes móviles y de los programas y proyectos susceptibles de ser implementados para mejorar la calidad del aire en Bogotá en la próxima década, se subrayan las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Actualmente las fuentes móviles tienen una participación muy importante en el inventario de emisiones de la ciudad. Ellas representan, por ejemplo, el 55% del total de emisiones de PM. Este escenario, aunado a la injerencia de este tipo de fuentes en los fenómenos de exposición personal, hace que la gestión sobre las mismas deba ser prioritaria para la ciudad.
- La implantación del SITP tal como lo ha planteado la Administración Distrital tiene un impacto significativo en la calidad del aire.
- El esquema institucional del SITP y sus costos ya han sido definidos dentro de la política de transporte. Este proyecto se constituye en el principal desafío del Distrito en términos de movilidad. Su implantación genera una externalidad positiva y necesaria para el éxito del Plan de Descontaminación de Bogotá.
- El uso de tecnologías de control de emisiones permitiría una disminución hasta del 85% de las emisiones anuales de PM provenientes de la flota de transporte público y hasta el 60% de las emisiones anuales del transporte de carga.
- En lo relacionado con los vehículos particulares, mayoritariamente de gasolina, diversos programas permitirán una reducción importante de las emisiones. Aunque se prevé un fuerte aumento en la adquisición de vehículos privados en la próxima década, con una política urbana integral basada en el mejoramiento de la calidad del transporte público y el desestimulo del automóvil, se podría generar una disminución significativa en el factor de actividad (en términos de viajes anuales) de los vehículos de gasolina. Esta podría llegar a representar una disminución del 30% en las emisiones de THC, CO y NOx en el año 2020 y con respecto al escenario tendencial.
- Por otro lado, la disminución de la edad promedio de los vehículos privados aunada con una política de instalación y renovación constante de convertidores catalíticos permitiría alcanzar una reducción en las emisiones acumuladas de CO, NOx y THC hasta de 19%, 9% y 19% respectivamente.

## REFERENCIAS

Association of European automobile manufacturers (ACEA). 2000. ACEA data of the sulphur effect on advanced emission control technologies.

Acevedo, J., Bocarejo, J., Lleras, G., Echeverri, J., Ospina, G., Rodríguez, A. 2008. El transporte como soporte al desarrollo de Colombia. Una visión al 2040. Universidad de los Andes.

Ardila, A. 2005a. La olla a presión del transporte público en Bogotá. En: Revista de Ingeniería. (21).

Ardila, A. 2005. Study of urban public transport conditions in Bogotá, Colombia.

Cámara de Comercio de Bogotá (CCB). 2009. Observatorio de Movilidad. Número 3.

Cámara de Comercio de Bogotá (CCB). 2008. Observatorio de movilidad de la ciudad y la región. Reporte Anual Ministerio de Transporte, Ministerio de Hacienda y Crédito Público. 2003. Documento CONPES 3260. Política Nacional de Transporte Urbano y Masivo.

Contraloría de Bogotá. 2007. Control Fiscal de Advertencia. “En los últimos tres años, la sobreoferta en el transporte colectivo, en lugar de disminuir, aumentó”.

Contraloría de Bogotá. 2007. La política de movilidad encaminada a reducir la sobreoferta seguirá inmovilizada.

Corporación de Soluciones Energéticas Integrales S.A. (COSENIT). 2006. La importancia del combustible como elemento decisorio en la escogencia de las flotas de los proyectos del Sistema Integrado de Transporte Masivo: Conclusiones del estudio elaborado para el Ministerio de Transporte.

Empresa de Transporte del Tercer Milenio S.A. (TRANSMILENIO S.A.). 2009. Resumen ejecutivo del diseño operacional de las zonas del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP).

Environmental Protection Agency (EPA), Office of Transportation and Air Quality. 2003. Mobile 6.1 Particulate Emission Factor Model Technical Description: Final Report. EPA 420-R-03-001.

Environmental Protection Agency (EPA), Office of Transportation and Air Quality. 2002. A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions: Draft Technical Report. EPA 420-P-02-001.

Environmental Protection Agency (EPA). 2007. Diesel Retrofit Technology. An Analysis of the Cost-Effectiveness of Reducing Particulate Matter and Nitrogen Oxides Emissions from Heavy-Duty Nonroad Diesel Engines Through Retrofits.

Environmental Protection Agency (EPA). 2007a. The Cost-Effectiveness of Heavy-Duty Diesel Retrofits and Other Mobile Source Emission Reduction Projects and Programs.

Environmental Protection Agency (EPA). 2003. Technical Highlights: Questions and Answers on Using a Diesel Oxidation Catalyst in Heavy-duty Trucks and Buses.

Environmental Protection Agency (EPA). 2003a. Technical Highlights: Questions and Answers on Using a Diesel Particulate Matter Filter in Heavy-Duty Trucks and Buses.



Espinosa, M. y Behrentz, E. 2007. Caracterización de los rangos de exposición a contaminantes atmosféricos en Bogotá: Estudio Piloto. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

European commission, 2008. Study on possible new measures concerning motorcycle emissions. Final Report.

Gómez, Julián. 2008. Un modelo teórico de tasas de motorización. Universidad de los Andes. Bogotá.

Huan, L., Kebin, H., Dongquan, H., Lixin, F., Yu, Z., Walshc, M., Blumberg, K. 2008. Analysis of the Impacts of fuel sulfur on vehicle emissions in China. En: Fuel. 87: 3147-3154.

International Sustainable Systems Research Center (ISSRC). 2008. IVE Model Users Manual, Versión 2. Consultado en: <http://www.issrc.org/>

Kousoulidou, M., Ntziachristos, N., Mellios, G. y Samaras, Z. 2008. Road-transport emission projections to 2020 in European urban environments. Atmospheric Environment 42, 7465–7475

Manufacturers of Emission Controls Association (MECA). 2009. Retrofitting emission controls for diesel powered vehicles.

Manufacturers of Emission Controls Association (MECA). 2008. Emission control of two and three Wheel vehicles.

Manufacturers of Emission Controls Association (MECA). 2006. Retrofitting Emission Controls for Diesel-Powered Vehicles.

Ministerio de Transporte, Grupo de Investigación y Desarrollo en Transporte. 2006. Parque automotor de carga en Colombia.

Sabin, L., Kozawa, K, Behrentz, E, Winer, A., Fitz, D., Pankratz, D., Colome, S. y Fruin, S. 2005. Analysis of real-time variables affecting children's exposure to diesel-related pollutants during school bus commutes in Los Angeles. Atmospheric Environment 39, 5243–5254

Secretaría Distrital de Ambiente, Grupo de Estudio en Sostenibilidad Urbana y Regional. 2008. Definición de Elementos Técnicos para la Formulación de Políticas encaminadas al mejoramiento de la Calidad del Aire de Bogotá.

Secretaría Distrital de Movilidad (SDM). 2009. Sistema Integrado de Transporte Público: Modelo Funcional y Operativo. Consultado en: [www.transmilenio.gov.co](http://www.transmilenio.gov.co).

Secretaría Distrital de Tránsito (SDT). 2007. Capacidad Transportadora de las empresas de transporte público. En: Circular No 002 de 2007 dirigida a las empresas de transporte público de la ciudad.

Tomohara, A., Xue, J. 2009. Motorcycles retirement program: Choosing the appropriate regulatory framework. En: Journal of Policy Modeling. 31: 126-129.

Rodríguez, P y Behrentz, E. 2009. Actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá a través de mediciones directas. *Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR), Universidad de Los Andes*.

Yao, Y., Tsai, J., Chiang, H. 2009. Effects of ethanol blended gasoline on air pollutant emissions from motorcycle. En: *Science of the Total Environment*. 407: 5257-5262.

**PLAN DECENAL DE DESCONTAMINACIÓN DE BOGOTÁ**

**PARTE B - DOCUMENTO DE TRABAJO**

**SECCIÓN 2 – ANÁLISIS DE MEDIDAS PARA EL SECTOR INDUSTRIAL**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. ASPECTOS GENERALES</b>	1
<b>2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES</b>	2
<b>3. METODOLOGÍA</b>	3
3.1. Estimación de la Línea Base de Emisiones	3
3.1.1. <i>Clasificación de las Fuentes según los Sectores de la Industria Manufacturera</i>	5
3.2. Proyección de las Emisiones	5
3.3. Análisis de las Medidas de Reducción de Emisiones para el Sector Industrial	6
3.3.1. <i>Uso Masivo de Gas Natural en la Industria</i>	6
3.3.2. <i>Uso de Sistemas de Control de Emisiones</i>	7
3.3.3. <i>Conversión de Carbón a Gas Natural y Formalización de una Fracción del Sector Informal de la Industria</i>	10
3.3.4. <i>Uso de Sistemas de Control de Emisiones en las Industrias del Sector Ladrillero y Reubicación de fuentes</i>	10
3.4. Suposiciones y consideraciones del análisis de las medidas del sector industrial	11
<b>4. RESULTADOS</b>	13
4.1. Emisiones del Sector Industrial para el Año Base	13
4.1.1. <i>Emisiones por Sectores de la Industria Manufacturera</i>	15
4.2. Proyección de las Emisiones	16
4.3. Medidas de Reducción de Emisiones para el Sector Industrial	18
4.3.1. <i>Uso Masivo de Gas Natural en la Industria</i>	18
4.3.2. <i>Uso de Sistemas de Control de Emisiones</i>	22
4.3.3. <i>Conversión de Carbón a Gas Natural y Formalización de una Fracción del Sector Informal de la Industria</i>	27
4.3.4. <i>Uso de Sistemas de Control de Emisiones en Industrias del Sector Ladrillero y Reubicación de Fuentes</i>	28
4.3.5. <i>Comparación de las Medidas</i>	29
4.4. Instrumentos e Incentivos para Implantar las Medidas Propuestas	30
<b>5. CONCLUSIONES</b>	32
REFERENCIAS	33

ANEXO 2.1. Clasificación de los sectores productores según código CIU.

ANEXO 2.2. Estimación de la tasa de crecimiento del PIB real de Bogotá.

ANEXO 2.3. Características de los sistemas de control de emisiones.

ANEXO 2.4. Participación de las categorías industriales según el número de fuentes y según su consumo energético.

ANEXO 2.5. Coeficientes de emisión para material particulado, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos totales y dióxido de carbono.

ANEXO 2.6. Proyección de emisiones para los tres escenarios de crecimiento del PIB.

ANEXO 2.7. Competitividad del gas natural en la industria.

ANEXO 2.8. Proyección de emisiones para la medida de uso masivo de gas natural en la industria más la formalización del 50% de las fuentes industriales

ANEXO 2.9. Metodología empleada para complementar la línea base de emisiones del sector industrial

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Aporte de las categorías industriales en la emisión de contaminantes. ....	14
Figura 2.2. Aporte de los sectores industriales en la emisión de contaminantes. ....	15
Figura 2.3. Proyección de emisiones de material particulado.....	17
Figura 2.4. Proyección de emisiones de óxidos de nitrógeno.....	17
Figura 2.5. Proyección de emisiones de compuestos orgánicos totales.....	17
Figura 2.6. Proyección de emisiones de dióxido de carbono.....	17
Figura 2.7. Emisiones de material particulado en los escenarios de uso de gas .....	19
Figura 2.8. Emisiones de óxidos de nitrógeno en los escenarios de uso masivo de gas natural en la industria.....	19
Figura 2.9. Emisiones de compuestos orgánicos totales en los escenarios de uso masivo de gas natural en la industria. ....	20
Figura 2.10. Emisiones de dióxido de carbono en los escenarios de uso masivo de gas natural en la industria.....	20
Figura 2.11. Emisiones de material particulado en los escenarios de implementación de sistemas de control de emisiones en la industria. ....	26
Figura 2.12. Emisiones de material particulado con la aplicación de la medida.....	29

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Categorías de las fuentes industriales de Bogotá.....	3
Tabla 2.2. Factores de emisión utilizados en la estimación del inventario de emisiones. ....	4
Tabla 2.3. Factores de emisión utilizados en la evaluación del uso masivo de gas natural ...	7
Tabla 2.4. Sistemas de control de emisiones y número de registro EPA.....	8
Tabla 2.5. Condiciones de las fuentes de emisión por categoría industrial.....	8
Tabla 2.6. Carga media de contaminantes por categoría de la industria. ....	9
Tabla 2.7. Periodo de formalización de la industria. ....	10
Tabla 2.8. Implementación de las medidas: ubicación de ladrilleras fuera del perímetro urbano e implementación de sistemas de control de emisiones.....	11
Tabla 2.9. Emisiones del sector industrial para el año base.....	13
Tabla 2.10. Tasas de crecimiento utilizadas en la proyección de las emisiones.....	16
Tabla 2.11. Comparación emisiones anuales 2008-2020.....	16
Tabla 2.13. Periodo de implementación del uso de gas natural en la industria para cada escenario. ....	18
Tabla 2.14. Reducción alcanzada por el uso masivo de gas natural en la industria en las emisiones en el año 2020 para cada escenario. ....	18
Tabla 2.15. Costo por escenarios del uso masivo de gas natural en la industria.....	21
Tabla 2.16. Costo por unidad de tonelada de PM reducida.....	21
Tabla 2.17. Costo capital de los sistemas de control de emisiones considerados en el análisis.....	24
Tabla 2.18. Meta de reducción de emisiones de PM por categoría de la industria para el Escenario 1.....	25
Tabla 2.19. Gradualidad en la implementación de la medida por escenarios. ....	25
Tabla 2.20. Costos de implementación de sistemas de control de emisiones. ....	26
Tabla 2.21. Costos por tonelada de PM reducida.....	26
Tabla 2.22. Reducción en las emisiones del año 2020 por formalizar el 50% de las fuentes industriales más la aplicación de los escenarios de implementación de gas natural. ....	27
Tabla 2.23. Beneficio adicional en la reducción de emisiones con la aplicación de la medida de uso masivo de gas natural con la introducción del 50% de las fuentes informales de la ciudad al sector formal. ....	27
Tabla 2.24. Costo por escenarios de la formalización de una fracción del sector informal más uso masivo de gas natural en la industria.....	28
Tabla 2.25. Costo por tonelada de PM reducida. ....	28
Tabla 2.26. Reducción alcanzada al reubicar una fracción del sector ladrillero y aplicar sistemas de control de emisiones a la fracción remanente respecto al año 2020.....	28
Tabla 2.27. Costo por escenarios de la formalización de una fracción del sector informal más uso masivo de gas natural en la industria.....	28
Tabla 2.28. Costo por tonelada de PM reducida. ....	29
Tabla 2.29. Comparación de las medidas propuestas para el sector industrial. ....	30

## **1. ASPECTOS GENERALES**

Este documento constituye la Sección 2 (Análisis del sector industrial del Documento de Trabajo del Plan Decenal de Descontaminación de Bogotá). Dicho estudio se desarrolló en el marco del Contrato de Ciencia y Tecnología Número 1040 de 2008; celebrado entre la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), Transmilenio S.A. (TMSA) y la Universidad de los Andes.

En este informe se presentan las medidas propuestas para el plan decenal de descontaminación relacionadas con el sector industrial. De manera detallada se presenta la metodología utilizada así como los resultados de los análisis desarrollados.

## 2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Según el inventario de emisiones, las fuentes industriales tienen un aporte significativo en las emisiones de PM de la ciudad, siendo responsables de más del 40% de las mismas.

Como parte de los lineamientos técnicos del plan decenal de descontaminación (SDA-SUR, 2008), se identificaron los factores técnicos causantes de la contaminación y en especial los que son determinantes en la emisión de material particulado. Se identificó que la producción artesanal o semi-artesanal de ladrillos, la presencia de industrias que operan con combustibles sólidos y en ausencia de sistemas de control de emisiones, hacen parte de las medidas que deberían ser consideradas en el diseño de proyectos para reducir el problema de contaminación de la ciudad.

Con el fin de conocer la experiencia de otras ciudades en la implementación de medidas de reducción de la contaminación, se realizó una amplia revisión bibliográfica de planes de descontaminación de otras ciudades del mundo. En la revisión se incluyeron planes de California, Texas, Madrid, Quito, Reino Unido, Rio de Janeiro, Santiago de Chile y la Zona Metropolitana del Valle de México. Dicha revisión permitió identificar medidas y proyectos diseñados en otras partes, metodologías y herramientas técnicas de análisis utilizadas en la valoración de las medidas, y esquemas y herramientas de implementación de los proyectos. Esta información se utilizó en el diseño de las medidas y proyectos del PDDB.

Los planes de descontaminación responden a las necesidades específicas de cada ciudad. Las medidas y proyectos propuestos son función de los contaminantes que presentan los mayores niveles, las fuentes de emisión predominantes, el presupuesto disponible y la capacidad de las entidades encargadas de hacer seguimiento a las medidas, entre otros aspectos. La meta de los planes en algunos casos está relacionada con reducir los niveles de los contaminantes locales, y la prioridad es garantizar la protección de la salud de la población. Sin embargo, en ciudades en las que ya se tienen resueltos los problemas de contaminantes locales, los planes incluyen metas para reducir contaminantes globales, proteger la vegetación y ecosistemas, así como monumentos y patrimonio arquitectónico.

En general las medidas diseñadas para el sector de industria identificadas en la revisión de planes de descontaminación se podrían clasificar en alguna de las siguientes categorías: conservación de la energía y mejoramiento de la eficiencia energética, modernización de procesos productivos industriales, uso de combustibles más limpios, uso de sistemas de control de emisiones, planificación en el uso de los suelos y medidas de educación y concientización de la población. Una característica común en los planes analizados tiene que ver con el diseño de programas en el que se involucran diferentes sectores de la economía y por esto mismo se evidencia la importancia de la interacción entre autoridades del gobierno con diferente nivel de jurisdicción para garantizar la efectividad de los proyectos.

En esta sección se presentan los proyectos propuestos para el sector industrial de la ciudad como parte del plan de descontaminación de Bogotá. Las medidas para el sector industrial se enfocan principalmente en la reducción de las emisiones de material particulado y se diseñaron teniendo en cuenta dos enfoques: 1) Mejoras en la calidad del aire y 2) Reducción en los niveles de exposición de la población.



### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Estimación de la Línea Base de Emisiones

La línea base de las emisiones del sector industrial de Bogotá se estimó para el año 2008 partiendo de los resultados de la actualización del inventario de emisiones de la ciudad (SDA-SUR, 2008). Las fuentes industriales se categorizaron en 14 grupos según los equipos de combustión y el tipo de combustible empleado (ver Tabla 2.1). Se consideraron las emisiones de material particulado, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos totales y dióxido de carbono.

Para completar la información de emisiones de las categorías industriales que no cuentan con factores de emisión propios (e.d., aquellos que no fueron determinados en la primera fase del estudio), se utilizaron factores de emisión de la metodología AP-42 de la EPA (2008). Esta información permitió estimar las emisiones de las fuentes que operan con combustibles líquidos (fuel oil, diésel y GLP), así como las emisiones provenientes de fuentes que utilizan hornos a gas natural en procesos de fundición, incineración y cremación. De la misma manera, se utilizaron factores AP-42 para complementar la estimación de emisiones de COT y CO<sub>2</sub> (ver Tabla 2.2).

**Tabla 2.1.** Categorías de las fuentes industriales de Bogotá.

Categoría	Tecnología	Combustible
CG1	Caldera > 100 BHP (año de fabricación menor o igual a 1997)	Gas natural
CG2	Caldera > 100 BHP (año de fabricación mayor a 1997)	Gas natural
CG3	Caldera ≤ 100 BHP	Gas natural
HG1	Horno de alimentos	Gas natural
HG2	Horno de secado y curado	Gas natural
HG3	Horno de fundición, incineración y cremación	Gas natural
CC1	Caldera > 100 BHP	Carbón
CC2	Caldera ≤ 100 BHP	Carbón
HL	Horno ladrillero	Carbón
HC	Horno	Carbón
CTA	Caldera	Aceite usado
HFA	Horno fundición	Aceite usado
ACF	Caldera industrial y comercial > 15 BHP	Fuel oil residual (Fuel oil No. 5 y 6)
ACD	Caldera industrial y comercial > 15 BHP	Fuel oil destilado (Diésel )
AHF	Horno	Fuel oil destilado
GLP	Horno y caldera con aplicaciones industriales	Gas licuado de petróleo

**Tabla 2.2.** Factores de emisión utilizados en la estimación del inventario de emisiones industriales de Bogotá.

Categoría	Tecnología	Combustible	Factor de emisión				
			PM	COT	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	Unidades
CG1	Caldera > 100 BHP (año de fabricación menor o igual a 1997)	Gas natural	589	176	6,395	1,920,000	mg/m <sup>3</sup>
CG2	Caldera > 100 BHP (año de fabricación mayor a 1997)	Gas natural	237	176	788	1,920,000	mg/m <sup>3</sup>
CG3	Caldera ≤ 100 BHP	Gas natural	46	176	1,075	1,920,000	mg/m <sup>3</sup>
HG1	Horno de alimentos	Gas natural	196	176	1,221	1,920,000	mg/m <sup>3</sup>
HG2	Horno de secado y curado	Gas natural	196	176	1,221	1,920,000	mg/m <sup>3</sup>
HG3	Horno de fundición y cremación	Gas natural	30	176	1,504	1,920,000	mg/m <sup>3</sup>
ACF	Caldera industrial y comercial > 15 BHP	Fuel oil residual (Fuel oil No. 5 y 6)	1,200,000	173,100	6,600,000	3,000,000,000	mg/m <sup>3</sup>
ACD	Caldera industrial y comercial > 15 BHP	Fuel oil destilado (Diesel )	840,000	48,480	2,400,000	2,676,000,000	mg/m <sup>3</sup>
AHF	Horno residencial	Fuel oil destilado	476,000	299,160	2,142,000	2,676,000,000	mg/m <sup>3</sup>
GLP	Horno y caldera con aplicaciones industriales	Gas licuado de petróleo	24,000	120,000	2,261,000	1,500,000,000	mg/m <sup>3</sup>
CTA	Caldera (vapor) textiles	Aceite usado	6,030,000	ND	4,170,000	ND	mg/m <sup>3</sup>
HFA	Horno fundición	Aceite usado	2,970,000	ND	1,110,000	ND	mg/m <sup>3</sup>
CC1	Caldera > 100 BHP	Carbón	6	0.2	8	2,840	mg/kg
CC2	Caldera ≤ 100 BHP	Carbón	10	0.2	4	2,840	mg/kg
HL	Horno ladrillero	Carbón	13	0.5	5	2,343	mg/kg
HC	Horno	Carbón	13	0.5	5	2,343	mg/kg

Fuente de información:

SUR, 2008: PM y NO<sub>x</sub> para las categorías CG1, CG2, CG3, HG1, HG2, CTA, HFA, CC1, CC2, HL y HC.

EPA, 2008: COT y CO<sub>2</sub> para las categorías: CG1, CG2, CG3, HG1, HG2, HG3, ACF, ACD, AHF, GLP, CC1, CC2, HL y HC; PM y NO<sub>x</sub> para HG3, ACF, ACD, AHF y GLP.

A partir de los factores de emisión y teniendo en cuenta el inventario de fuentes de la ciudad y el factor de actividad, estos dos últimos también producto de la fase anterior del proyecto, se estimó el inventario de emisiones del sector industrial.

En la fase anterior del proyecto se comparó el número de fuentes industriales de los registros de la Cámara de Comercio de Bogotá con el número de fuentes identificadas mediante fotografías aéreas, encontrando alrededor de un 30% más de fuentes por este último ejercicio. Se supuso que la diferencia en el número de fuentes podría ser explicada por las industrias informales de la ciudad, por esta razón se consideró un aporte adicional del 30% en las emisiones estimadas para el sector industrial.

### *3.1.1. Clasificación de las Fuentes según los Sectores de la Industria Manufacturera*

Se clasificaron las fuentes de emisión industriales por actividad productiva, según los códigos de la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) (DANE, 2006).

Fue necesario reclasificar las fuentes según el código CIIU, ya que se observaron inconsistencias entre el código CIIU reportado por cada industria en las encuestas realizadas durante la actualización del inventario de emisiones (SUR, 2008) y la actividad productiva que cada una realiza. Las fuentes se clasificaron siguiendo las especificaciones del DANE (DANE, 2006a). En este ejercicio se encontró que el 35% de las fuentes habían reportado información errónea sobre su clasificación CIIU. Posteriormente, las fuentes se agruparon de acuerdo al código CIIU en un nivel de agregación de tres y dos dígitos<sup>1</sup> (Ver Anexo 2.1).

Adicionalmente, se hallaron los coeficientes de emisión para los diferentes sectores de la industria manufacturera. Los coeficientes de emisión, dados como toneladas de contaminante emitido por unidad de peso de producción bruta, pueden ser utilizados como un indicador de la eficiencia ambiental de los sectores industriales.

Para estimar los coeficientes de emisión se utilizó la tabla de utilización de la matriz de contabilidad de Bogotá (valores del año 2006), con un nivel de desagregación de 59 sectores (Trabajo realizado por el CEDE de la Universidad de los Andes para la Secretaría de Desarrollo de Bogotá, 2009). Esta matriz se adaptó al grado de desagregación sectorial del trabajo de SDA-SUR (2008) del inventario de emisiones.

Los coeficientes de emisión utilizan datos de SDA, SUR en el numerador y datos de la matriz Insumo-Producto producida por el CEDE en el denominador. En los casos en que fue necesario fusionar sectores, los coeficientes de emisión nuevos se estimaron como el promedio ponderado por valor económico.

## 3.2. Proyección de las Emisiones

A partir de la línea base de las emisiones del sector industrial para el año 2008 y considerando variables económicas, se proyectaron hasta el año 2020 las emisiones de

---

<sup>1</sup> La clasificación CIIU es una clasificación por tipo de actividad económica productiva. Se encuentra dividida en cuatro niveles, el primer nivel indica la Sección, se representa por una letra e indica la actividad principal, ejemplo la letra D se refiere a la actividad de Industria Manufacturera. Le sigue la división, los grupos y clases (categorías de dos, tres y cuatro dígitos, respectivamente) que se relacionan entre sí de acuerdo con la actividad que se desarrolla. Ejemplo: la clase (D2921) representa la actividad de fabricación de maquinaria agropecuaria y forestal, por sus características, se encuentra dentro del grupo de fabricación de maquinaria de uso especial (D292) y a su vez pertenece a la división (D29) fabricación de maquinaria y equipo ncp, en un nivel más agregado (DANE, 2005).

material particulado, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos totales y dióxido de carbono.

Se plantearon tres escenarios para proyectar las emisiones en función del crecimiento del PIB real de la ciudad (ver Anexo 2.2). El crecimiento del PIB se estimó a partir de datos oficiales (BANREP, 2009) del PIB nacional y de la participación de las ciudades en el mismo para el periodo 1994-2007. La tasa de crecimiento de cada año al siguiente, se calculó según la Ecuación 2.1.

$$Tasa_n = \ln\left(\frac{PIB_{n+1}}{PIB_n}\right) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

En donde PIB representa el producto interno bruto real de la ciudad (millones de pesos) y el subíndice n (años) representan el periodo de tiempo analizado. El escenario base supone que las condiciones de la economía permanecen homogéneas y que el crecimiento de todos los sectores es uniforme durante el periodo de tiempo analizado. Los tres escenarios planteados corresponden a la tasa de crecimiento logarítmica media y a dos tasas de crecimiento con desviación del uno por ciento respecto a la media.

A partir de las tasas de crecimiento estimadas, y haciendo uso de la Ecuación 2.2 se proyectaron las emisiones para los tres escenarios de crecimiento.

$$E_n = E_o \cdot \exp(Tasa \cdot n) \quad \text{Ecuación 2.2}$$

En donde  $E_o$  (ton año<sup>-1</sup>) corresponde a las emisiones del contaminante en el año base y  $E_n$  (ton año<sup>-1</sup>) corresponde a las emisiones del contaminante en el año para el cual se realiza la proyección.

### 3.3. Análisis de las Medidas de Reducción de Emisiones para el Sector Industrial

#### *3.3.1. Uso Masivo de Gas Natural en la Industria*

Para evaluar esta medida, se supuso que aumenta el porcentaje de las industrias que actualmente operan con combustibles diferentes a gas natural. Se calculó el efecto que se tendría en las emisiones si el 10%, 40%, 60%, 90% ó 100% de las industrias que hoy operan con carbón empiezan a utilizar gas natural.

Para la implementación de la medida se seleccionaron las calderas a carbón (CC1 y CC2) y los hornos a carbón (HC y HL), por ser las categorías que aportan en mayor magnitud a las emisiones de material particulado. De cada una de estas categorías, se seleccionó un número de industrias proporcional a la meta de implementación (10%, 40%, 60%, 90% ó 100%), teniendo en cuenta las fuentes de mayor emisión de material particulado.

A las fuentes seleccionadas para el cambio de combustible se les asignó un factor de emisión equivalente al que tendrían si utilizaran gas natural, según los factores de emisión medidos en la fase anterior del proyecto (ver Tabla 2.3).

A partir del número de fuentes reconvertidas y con el nuevo factor de emisión asignado a cada fuente se estimó el cambio en las emisiones que se daría en cada caso en comparación con las emisiones del escenario base.

**Tabla 2.3.** Factores de emisión utilizados en la evaluación del uso masivo de gas natural en la industria.

Categoría actual	FE actual (g/Kg)				Categoría asignada	FE nuevo (mg/m <sup>3</sup> )			
	PM	NO <sub>x</sub>	COT	CO <sub>2</sub>		MP	NO <sub>x</sub>	COT	CO <sub>2</sub>
CC1	6	8	0.2	2,840	CG2	237	788	176	1.9E+06
CC2	10	4	0.2	2,840	CG3	46	1,075	176	1.9E+06
HC-HL	13	5	0.5	2,343	HG1-HG2	196	1,221	176	1.9E+06

Con el fin de comparar los resultados, se supuso que la implementación de la medida para todos los modos iniciaba en el año 2012 y se asignó un tiempo de implementación para cada uno de los escenarios: 1, 2, 3, 5 y 6 años para la reconversión del 10%, 40%, 60%, 90% y 100% de las industrias, respectivamente. El efecto en las emisiones debido a esta medida, varía según el momento en el tiempo en que esta se implemente. Dicho efecto fue considerado en el proceso de optimización mediante el cual se seleccionaron los proyectos del PDDB (ver Sección 3 del Documento de Trabajo)

Para la estimación del costo de implementación de esta medida, se utilizó el costo promedio según el mercado local asociado con el reemplazo de una caldera a carbón de tamaño medio (100 BHP) por una caldera que cumpla los mismos requerimientos de capacidad utilizando gas natural. A partir de esta información se halló un costo equivalente por unidad de potencia con el cual se estimaron los costos para las diferentes industrias según la capacidad y actividad anual que tiene cada una de éstas.

### 3.3.2. Uso de Sistemas de Control de Emisiones

Esta medida consiste en la instalación de sistemas de control de emisiones en hornos y calderas a carbón (HC, HL, CC1 y CC2) y calderas a gas natural (CG1, CG2 y CG3). Se seleccionaron estas categorías teniendo en mente los siguientes criterios: 1) Consideradas en conjunto, estas categorías aportan el 95% de las emisiones de PM del sector industrial; 2) Se cuenta con información técnica de operación para estos sectores obtenida en la fase anterior del proyecto, y por lo tanto se puede evaluar la viabilidad técnica de la instalación de los sistemas de control de emisiones.

El análisis se inició con una revisión del estado del arte en sistemas de control de emisiones, en la que se identificaron las características técnicas relevantes de las diferentes clases de sistemas existentes. Para este análisis se utilizó información registrada en bases de datos de entidades y autoridades ambientales de Estados Unidos y Europa, tales como el Centro de Tecnología de Aire Limpio (CATC por sus siglas en inglés). En la Tabla 2.4 se presentan los sistemas de control de emisiones incluidos en el análisis.

Para cada uno de los sistemas de control de emisiones, se identificaron los contaminantes que remueve, el mecanismo de remoción utilizado, la efectividad de remoción por contaminante (porcentaje de contaminante removido en el efluente), el costo de operación y mantenimiento, el costo capital, efectividad de costo (costo de operación y mantenimiento por unidad de flujo tratado), condiciones técnicas de operación (temperatura, flujo de contaminantes y carga de contaminantes), ventajas y desventajas (ver Anexo 2.3).

De la misma manera, con el fin de seleccionar los sistemas de control de emisiones que por sus características técnicas podrían ser instalados en las industrias de Bogotá, se identificaron los parámetros de operación de cada categoría industrial (ver Tabla 2.5).

**Tabla 2.4.** Sistemas de control de emisiones considerados en el análisis.

Sistema de control de emisiones
Filtros de papel
Ciclones
Elutriadores
Separadores con ayuda mecánica
Separadores de momento
Cámaras de asentamiento
Depurador por condensación
Depurador con lecho de fibra
Depurador placa de impacto
Depurador con ayuda mecánica
Depurador de orificio
Depurador con lecho empacado
Depurador en húmedo
Depurador tipo Venturi
Incinerador catalítico
Antorcha
Incinerador tipo recuperativo
Incinerador tipo regenerativo
Incinerador termal
Filtro de aire de alta eficiencia
Filtro - Sacudimiento mecánico
Filtro - Chorro pulsante
Filtro - Aire invertido
Precipitador electrostático seco (PES) - Tipo tubo alambre
Precipitador electrostático seco (PES) - Tipo placa-alambre
Precipitador electrostático húmedo (PEH) - Tubo alambre
Precipitador electrostático húmedo (PEH) - Placa alambre
Reducción selectiva no catalítica
Reducción selectiva catalítica
Recintos totales permanentes
Desulfuración gas chimenea

**Tabla 2.5.** Condiciones de las fuentes de emisión por categoría industrial.

Categoría	Fuentes totales <sup>1</sup>	Condiciones de operación		
		Temperatura (K) <sup>2</sup>	Velocidad (m s <sup>-1</sup> )	Caudal (m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> )
CC1	37	376	7	36
CC2	38	384	12	24
CG1	141	454	5	75
CG2	30	441	12	78
CG3	352	465	5	57
HL-HC	41	353	7	299

<sup>1</sup> Según el inventario de fuentes de la ciudad (SDA-SUR, 2008). <sup>2</sup> Temperatura de los gases a la salida del proceso. CC1: Caldera a carbón > 100 BHP; CC2: Caldera a carbón ≤ 100 BHP; CG1: Caldera a gas natural > 100 BHP (año fabricación ≤ 1997); CG2: Caldera a gas natural > 100 BHP (año fabricación > 1997); CG3: Caldera a gas natural ≤ 100 BHP; HL: Horno ladrillero a carbón; HC: Horno a carbón.

Según el caudal y la carga media de contaminantes (ver Tabla 2.6), se calculó el costo capital para los sistemas de control de emisiones para todas las categorías de la industria.

De los sistemas de control, se seleccionaron para cada categoría industrial los que podían aplicarse considerando las condiciones de operación y la carga media de contaminantes. Se descartaron los sistemas que aunque fueran factibles, implicaran altos costos adicionales para cumplir los requisitos de operación de los sistemas de control de emisiones, como por ejemplo los que requerían adquisición de tecnologías de acondicionamiento de temperatura y velocidades de flujo.

**Tabla 2.6.** Carga media de contaminantes por categoría de la industria.

Categoría	Carga de contaminantes (mg scm <sup>-1</sup> )	
	PM	NO <sub>x</sub>
	Media	Media
CC1	160	240
CC2	380	210
CG1	10	100
CG2	10	60
CG3	5	80
HG1	20	40
HG2	20	40
HL	100	60

Después de esta selección, se analizó la remoción máxima que se podía lograr con cada sistema en las diferentes categorías de la industria, considerando la eficiencia de los sistemas y la carga media de contaminantes de cada categoría de la industria local.

Posteriormente, se realizó un análisis de costo-eficiencia para cada sistema de control de emisiones, considerando el costo de adquisición, el costo de operación y mantenimiento, la eficiencia de remoción de cada sistema y el potencial máximo de reducción que se tendría en cada categoría de la industria, según la carga media de contaminantes.

Para evaluar esta medida se asignaron dos metas de reducción de emisiones, una corresponde a una reducción inicial del 70% de las emisiones anuales del sector formal del escenario tendencial y la segunda busca la reducción máxima que se puede alcanzar (95% de la emisiones) mediante la implementación de esta medida. Para cada una de estas metas se analizaron dos maneras en las que se podrían cumplir:

- Opción 1: Distribuir la meta de reducción en cada categoría de la industria (CC1, CC2, CG1, CG2, CG3, HC y HL) de manera proporcional al aporte de cada una al inventario de emisiones de material particulado en el año base.
- Opción 2: Seleccionar las categorías y las fuentes en las cuales se implementarían los sistemas de control de emisiones teniendo como objetivo obtener la meta de reducción con un costo mínimo.

Una vez seleccionados los sistemas de control de emisiones que cumplían los requisitos de remoción y eran los más costo-eficientes, se realizó un ejercicio de minimización de costos con el fin de determinar a qué número de industrias y a cuáles industrias de cada sector se le deberían instalar sistemas de control de emisiones.

Después de identificar las industrias en las que se utilizarían los sistemas de control de emisiones, se estimaron los costos.

### 3.3.3. *Conversión de Carbón a Gas Natural y Formalización de una Fracción del Sector Informal de la Industria*

Como parte de la evaluación de esta medida, se estimó el efecto que se tendría con la implementación del gas natural en la industria, según como se explicó en secciones anteriores, si adicionalmente un porcentaje de las industrias del sector informal pasaran a hacer parte del sector formal y por lo tanto se afectarían con la medida de uso de gas natural de la misma manera que las industrias del sector formal. Para esto, se supuso que el 50% de las fuentes informales pasaban a ser parte del sector formal en un periodo de 5 años, para lo cual se impuso una meta de atraer cada año un 10% de las fuentes informales hacia el sector formal.

Posteriormente, se evaluó el efecto de la medida de gas natural sobre el nuevo número de fuentes del sector formal. La medida del cambio al uso de gas natural tenía a su vez asociado un periodo de implementación dependiendo del modo. Esos periodos se conservaron en la evaluación de esta medida y se supone que todas las fuentes del sector informal cuando pasan a ser parte del sector formal entran utilizando gas natural como combustible en la proporción del escenario que esté siendo evaluado (cambio a gas natural del 10%, 40%, 60%, 90% ó 100% de las industrias).

En la Tabla 2.7 se presenta el porcentaje de industrias del sector informal que entrarían a ser parte del sector formal y el tiempo de implementación de la medida.

**Tabla 2.7.** Periodo de formalización de la industria.

Año de inicio de la medida	Escenario de gas natural	Tiempo de implementación medida gas natural (años)	Formalización del sector informal (industrias formalizadas por año)	Tiempo de implementación formalización de la industria (años)
2012	Escenario 10%	1	10%	5
2012	Escenario 40%	2	10%	5
2012	Escenario 60%	3	10%	5
2012	Escenario 90%	5	10%	5
2012	Escenario 100%	5	10%	5

Debido a que no se conoce el consumo de combustible ni la capacidad de las fuentes industriales que no pertenecen al sector formal, los costos de esta medida relacionados con las industrias del sector informal se estimaron suponiendo que éstos son proporcionales al número de fuentes, según el número de fuentes del sector formal que se ven afectadas por la medida y según los costos estimados para éstas.

### 3.3.4. *Uso de Sistemas de Control de Emisiones en las Industrias del Sector Ladrillero y Reubicación de fuentes*

Según los resultados de las emisiones en el año base, el sector ladrillero es el de mayor aporte en las emisiones de PM de la ciudad, por esta razón y considerando los lineamientos técnicos del plan se diseñó esta medida.

La medida que se propone consiste en la instalación de sistemas de control de emisiones en las industrias de mayor consumo energético, teniendo en cuenta que para las fuentes de menor consumo la instalación de sistemas de control es una opción menos costo-efectiva. Para las fuentes remanentes, que corresponden a las de menor consumo energético, se propone que se reubiquen fuera del perímetro urbano.



Se supuso entonces que el 50%, 70%, 90% ó 100% de las fuentes, las de mayor consumo energético, preferían instalar sistemas de control de emisiones mientras que las fuentes restantes, de menor consumo, preferían ubicarse fuera del perímetro urbano.

Las fuentes del sector ladrillero se caracterizan por el uso de hornos a carbón. Dentro del inventario de emisiones del año base, se identificaron alrededor de 40 fuentes pertenecientes al sector en referencia. En la Tabla 2.8 se presenta el número de industrias ladrilleras que entrarían a ser parte de la medida y el tiempo de implementación.

Con la ubicación de las fuentes fuera del perímetro urbano, se busca reducir la exposición de la población al pasar de zonas densamente pobladas a zonas de menor población.

**Tabla 2.8.** Implementación de las medidas: ubicación de ladrilleras fuera del perímetro urbano e implementación de sistemas de control de emisiones.

Modo	Fracción de la industria	Medida	Periodo de Aplicación de la Medida		
			Año inicial	Tiempo de implementación (Años)	Implementación (Número de industrias/año)
1	50%	Reubicación de la industria ladrillera	2012	2	10
	50%	Uso de sistemas de control de emisiones	2012	2	10
2	30%	Reubicación de la industria ladrillera	2012	1	12
	70%	Uso de sistemas de control de emisiones	2012	3	10
3	10%	Reubicación de la industria ladrillera	2012	1	4
	90%	Uso de sistemas de control de emisiones	2012	3	12
4	0%	Reubicación de la industria ladrillera	2012	0	0
	100%	Uso de sistemas de control de emisiones	2012	4	10

### 3.4. Suposiciones y consideraciones del análisis de las medidas del sector industrial

- Debido a que no se cuenta con información acerca del tipo de combustible, proceso o consumo energético de las fuentes del sector informal, se supuso que estas fuentes aportan a las emisiones de manera proporcional al número de fuentes identificadas en la fase anterior del proyecto (SDA-SUR, 2008).
- Se supuso que todos los sectores de la industria crecen a la misma tasa.
- Se supuso que el crecimiento de la industria del sector informal crece a la misma tasa que el sector formal.
- Aunque según la información del inventario de fuentes de la ciudad el 10% de las fuentes cuentan con sistemas de control de emisiones, el análisis de la medida de implementación de sistemas de control de emisiones se realizó suponiendo que ninguna fuente cuenta con sistemas de control. Esto porque según las observaciones realizadas en la fase de campo en la parte anterior del proyecto, muchos de los sistemas de control no se encontraban operando de forma apropiada. Adicionalmente, los sistemas de control actualmente instalados (v.g., ciclón) se caracterizan por alta eficiencia para partículas gruesas mientras que los sistemas propuestos como parte del plan de descontaminación se enfocan en la remoción de partículas finas.
- La evaluación de costos de las medidas se realizó en pesos corrientes del año 2009.

- Los costos de la medida de uso de sistemas de control de emisiones incluyen la adquisición de los sistemas de control de emisiones y de los equipos complementarios, así como el costo de instalación de los mismos.
- En la evaluación del costo por cambio de combustible a gas natural se está considerando la adquisición de una caldera u horno, el costo de los equipos complementarios, y el costo de instalación. No se incluyen los costos de operación y mantenimiento debido a que se busca estimar el valor adicional por la implementación de la medida y sin la implementación de la medida también se incurre en costos de operación y mantenimiento.
- En la evaluación de costos de uso de gas natural y uso de sistemas de control de emisiones se supuso que el costo de adquisición del sistema de control, de las calderas y hornos se cubría completamente en el año de instalación de los mismos.
- En la estimación del costo de la medida de uso de gas como combustible en las industrias, se consideró el costo de una caldera dual, teniendo en cuenta que por algunos periodos el suministro de gas natural en la ciudad ha sido suspendido y por lo tanto las industrias actualmente cuentan con sistemas duales.
- Se supuso que las fuentes de la industria que no pertenecen al sector formal hacen uso de combustibles diferente a gas natural. El consumo de gas natural de las fuentes formales de la industria para el año base es muy cercano al valor de consumo reportado por la UPME. Mientras que se observan mayores diferencias para los otros combustibles, lo que podría ser consecuencia del consumo de combustible por fuentes del sector no formal de la industria.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Emisiones del Sector Industrial para el Año Base

En la Tabla 2.9 se presenta el inventario de emisiones del sector industrial para el año 2008. En la Figura 2.1 se presenta el aporte de las diferentes categorías industriales en las emisiones de PM, NO<sub>x</sub>, COT y CO<sub>2</sub>.

**Tabla 2.9.** Emisiones del sector industrial para el año base.

	Emisiones (Ton año <sup>-1</sup> )				
	PM	NO <sub>x</sub>	TOC	CO	CO <sub>2</sub>
Sector Formal	720 ± 80	1,400 ± 130	70 ± 5	520 ± 80	720,000 ± 37,000
Totales	1,100 ± 120	2,100 ± 190	100 ± 5	800 ± 130	1,060,000 ± 54,000

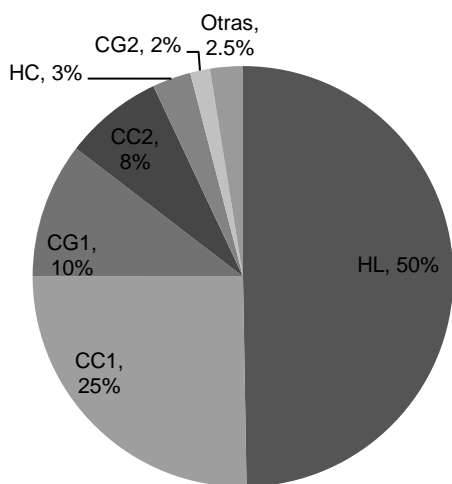
NOTA: Las emisiones presentadas en la Tabla 2.9 incluyen contaminantes primarios, generados en procesos de combustión (emisiones emitidas por las chimeneas de las industrias). No se consideran las emisiones debidas a los procesos productivos, fuentes de área, fuentes naturales de emisión ni resuspensión. Los valores se presentan aproximados.

En el Anexo 2.4 se presenta la participación porcentual de las categorías industriales según el número de fuentes y según su consumo energético anual.

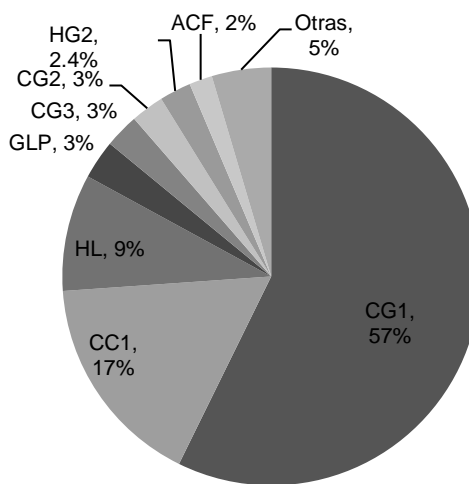
Las fuentes que utilizan carbón como combustible tienen una participación superior al 80% en las emisiones de material particulado. Sin embargo, por el número de fuentes, éstas sólo representan alrededor del 10% de todas las fuentes del sector industrial de la ciudad. Caso contrario al del gas natural, en donde las fuentes que utilizan este combustible aportan alrededor del 15% de las emisiones de PM, y tienen una participación alta tanto en número de industrias (75%) como en consumo energético (85%).

Por otra parte las emisiones de NO<sub>x</sub> y COT de industrias que utilizan gas natural representan aproximadamente el 60% de las emisiones de estos contaminantes en el sector industrial. Sin embargo, para estos casos las emisiones de todo el sector industrial son un orden de magnitud menor respecto al aporte que hacen las fuentes móviles a estos dos contaminantes.

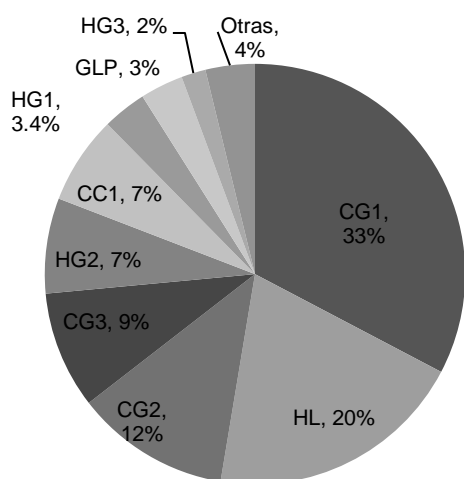
La mayor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> se debe al uso de combustibles líquidos. Las categorías que utilizan fuel oil aportan alrededor del 60% de las emisiones, representando menos del 10% de las fuentes industriales.



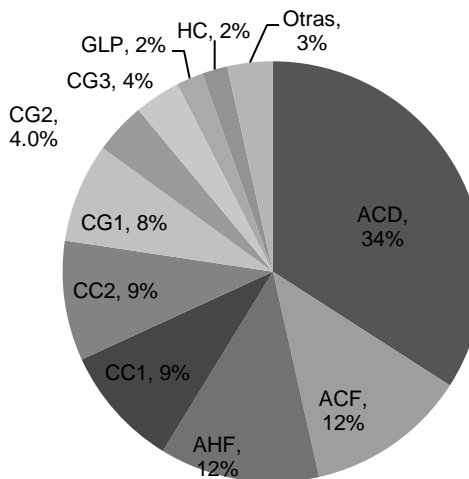
a) Material particulado



b) Óxidos de nitrógeno



c) Compuestos orgánicos totales



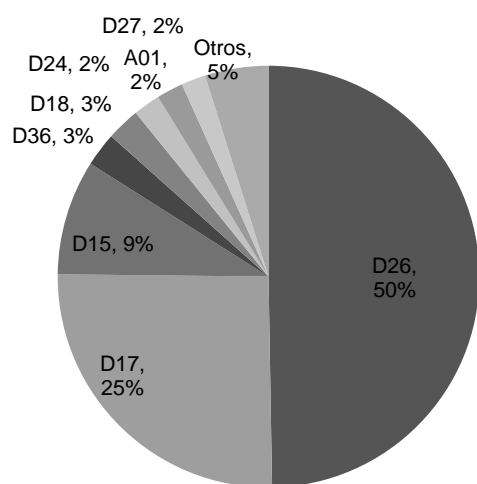
d) Dióxido de carbono

CC1: Caldera a carbón > 100 BHP; CC2: Caldera a carbón ≤ 100 BHP; CG1: Caldera a gas natural > 100 BHP (año fabricación ≤ 1997); CG2: Caldera a gas natural > 100 BHP (año fabricación > 1997); CG3: Caldera a gas natural ≤ 100 BHP; HG1: Horno de alimentos a gas natural; HG2: Horno de secado y curado a gas natural; HG3: Horno de fundición y cremación a gas natural; HL: Horno ladrillero a carbón; HC: Horno a carbón; GLP: Horno y caldera a GLP; ACF: Caldera industrial y comercial > 15 BHP con fuel oil residual; ACD: Caldera industrial y comercial > 15 BHP con fuel oil destilado; AHF: Horno residencial con fuel oil destilado.

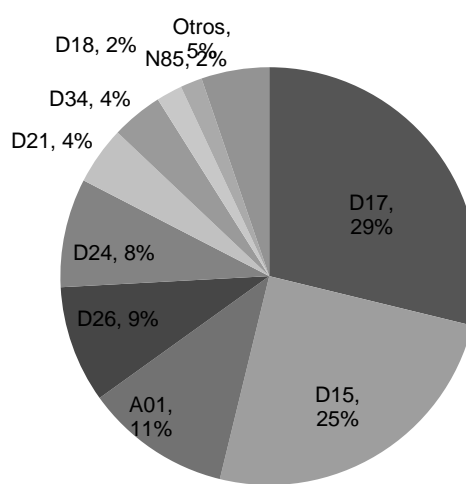
**Figura 2.1.** Aporte de las categorías industriales en la emisión de contaminantes.

#### 4.1.1. Emisiones por Sectores de la Industria Manufacturera

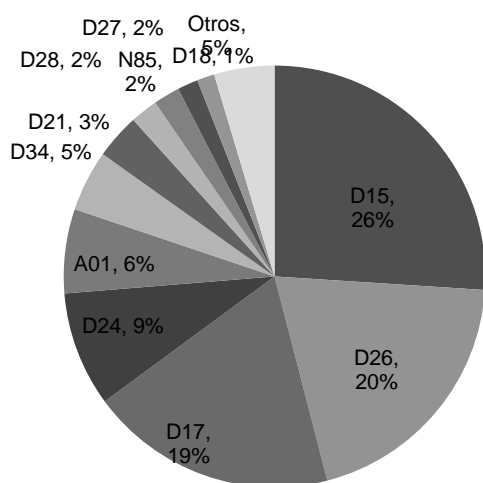
En la Figura 2.2 se presenta el aporte de los diferentes sectores de la industria, según clasificación CIIU en la emisión de contaminantes para el año base.



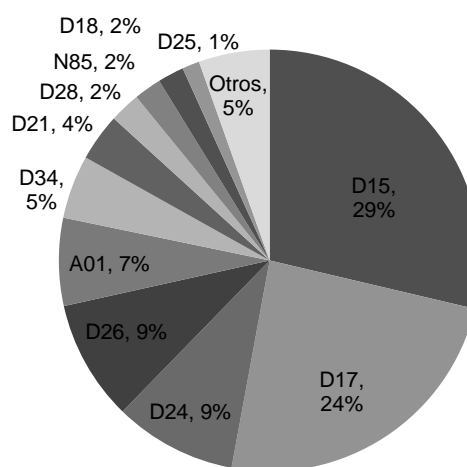
a) Material particulado



b) Óxidos de nitrógeno



c) Compuestos orgánicos totales



d) Dióxido de carbono

D15:Elaboración de productos alimenticios y bebidas; D17: Fabricación de productos textiles; D18: Confección de prendas de vestir, adobo y teñido de pieles; D21: Fabricación de papel, cartón y productos de papel y cartón; D24: Fabricación de sustancias y productos químicos; D25: Fabricación de productos de caucho y plástico; D26: Fabricación de otros productos minerales no metálicos; D27: Fabricación de productos metalúrgicos básicos; D28: Fabricación de productos elaborados de metal excepto maquinaria y equipo; D34: Fabricación de vehículos automotores, remolques y semirremolques; D36: Fabricación de muebles; A01: Agricultura, ganadería, caza y actividades de servicio conexas; N85: Servicios sociales y de salud.

**Figura 2.2.** Aporte de los sectores industriales en la emisión de contaminantes.

El sector D26 (fabricación de productos minerales no metálicos) es el sector industrial de mayor aporte en las emisiones de PM. Este sector, conformado por fábricas de productos de arcilla y cerámica y por ladrilleras principalmente, aporta alrededor del 50% de las emisiones. En orden de importancia según las emisiones lo siguen el sector de fabricación de productos textiles (D17) con un aporte del 15% y el sector de elaboración de productos alimenticios y bebidas (D15) el cual aporta alrededor del 10% de las emisiones de PM.

Estos sectores a su vez se caracterizan por tener coeficientes de emisión altos (ver Anexo 2.5), lo que significa que en comparación con otros sectores de la industria producen altas cantidades de PM por unidad de pesos de producción bruta. Estos tres sectores (D26, D15 y D17) se encuentran dentro de los cinco sectores de menor eficiencia en cuanto a las emisiones de PM emitidas por unidad de peso de producción bruta.

Los sectores fabricación de productos textiles (D17), elaboración de productos alimenticios y bebidas (D15), transformación y fabricación de productos de madera y corcho (D20), fabricación de otros productos minerales no metálicos (D26) y fabricación de vehículos automotores y remolques (D34) se caracterizan por tener los coeficientes de emisión más altos para todos los contaminantes evaluados (PM, NO<sub>x</sub>, COT, CO<sub>2</sub>).

#### 4.2. Proyección de las Emisiones

Las tasas con las cuales se proyectaron las emisiones del sector industrial se presentan en la Tabla 2.10. Se utilizó la tasa media de crecimiento económico esperada en la ciudad (1.037) para las proyecciones de emisiones. Como ejercicio adicional, dichas proyecciones también se realizaron para tasas con un punto por debajo y uno por encima de la tasa media (ver Anexo 2.6). En la Tabla 2.11 se presentan las emisiones anuales para el año base y para el año 2020, en donde se muestra que dichas emisiones tendrán un crecimiento del 60% comparando el año base (2008) con las emisiones en el año 2020.

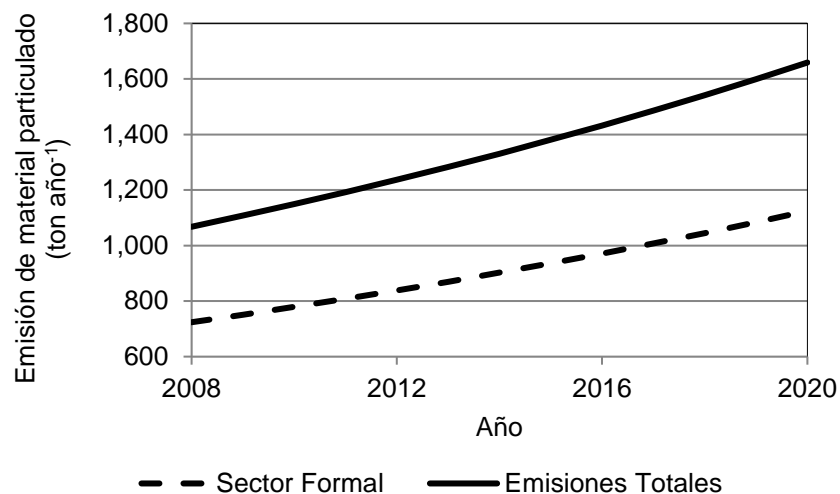
**Tabla 2.10.** Tasas de crecimiento económico utilizadas en la proyección de las emisiones

Tasa media	1.037
Escenario de crecimiento alto	1.047
Escenario de crecimiento bajo	1.027

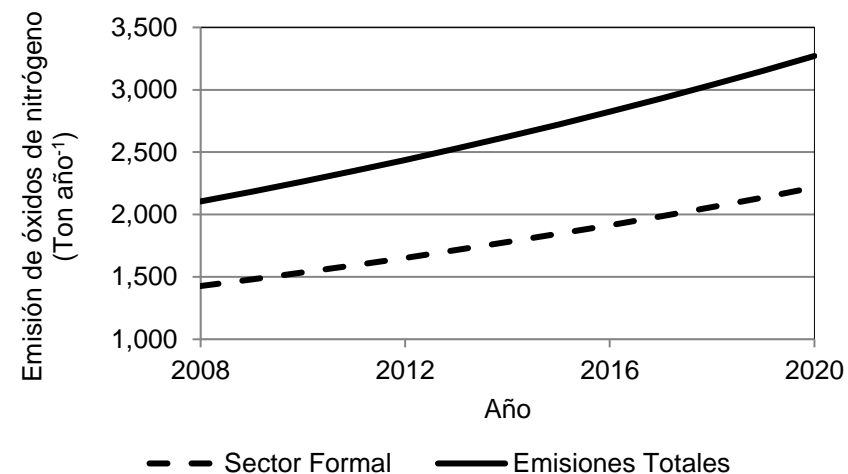
**Tabla 2.11.** Comparación emisiones anuales 2008-2020.

Año	Emisiones anuales (ton)			
	PM	NO <sub>x</sub>	COT	CO <sub>2</sub>
2008	1,100	2,100	100	1,000,000
2020	1,700	3,300	160	1,650,000

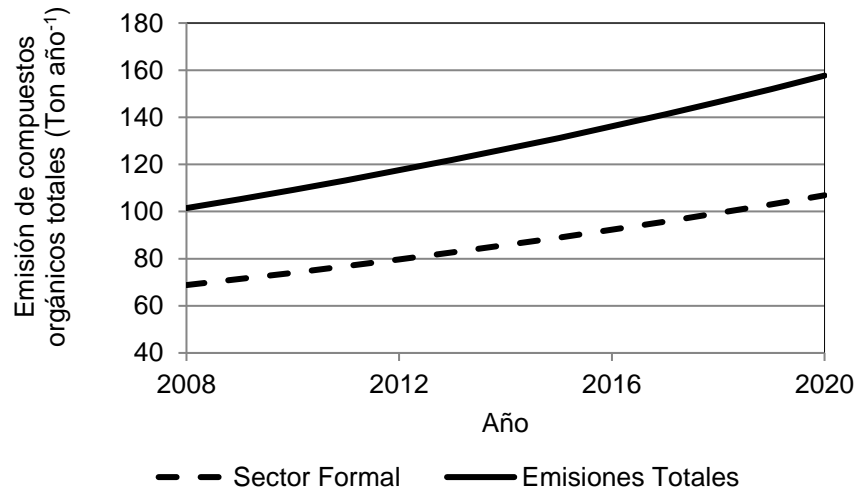
En las figuras 2.3 a 2.6 se presenta la proyección de las emisiones de PM, NO<sub>x</sub>, COT y CO<sub>2</sub> del sector industrial para los años 2008-2020. Se presenta de manera diferencial las emisiones debidas únicamente al sector formal y las emisiones totales, estimadas como la suma de las emisiones del sector formal e informal.



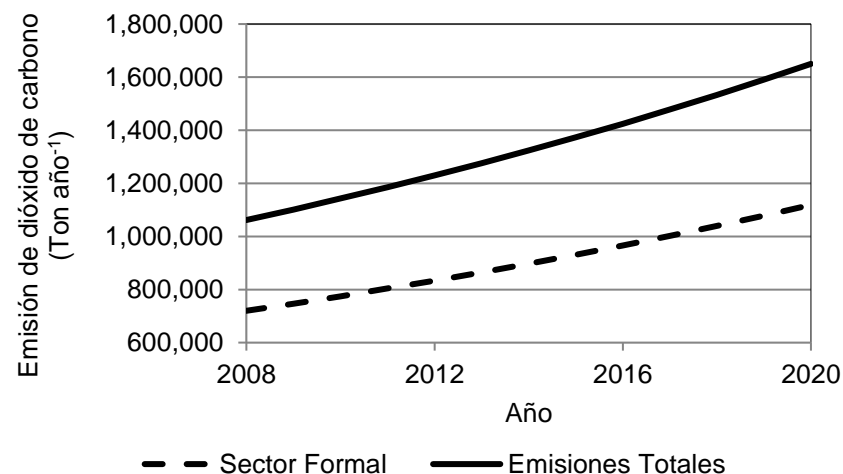
**Figura 2.3.** Proyección de emisiones de material particulado.



**Figura 2.4.** Proyección de emisiones de óxidos de nitrógeno.



**Figura 2.5.** Proyección de emisiones de compuestos orgánicos totales.



**Figura 2.6.** Proyección de emisiones de dióxido de carbono.

### 4.3. Medidas de Reducción de Emisiones para el Sector Industrial

#### 4.3.1. *Uso Masivo de Gas Natural en la Industria*

En la Tabla 2.13 se presenta el tiempo de la implementación de la medida para cada escenario y el número de industrias que cada año empezarían a utilizar gas natural como combustible.

**Tabla 2.13.** Periodo de implementación del uso de gas natural en la industria para cada escenario.

Modo	Grado de implementación	Año de inicio de la medida	Tiempo de implementación (años)	Introducción de la medida (% industrias por año) <sup>1</sup>
Modo 1	Escenario 10%	2012	1	10%
Modo 2	Escenario 40%	2012	2	20%
Modo 3	Escenario 60%	2012	3	20%
Modo 4	Escenario 90%	2012	5	18%
Modo 5	Escenario 100%	2012	5	17%

<sup>1</sup> Hace referencia al porcentaje de industrias que empieza a usar gas natural cada año, dependiendo del escenario de evaluación.

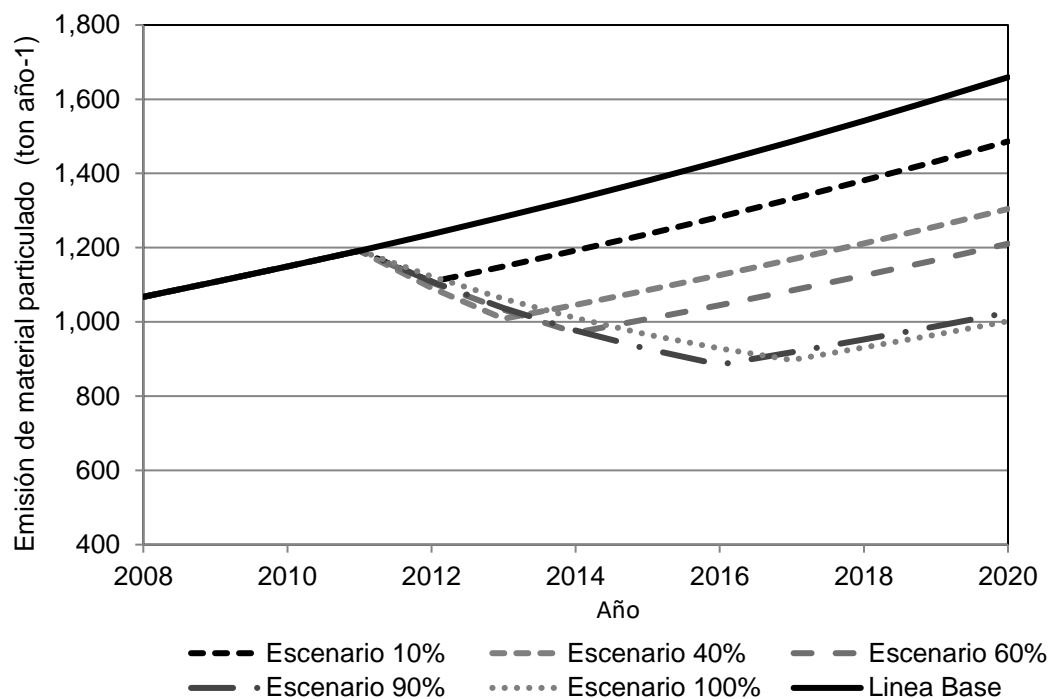
En la Tabla 2.14 se presenta la reducción porcentual de las emisiones para el año 2020 en cada uno de los escenarios respecto al año 2020 de la línea base de emisiones. Es importante destacar que esta medida implica la reducción en la emisión de todos los contaminantes, siendo superior el beneficio en la reducción de PM.

**Tabla 2.14.** Reducción alcanzada por el uso masivo de gas natural en la industria en las emisiones en el año 2020 para cada escenario.

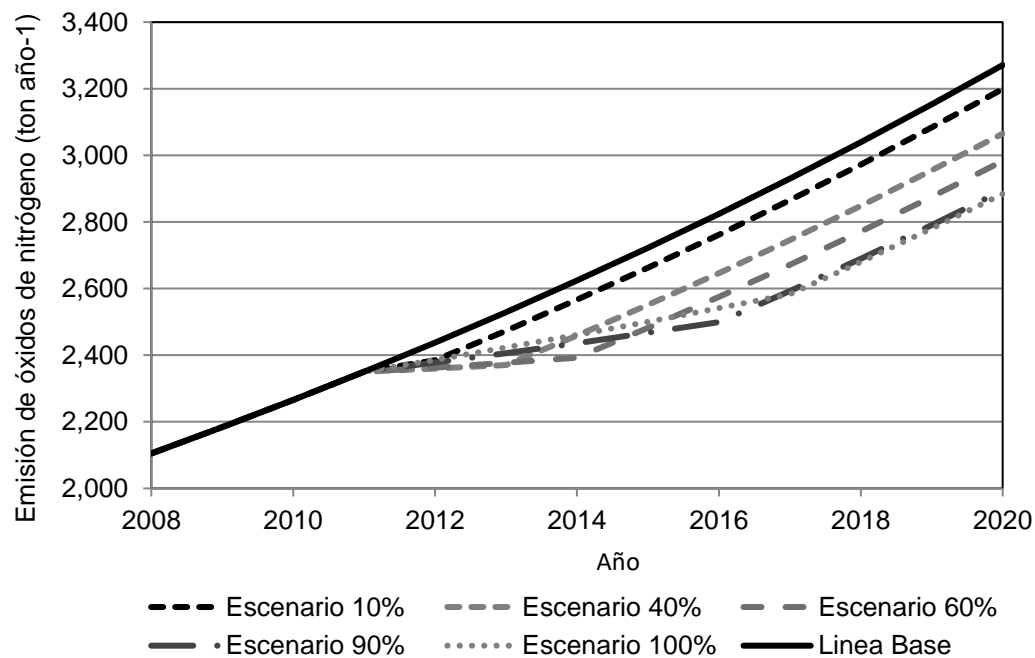
Año	Escenario	PM	NO <sub>x</sub>	COT	CO <sub>2</sub>
2020	Escenario 10%	10%	2%	4%	3%
2020	Escenario 40%	21%	6%	3%	2%
2020	Escenario 60%	27%	9%	3%	2%
2020	Escenario 90%	38%	12%	8%	3%
2020	Escenario 100%	40%	12%	7%	4%

En las figuras 2.7 a 2.10 se presentan los resultados de la implementación de los diferentes escenarios de reducción por contaminante. En éstas es posible apreciar el efecto en las emisiones derivado de la implementación gradual de la medida. En estas figuras se presenta el efecto de la medida en las emisiones totales de las fuentes industriales.

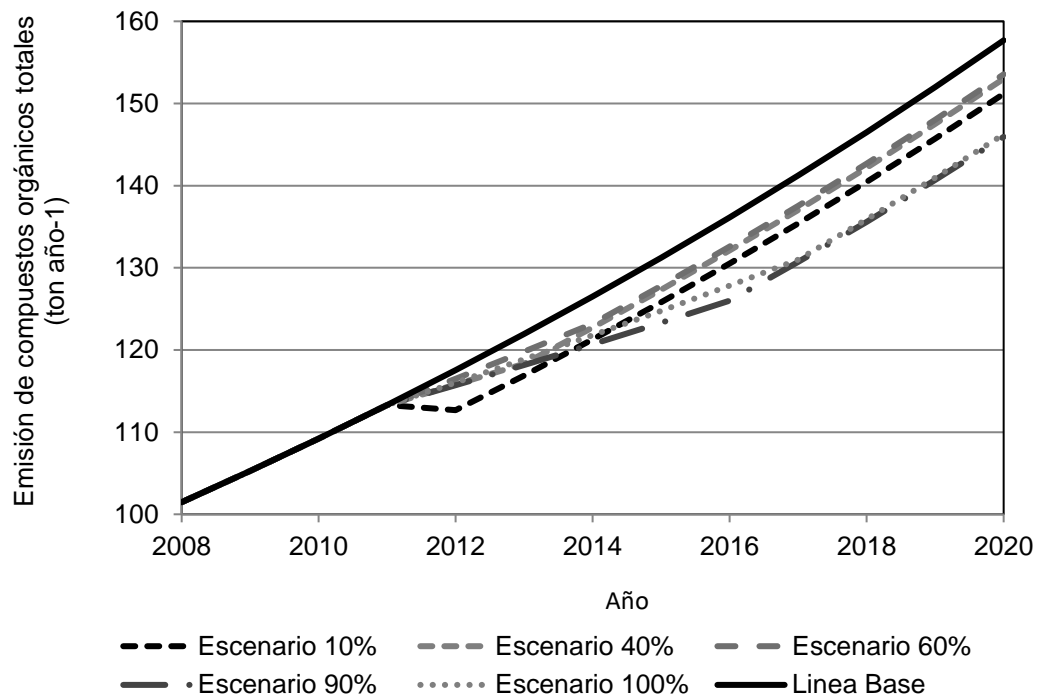




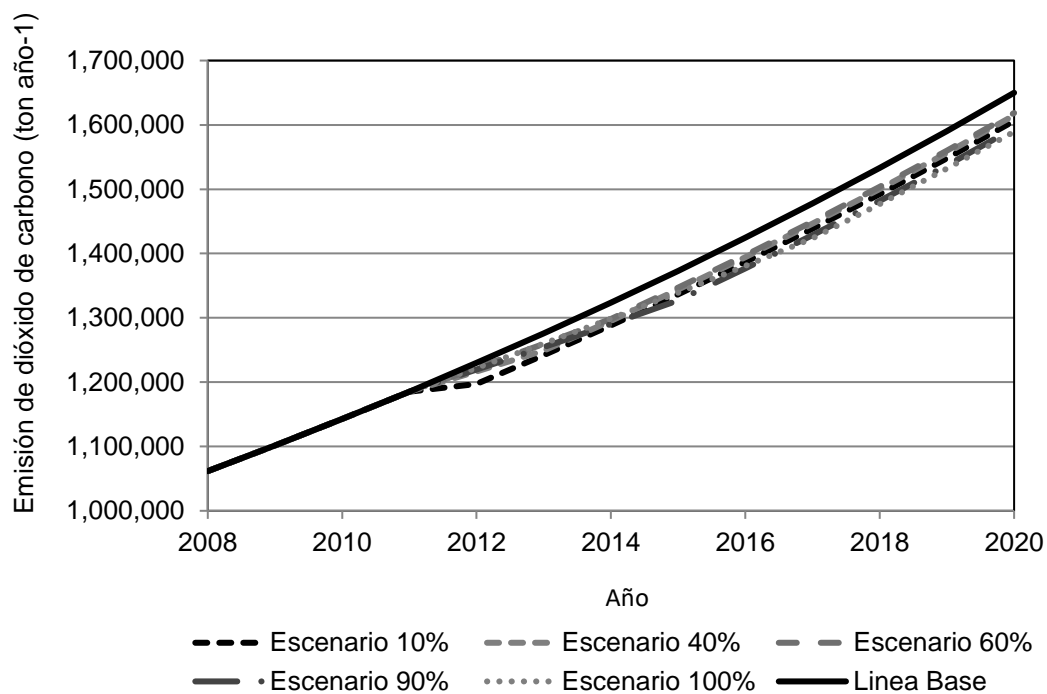
**Figura 2.7.** Emisiones de material particulado en los escenarios de uso masivo de gas natural en la industria.



**Figura 2.8.** Emisiones de óxidos de nitrógeno en los escenarios de uso masivo de gas natural en la industria.



**Figura 2.9.** Emisiones de compuestos orgánicos totales en los escenarios de uso masivo de gas natural en la industria.



**Figura 2.10.** Emisiones de dióxido de carbono en los escenarios de uso masivo de gas natural en la industria.

El costo considerado (60 pesos por BTU/hora) para la evaluación de la medida incluye la adquisición e instalación de la caldera (sistema dual) y de los equipos complementarios (sistema de alimentación de agua, bombas de operación, chimenea).

En la Tabla 2.15 se presentan los costos asociados a cada escenario de evaluación de la medida. En la Tabla 2.16 se presentan los costos por tonelada de PM reducida.

**Tabla 2.15.** Costo por escenarios del uso masivo de gas natural en la industria.

Escenario	Escenario 10%	Escenario 40%	Escenario 60%	Escenario 90%	Escenario 100%
Costo total (millones) <sup>1</sup>	9,700	25,100	35,800	54,500	64,100

<sup>1</sup> NOTA: Los costos se presentan en pesos constantes año 2009.

**Tabla 2.16.** Costo por unidad de tonelada de PM reducida.

Modo de implementación	Costo por tonelada de PM (millones de pesos/ton PM) <sup>2</sup>
Modo 1	7
Modo 2	9
Modo 3	11
Modo 4	13
Modo 5	16

### Viabilidad financiera

Según un estudio desarrollado para la industria de la zona central de Colombia (Barros y Cadena, 2004) en el que se evaluó la competitividad del gas natural frente a sus sustitutos (carbón, GLP, ACPM) en tres aspectos (costos de operación y mantenimiento; costo del combustible para suplir los mismos requerimientos energéticos y costos de inversión), se encontró que el gas natural no es competitivo frente al carbón mineral, excepto en aquellas industrias que tienen un consumo energético bajo (entre 0 y 5,000 MBTU/año) (ver Anexo 2.7). El 60% de las fuentes incluidas en el análisis de esta medida se encuentra en el rango para el cual el gas natural es competitivo frente al carbón (0 y 5,000 MBTU), lo que sugiere que el cambio de combustible sería favorable económicamente para este grupo de industrias.

Por otro lado, las fuentes de mayor emisión de PM, entre las que se encuentran las industrias del sector ladrillero, tienen en promedio un mayor consumo energético, lo que sugiere que para este sector sería necesario utilizar alguna herramienta que apoye la implementación de la medida.

Es importante resaltar que para todos los casos, los costos de operación y mantenimiento asociados con la utilización del gas natural son inferiores en comparación con los costos cuando se utiliza carbón. A pesar de la menor competitividad (por costos de inversión y los asociados al consumo de combustible) del gas natural frente al carbón en las industrias de consumo energético medio y alto, es importante tener en cuenta otras ventajas que ofrece el gas natural frente al carbón como las facilidades en el manejo y la mayor calidad en el acabado de los productos entre otras (ver Anexo 2.7) que podrían justificar el cambio en el combustible para algunos sectores productivos.

<sup>2</sup> Este costo se estimó como el costo total de la medida sobre las toneladas de PM reducidas en el periodo de análisis del plan. Esto corresponde a la metodología utilizada para la estimación de curvas de abatimiento de CO<sub>2</sub> en estudios de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

### Viabilidad según disponibilidad de gas natural

Además de la competitividad del gas natural frente a los energéticos sustitutos, la garantía en el suministro y las proyecciones de producción a mediano y largo plazo son otros aspectos que podrían limitar la implementación de la medida de uso masivo de gas natural en la industria.

En cuanto a la garantía en el suministro del gas natural, la Resolución 182074 de 2009 del Ministerio de Minas y Energía establece cuál es el orden de prioridad en momentos de racionamiento. En varias oportunidades se han dado racionamientos en el uso de gas natural para el sector industrial de la ciudad. Debido a lo anterior, una alta proporción de las industrias que utilizan gas natural cuentan con sistemas duales, generalmente operados con fuel oil, diésel y carbón, como respaldo para los racionamientos de gas.

Por otra parte, según entidades del sector energético nacional (Naturgas, 2008) se tiene garantía en la cobertura de la demanda de gas natural hasta el año 2020, siempre y cuando el gobierno continúe invirtiendo en los proyectos de expansión planteados. En el mismo sentido el Plan Energético Nacional 2006-2020 plantea la continuación del programa de masificación del gas natural. Aún así, se considera necesario evaluar las garantías que pueda proveer el gobierno nacional en cuanto al suministro de gas natural a mediano y largo plazo, ya sea de producción nacional o comercialización internacional de LNG, para poder determinar si se justifican o no las altas inversiones que implica en infraestructura un cambio en el tipo de combustible como el planteado con esta medida.

Con el fin de complementar el análisis relacionado con la viabilidad de la medida, mediante el modelo de optimización utilizado en la selección de proyectos óptima del plan, se evaluó un escenario en el que no existen las medidas de gas natural en la industria de la ciudad. El resultado de dicho ejercicio sugiere que si no existe la opción de cambiar de combustible hacia el uso de gas natural como se propone en las medidas analizadas, no sería posible cumplir la meta de calidad del aire propuesta para el PDDB (se lograría cumplir una meta en emisiones de PM un 30% menos exigente aproximadamente respecto a la meta actualmente propuesta en el PDDB), y adicionalmente el plan tendría un costo superior al que se obtuvo con el portafolio óptimo de las medidas.

#### *4.3.2. Uso de Sistemas de Control de Emisiones*

En la Tabla 2.17 se presentan los costos medios de capital para los diferentes sistemas de control de emisiones evaluados. Estos se estimaron para cada categoría de la industria considerando las características específicas de cada una y la carga media de contaminantes de cada una según la información recolectada en la fase anterior del proyecto. Esto significa que la valoración efectuada para las diferentes alternativas de control de emisiones hacen referencia específica a la industria de la ciudad de Bogotá.

El análisis para cada categoría de los costos de los sistemas de control de emisiones y la efectividad de cada uno, sugiere que los filtros, y en especial los filtros de papel y de chorro pulsante, son tecnologías óptimas en la reducción de la emisión de PM, en su fracción fina, para las industrias de los sectores CC1, CC2, CG1, CG2, CG3, HC y HL.

Una vez seleccionadas las tecnologías, se evaluó la medida según las dos metas de reducción en los dos escenarios propuestos. La primera meta en la reducción de emisiones (Meta A) se supuso tal que, una vez aplicada la medida y considerando el crecimiento de las emisiones por el crecimiento de la industria, en el año 2020 se tuviera una emisión anual muy similar a la emisión anual del año base. Esto porcentualmente, significa una reducción de alrededor del 40% en la emisión anual para el año 2020 para las opciones 1 y 2 respecto

al escenario tendencial. La segunda meta en la reducción de emisiones (Meta B) corresponde a la máxima reducción que se puede alcanzar mediante la implementación de esta medida en el sector industrial. Esto porcentualmente, significa una reducción de alrededor del 60% en la emisión anual para el año 2020 en las opciones 1 y 2 respecto al escenario tendencial.

**Tabla 2.17.** Costo capital de los sistemas de control de emisiones considerados en el análisis.

Nombre de sistema de control emisiones	Costo capital medio (\$ por m <sup>3</sup> /s <sup>1</sup> )	Costo capital medio del equipo (Millones de pesos 2009)						
		CC1	CC2	CG1	CG2	CG3	HG1	HL - HC
Filtros de Papel	\$46,657,000	\$28	\$19	\$58	\$61	\$44	\$21	\$233
Ciclones	\$13,021,000	\$8	\$5	\$16	\$17	\$12	\$6	\$65
Elutriadores	\$30,707,000	\$19	\$13	\$38	\$40	\$29	\$14	\$153
Separadores con Ayuda Mecánica	\$53,167,000	\$32	\$22	\$66	\$69	\$50	\$24	\$265
Separadores de Momento	\$7,899,000	\$5	\$3	\$10	\$10	\$7	\$4	\$39
Cámaras de Asentamiento	\$12,185,000	\$7	\$5	\$15	\$16	\$11	\$6	\$61
Depurador por Condensación	\$28,211,000	\$17	\$12	\$35	\$37	\$27	\$13	\$141
Depurador con Lecho de Fibra	\$9,223,000	\$6	\$4	\$12	\$12	\$9	\$4	\$46
Depurador Placa de Impacto/Torre de Bandejas	\$34,179,000	\$21	\$14	\$43	\$44	\$32	\$16	\$170
Depurador con ayuda mecánica	\$46,115,000	\$28	\$19	\$58	\$60	\$43	\$21	\$230
Depurador de Orificio	\$49,912,000	\$30	\$20	\$62	\$65	\$47	\$23	\$249
Depurador con Lecho Empacado	\$147,567,000	\$89	\$60	\$184	\$191	\$139	\$67	\$736
Depurador en Húmedo	\$18,663,000	\$11	\$8	\$23	\$24	\$18	\$9	\$93
Depurador Tipo Venturi	\$54,578,000	\$33	\$22	\$68	\$71	\$51	\$25	\$272
Incinerador Catalítico	\$258,242,000	\$156	\$105	\$322	\$335	\$244	\$118	\$1,288
Incinerador Tipo Recuperativo	\$257,157,000	\$155	\$105	\$321	\$334	\$243	\$118	\$1,282
Incinerador Termal	\$263,667,000	\$159	\$108	\$329	\$342	\$249	\$120	\$1,315
Filtro de Aire de Alta Eficiencia	\$16,167,000	\$10	\$7	\$20	\$21	\$15	\$7	\$81
Filtro (Sacudimiento Mecánico)	\$184,459,000	\$111	\$75	\$230	\$239	\$174	\$84	\$920
Filtro (Chorro Pulsante)	\$73,783,000	\$45	\$30	\$92	\$96	\$70	\$34	\$368
Filtro (Aire Invertido)	\$215,925,000	\$130	\$88	\$270	\$280	\$204	\$99	\$1,077
Precipitador Seco Tubo-Alambre	\$327,685,000	\$198	\$134	\$409	\$425	\$309	\$150	\$1,634
Precipitador Seco Placa-Alambre	\$98,740,000	\$60	\$40	\$123	\$128	\$93	\$45	\$492
Precip. Húmedo Tubo-Alambre	\$552,290,000	\$333	\$225	\$689	\$716	\$521	\$252	\$2,754
Precip. Húmedo Placa-Alambre	\$137,801,000	\$83	\$56	\$172	\$179	\$130	\$63	\$687

CC1: Caldera a carbón > 100 BHP; CC2: Caldera a carbón ≤ 100 BHP; CG1: Caldera a gas natural > 100 BHP (año fabricación ≤ 1997); CG2: Caldera a gas natural > 100 BHP (año fabricación > 1997); CG3: Caldera a gas natural ≤ 100 BHP; HG1: Horno de alimentos a gas natural; HG2: Horno de secado y curado a gas natural; HL: Horno ladrillero a carbón; HC: Horno a carbón.

En la Tabla 2.18 se presenta la meta de reducción de emisiones para la Opción 1, en el cual se asignó una meta a cada categoría proporcional al aporte de cada una al inventario en el año base.

**Tabla 2.18.** Meta de reducción de emisiones de PM para el Escenario 1.

Categoría	Porcentaje de la meta
CC1	27%
CC2	8%
CG1	11%
CG2	2%
CG3	0.2%
HL	52%
HC	3%

Bajo la Opción 2 se asignó la misma meta en reducción de emisiones pero la selección de las categorías y de las industrias de cada categoría se realizó teniendo como objetivo lograr la meta al mínimo costo posible.

En la Tabla 2.19 se presenta el número de industrias en las que sería necesario aplicar sistemas de control de emisiones para cada una de las metas de reducción para las opciones 1 y 2. Además se presenta el tiempo asignado en cada escenario para la implementación de la medida según el número de industrias involucradas.

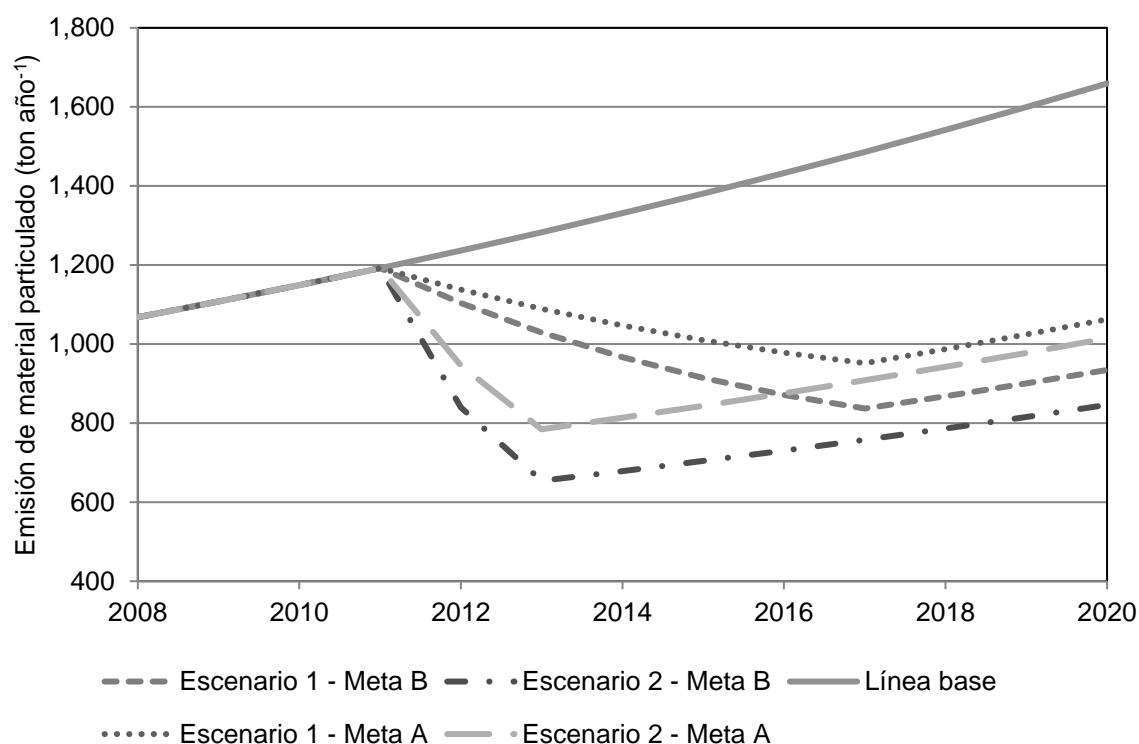
**Tabla 2.19.** Gradualidad en la implementación de la medida por escenarios.

Meta de Reducción	Escenario	Inicio de implementación de la medida	Tiempo de implementación (años)	Total de industrias	Introducción de la medida (número de industrias por año)
Meta A	Escenario 1	2012	6	125	21
	Escenario 2	2012	2	35	18
Meta B	Escenario 1	2012	6	603	101
	Escenario 2	2012	2	190	95

Las industrias seleccionadas a partir del ejercicio de minimización de costos para ambos escenarios corresponden al mínimo número de industrias necesario para cumplir la meta y por lo tanto se seleccionan las que aportan en mayor magnitud al inventario de emisiones.

En el Escenario 2 utilizando la meta de reducción A, las 35 industrias seleccionadas mediante el ejercicio de minimización de costos corresponden principalmente a las categorías CC1 (8 fuentes) y HL (23 fuentes) y en una proporción mínima aparecen industrias de los sectores CG1, CC2 y CG2 (4 fuentes). Esto quiere decir que teniendo costo-efectividad como único criterio, la meta de reducción propuesta se logra con aplicación de sistemas de control de emisiones en pocos sectores y no es necesario instalar sistemas para todas las categorías de la industria. Este fenómeno no se presenta al analizar este mismo escenario con la meta de reducción B, debido a que al buscar la máxima reducción posible es necesario instalar sistemas para todas las categorías de la industria.

En la Figura 2.11 se presenta la emisión de PM para el periodo comprendido entre los años 2008-2020 para las dos metas y los dos escenarios de instalación de sistemas de control de emisiones evaluados. Las emisiones que se presentan son las emisiones totales de la industria (esta medida no tiene efecto sobre NO<sub>x</sub>, COT y CO<sub>2</sub>).



**Figura 2.11.** Emisiones de material particulado en los escenarios de implementación de sistemas de control de emisiones en la industria.

En la Tabla 2.20 se presentan los costos asociados con el uso de sistemas de control de emisiones para los dos escenarios evaluados. En la Tabla 2.21 se presentan los costos por tonelada de PM reducida.

**Tabla 2.20.** Costos de implementación de sistemas de control de emisiones.

Meta de Reducción	Escenario	Costo total (millones) <sup>1</sup>
Meta A	Escenario 1	15,200
	Escenario 2	8,500
Meta B	Escenario 1	61,700
	Escenario 2	22,200

<sup>1</sup> Los costos se presentan en pesos constantes año 2009.

**Tabla 2.21.** Costos por tonelada de PM reducida.

Meta de Reducción	Escenario	Costo por tonelada reducida (millones) <sup>1</sup>
Meta A	Escenario 1	3
	Escenario 2	1
Meta B	Escenario 1	17
	Escenario 2	5



#### 4.3.3. Conversión de Carbón a Gas Natural y Formalización de una Fracción del Sector Informal de la Industria

En la Tabla 2.22 se presenta la reducción de las emisiones cuando se formaliza el 50% de las fuentes informales y adicionalmente se aplica la medida de implementación de gas natural. Se presenta el porcentaje de reducción en las toneladas anuales del año 2020 del escenario con la aplicación de la medida respecto al año 2020 del escenario tendencial.

**Tabla 2.22.** Reducción en las emisiones del año 2020 por formalizar el 50% de las fuentes industriales más la aplicación de los escenarios de implementación de gas natural.

Año	Escenario	PM	NO <sub>x</sub>	COT	CO <sub>2</sub>
2020	Escenario 10%	13%	3%	5%	3%
2020	Escenario 40%	27%	8%	4%	3%
2020	Escenario 60%	35%	17%	4%	2%
2020	Escenario 90%	52%	15%	10%	6%
2020	Escenario 100%	54%	15%	10%	6%

En la Tabla 2.23 se presentan los beneficios adicionales a la implementación de los escenarios de gas natural cuando adicionalmente se incluye en la medida el 50% de las fuentes informales de la ciudad.

**Tabla 2.23.** Beneficio adicional en la reducción de emisiones con la aplicación de la medida de uso masivo de gas natural con la introducción del 50% de las fuentes informales de la ciudad al sector formal.

Escenario	PM	NO <sub>x</sub>	COT	CO <sub>2</sub>
Escenario 10%	3%	1%	1%	0%
Escenario 40%	6%	2%	1%	1%
Escenario 60%	8%	8%	1%	0%
Escenario 90%	14%	3%	2%	3%
Escenario 100%	14%	3%	3%	2%

Cuando se incluye al 50% de las fuentes del sector informal en la aplicación de la medida de gas natural, se logran reducciones en la emisión de PM en el año 2020 hasta del 50% respecto al año 2020 del escenario tendencial (ver Tabla 2.22).

En el Anexo 2.8 se presenta la proyección de las emisiones de PM, NO<sub>x</sub>, COT y CO<sub>2</sub> hasta el año 2020 con la aplicación de estas dos medidas. Los costos de la medida bajo los diferentes escenarios de implementación se presentan en la Tabla 2.24 mientras que en la Tabla 2.25 se presentan los costos por tonelada de PM reducida.

En la evaluación del costo de la medida únicamente se están considerando los costos asociados a reconversión de las industrias formales hacia gas natural. El costo de la formalización de las industrias no se considera un costo del PDDB. Se supone que la formalización de las industrias responde principalmente a otras políticas del gobierno diferentes de las ambientales y por lo mismo el costo debe ser asumido por otros sectores.

**Tabla 2.24.** Costo (por escenarios) asociados con el uso masivo de gas natural.

Escenario	Escenario 10%	Escenario 40%	Escenario 60%	Escenario 90%	Escenario 100%
Costo total (millones) <sup>1</sup>	9,700	25,100	35,800	54,500	64,100

<sup>1</sup>Los costos se presentan en pesos constantes año 2009.

**Tabla 2.25.** Costo por tonelada de PM reducida.

Escenario	Costo por tonelada de PM (millones de pesos/ton PM)
Escenario 10%	5
Escenario 40%	7
Escenario 60%	6
Escenario 90%	6
Escenario 100%	6

#### 4.3.4. *Uso de Sistemas de Control de Emisiones en Industrias del Sector Ladrillero y Reubicación de Fuentes*

En la Tabla 2.26 se presenta el efecto de ubicar fuera del perímetro urbano una fracción de las fuentes del sector ladrillero (las de menor consumo energético) y de implementar sistemas de control de emisiones en las fuentes restantes (la de mayor consumo de combustible). Se presenta la reducción porcentual de las toneladas emitidas en el año 2020 respecto al año 2020 de la línea base.

**Tabla 2.26.** Reducción alcanzada al reubicar una fracción del sector ladrillero y aplicar sistemas de control de emisiones a la fracción remanente respecto al año 2020.

Año	Escenario	PM	NO <sub>x</sub>	COT	CO <sub>2</sub>
2020	Escenario 1	30%	1%	2%	1%
2020	Escenario 2	34%	0%	1%	0%
2020	Escenario 3	33%	0%	0%	0%
2020	Escenario 4	33%	0%	0%	0%

Los costos de la medida bajo los diferentes escenarios de implementación se presentan en la Tabla 2.27. Estos valores únicamente incluyen los costos asociados a la implementación de los sistemas de control de emisiones. El costo de la reubicación de fuentes industriales deber ser asumido como parte de las políticas de ordenamiento territorial de la ciudad.

**Tabla 2.27.** Costo por escenarios asociados con el uso masivo de gas natural.

Escenario	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Costo total (millones) <sup>1</sup>	6,100	7,900	8,700	12,200

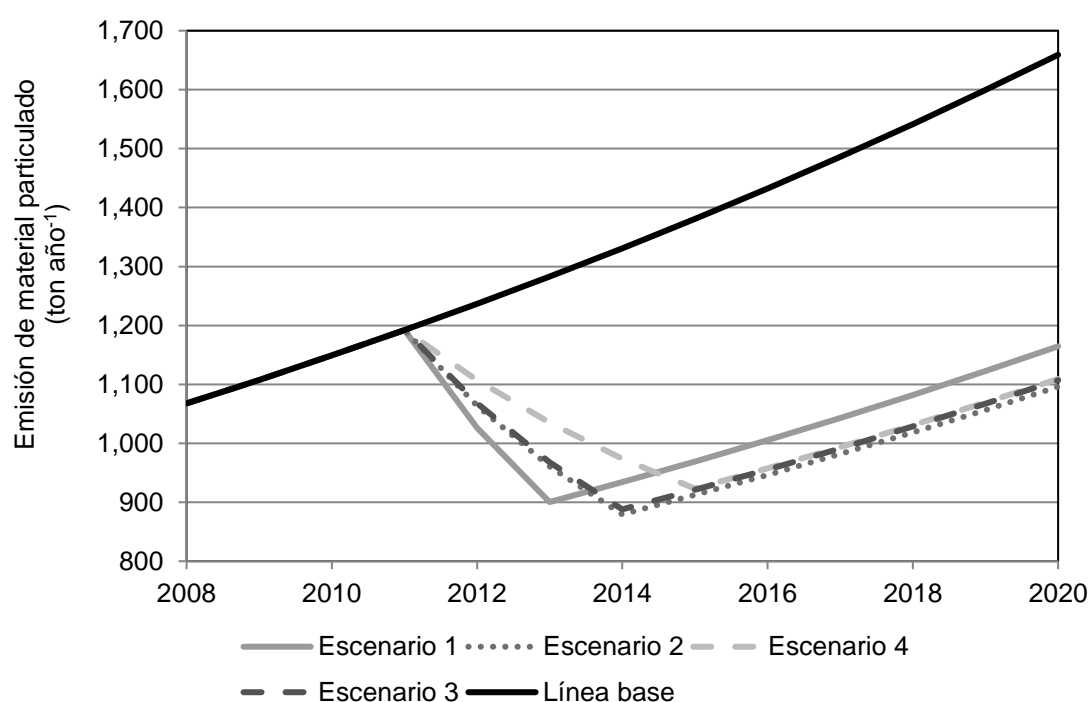
<sup>1</sup>Los costos se presentan en pesos constantes año 2009.

En la Tabla 2.28 se presentan los costos por tonelada de PM reducida.

**Tabla 2.28.** Costo por tonelada de PM reducida.

Modo de implementación	Costo por tonelada de PM (millones de pesos/ton PM)
Escenario 1	1
Escenario 2	2
Escenario 3	2
Escenario 4	3

En la Figura 2.12 se presenta la proyección de las emisiones con la aplicación de esta medida (efecto sobre las emisiones totales del sector industrial de la ciudad).



**Figura 2.12.** Emisiones de material particulado con la aplicación de la medida.

#### 4.3.5. Comparación de las Medidas

En la Tabla 2.29 se presenta la comparación de las medidas evaluadas para el sector industrial. La reducción en emisiones que se presenta corresponde a la comparación de las emisiones en el año 2020 del escenario base con las emisiones para este mismo año cuando se aplican las medidas.

Las medidas evaluadas tienen una eficiencia en la reducción de toneladas de PM reducidas entre el 10% y el 54%. La conversión de las industrias hacia el uso de gas natural (escenarios 90% y 100%) y el uso de sistemas de control de emisiones (Meta B) son las medidas que presentan el mayor porcentaje de reducción en las emisiones.

El costo de las tres medidas más efectivas varía entre 22,000 y 80,000 millones de pesos, siendo el uso de sistemas de control de emisiones en un mínimo número de fuentes industriales (Meta B - Escenario 2) la medida de menor costo.

**Tabla 2.29.** Comparación de las medidas propuestas para el sector industrial.

Medida	Escenario	Costo total (miles de millones pesos)	Reducción en las emisiones en el año 2020 (%)			
			PM	NO <sub>x</sub>	COT	CO <sub>2</sub>
Uso masivo de gas natural en la industria	Escenario 10%	10	10%	2%	4%	3%
	Escenario 40%	25	21%	6%	3%	2%
	Escenario 60%	36	27%	9%	3%	2%
	Escenario 90%	54	38%	12%	8%	3%
	Escenario 100%	64	40%	12%	7%	4%
Uso de sistema de control de emisiones	Escenario 1 (Meta A)	15	36%	0%	0%	0%
	Escenario 2 (Meta A)	8	39%	0%	0%	0%
	Escenario 1 (Meta B)	62	44%	0%	0%	0%
	Escenario 2 (Meta B)	22	49%	0%	0%	0%
Formalización del sector informal y uso masivo de gas natural en la industria	Escenario 10%	10	13%	3%	5%	3%
	Escenario 40%	25	27%	8%	4%	3%
	Escenario 60%	36	35%	17%	4%	2%
	Escenario 90%	54	52%	15%	10%	6%
	Escenario 100%	64	54%	15%	10%	6%
Uso de sistema de control de emisiones y reubicación del sector ladrillero	Escenario 1	6	30%	1%	2%	1%
	Escenario 2	8	34%	0%	1%	0%
	Escenario 3	9	33%	0%	0%	0%
	Escenario 4	12	33%	0%	0%	0%

Una recomendación complementaria a la aplicación de cualquiera de las medidas anteriormente propuestas consiste en la capacitación de los operarios de las industrias. Esto debido a que, tal y como fue documentado en la primera etapa de este proyecto (SDA-SUR, 2009) la manera como se manejan los equipos de combustión es determinante en las emisiones generadas por las fuentes de este sector.

#### 4.4. Instrumentos e Incentivos para Implantar las Medidas Propuestas

La literatura sobre instrumentos regulatorios y de incentivos para implantar medidas de reducción de las emisiones discute dos grandes enfoques: **1)** Comando y control; y **2)** incentivos económicos (Pearce y Turner 1990; Field y Field 2009). A su vez, el enfoque de incentivos económicos se puede dividir en dos grupos: impuestos y subsidios por emisión; y esquemas de permisos mercadeables.

El enfoque de comando y control se basa en definir límites de emisión y/o estándares de tecnología. Este enfoque suele ser efectivo pero requiere de grandes cantidades de información y actualización, tiene altos costos de seguimiento y verificación, y requiere de una serie de entidades fortalecidas.

Por su parte, los esquemas basados en incentivos apelan a la decisión racional de los agentes que enfrentan penalizaciones o bonificaciones por cambiar su forma de producción, su tecnología o su combustible. Los esquemas basados en cargos ponen un precio al nivel de las emisiones, que puede ser una función creciente y convexa de las cantidades emitidas. El aspecto más importante de los esquemas de incentivos de este tipo es que promueven la eficiencia económica. Si todas las fuentes emisoras enfrentan el mismo precio, las firmas igualarán cada una de ellas sus costos y beneficios en el margen. Los

administradores del esquema no tienen necesidad de las peculiaridades de cada fuente ni de cada industria.

Los esquemas basados en precios son más fáciles de administrar y generan ingresos públicos que pueden destinarse a, por ejemplo, inversiones en temas de salud o pueden ayudar a fondear algunas conversiones de tecnología, costos de relocalización o filtros reductores de la contaminación.

Los esquemas basados en permisos mercadeables se basan en definir un techo total de emisiones y luego asignar derechos de contaminación. En principio, los agentes económicos más contaminantes evaluarán si vale la pena invertir directamente en la reducción de sus emisiones, o pagarle a otra firma o industria que posea derechos de contaminación y pueda reducir la contaminación a menor costo.

En teoría, sin limitaciones de información, costos de transacción y sin distorsiones en los mercados, ambos métodos deben dar la misma solución eficiente. Entonces, la implantación es un asunto práctico que implica entender el contexto, la facilidad de administración del esquema y la probabilidad de captura del mismo por intereses especiales.

Esta propuesta descarta los permisos mercadeables ya que requieren de condiciones muy específicas para hacer valer el esquema y evitar su captura y abuso por intereses inescrupulosos. Aunque los esquemas de permisos mercadeables son muy populares en Estados Unidos y se sugiere en muchas ocasiones como norma, la práctica demuestra que perpetúa intereses equivocados. Los que tienen el derecho a contaminar no tienen el incentivo para mejorar su tecnología porque reducen su rentabilidad. Y los agentes económicos poderosos pueden terminar capturando el esquema a su favor cuando logran seguir contaminando a precios bajos.

El esquema de precios a la contaminación no sólo tiene un aspecto de equidad ambiental (basado en el principio de “el que contamina paga”), sino que es más fácil de administrar y se puede combinar con un esquema de financiación de equipos de descontaminación o reconversión. Nótese que el orden de magnitud de las inversiones necesarias para reducir las emisiones entre 2010 y 2020 es relativamente modesto. Por ejemplo, el Escenario 90% de la medida de formalizar el sector informal y usar masivamente gas en la industria tendría un costo de 70,000 millones de pesos de 2009 (USD 35 millones).

La propuesta de esta parte del trabajo consiste en: (i) La constitución de un Fondo de Financiación para la Descontaminación de Fuentes Fijas que financie el cambio voluntario de equipos, instalación de filtros o traslado de industrias, acompañado por un estudio que demuestre la costo-efectividad de la solicitud; (ii) Definir un precio a la contaminación por unidad emitida suficientemente alto. Si los intereses que se pagan son inferiores a los cargos por contaminación, un agente económico racional preferirá invertir en reducción de emisiones.

Esta propuesta resuelve además las imperfecciones de los mercados de capitales, se puede implantar con financiación de la banca multilateral y puede ajustar los intereses de la deuda para lograr equidad entre firmas y/o eficiencia en la conversión. Aunque suene antiintuitivo, puede ser mejor poner intereses más bajos a las industrias más contaminantes. Los contaminadores ocasionales preferirán pagar los cargos (lo que es eficiente para la sociedad, a cambio de obligar a límites o estándares uniformes que imponen sobrecostos en las firmas pequeñas y que contaminan poco).

## 5. CONCLUSIONES

- Las medidas evaluadas en este estudio tienen una eficiencia entre el 10% y el 50% de reducción en las toneladas emitidas de material particulado, respecto a la emisión anual de este contaminante en el año 2020 del escenario tendencial.
- El orden de magnitud de las inversiones necesarias para implementar las medidas propuestas en este trabajo es relativamente modesto. El costo varía entre 6 mil y 80 mil millones de pesos.
- La conversión de las industrias hacia el uso de gas natural (escenarios 90% y 100%) y el uso de sistemas de control de emisiones (Meta B) son las medidas que presentan el mayor porcentaje de reducción en las emisiones. De éstas, el uso de sistemas de control de emisiones en un mínimo número de fuentes industriales (Meta B - Escenario 2) es la medida de menor costo.
- Atraer las fuentes informales de la industria hacia el sector formal, resultaría en un beneficio adicional importante en términos de las reducciones que se alcanzarían en las emisiones con la implementación de las medidas propuestas.
- Es posible reducir de manera significativa las emisiones de material particulado del sector industrial con la aplicación de medidas en un número reducido de fuentes. Sin embargo, es importante tener en cuenta que aunque se logren las metas en calidad del aire implementando medidas en pocas fuentes, esta no es la situación ideal desde el punto de vista de la exposición de la población, bajo este enfoque es mejor incluir al mayor número de fuentes posibles.

## REFERENCIAS

Asociación Colombiana de Gas Natural (Naturgas). 2008. Disponibilidad futura del gas en Colombia. Balance probabilístico de gas natural 2008-2020.

Banco de la República. 2009. Series estadísticas. Producción, salarios y empleo. Cuentas nacionales Metodología año base 1994-PIB. PIB grandes ramas de actividad económica a precios constantes de 1994. Trimestral desde 1994 (Millones de pesos). Recuperado en marzo 2009 de: <http://www.banrep.gov.co/estad/dsbb/ctanal1sr.htm>

Barros, L.; Cadena, A. 2004. Competitividad del gas natural en el sector industrial de la zona centro de Colombia. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Universidad de los Andes.

Cadena, A., Delgado, R., Duque, A., Espinosa, M., Espinosa, M., Marcucci, A. 2008. Colombia: Diagnóstico, perspectivas y lineamientos para definir estrategias posibles ante el cambio climático. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica Universidad de los Andes. Emgesa-Codensa.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). 2006. Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las Actividades Económicas. Revisión 3.1.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). 2006a. Ficha metodológica, Encuesta Anual Manufacturera.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). 2009. Encuesta anual manufacturera. Sistema de consulta en línea. Años 2005-2007. Recuperado en agosto de 2009 de: <http://190.25.231.249/encuestas/eam/seleccion.htm?x=32&y=22>

Environmental Protection Agency (EPA). 2008. Emission Factors and AP 42. Recuperado en febrero de 2009 de: <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>

Environmental Protection Agency (EPA). 2009. Technology Transfer Network. Clean Air Technology Center. CATC Technical Bulletins & Air Pollution Technology Fact Sheets. Recuperado en mayo de 2009 de: <http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html>

Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR). 2008. Definición de elementos técnicos para la formulación de políticas distritales encaminadas al mejoramiento de la calidad del aire en Bogotá. Parte A-Inventario de emisiones provenientes de fuentes fijas.

Field, B. C. y M. K. Field. 2009. Environmental Economics – An Introduction. New York, NY: McGraw-Hill.

Pearce, D. y R. K. Turner. 1990. Economics of Natural Resources and the Environment. Baltimore, MD: Johns Hopkins.

Ruiz, F., 2002. Simulación de la contaminación atmosférica generada por fuentes móviles en Bogotá. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional.

Universidad de los Andes. CEDE. 2009. "Construcción de una Matriz de Contabilidad Social de Bogotá D.C. 2006 y Estimación de Parámetros de Formas Flexibles." Marzo de 2009.

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). 2003. Plan energético nacional, Estrategia energética integral 2003-2020.

**PLAN DECENAL DE DESCONTAMINACIÓN DE BOGOTÁ**

**PARTE B - DOCUMENTO DE TRABAJO**

**SECCIÓN 3 – MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN Y PROGRAMACIÓN  
DE PROYECTOS DEL PLAN DE DESCONTAMINACION**



## TABLA DE CONTENIDO

1. ASPECTOS GENERALES.....	1
2. INTRODUCCIÓN .....	2
3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO.....	3
3.1. Estructuración del Problema .....	3
3.2. Características del Modelo Matemático .....	6
3.3. Formulación Matemática del Modelo de Optimización .....	10
3.3.1. Conjuntos .....	10
3.3.2. Parámetros.....	10
3.4. Solución del Problema .....	19
4. BANCO DE PROYECTOS DEL PLAN DECENAL DE DESCONTAMINACIÓN .....	20
5. RESULTADOS.....	24
5.1. Potencial Máximo de Reducción de Material Particulado y Costos Asociados .....	24
5.2. Metas de Reducción de Emisiones del Plan y Portafolio Óptimo de Proyectos.....	28
6. CONCLUSIONES .....	33
REFERENCIAS .....	34

ANEXO 3.1. Modelo matemático para convertor unidades de concentración atmosférica en unidades de emisión de contaminantes.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Toma de decisiones a través de optimización. ....	3
Figura 3.2. Esquema de selección y programación de proyectos. ....	5
Figura 3.3. Ejecución de un proyecto. ....	7
Figura 3.4. Modos de ejecución de un proyecto. ....	8
Figura 3.5. Beneficios de un proyecto. ....	8
Figura 3.6. Interacción entre proyectos. ....	9
Figura 3.7. Costo económico proyectado. ....	10
Figura 3.8. Impacto esperado de dos proyectos 1 y 2. ....	13
Figura 3.9. Nivel del indicador PM en el tiempo (línea base). ....	14
Figura 3.10. Programación de los proyectos 1 y 2. ....	14
Figura 3.11. Efecto de los proyectos sobre el nivel del indicador PM. ....	16
Figura 3.12. Programación de proyectos y costo económico total. ....	18
Figura 3.13. Análisis de resultados. ....	19
Figura 3.14. Curva de costos asociada a diferentes metas de emisión en el año 2020 para el sector transporte. ....	24
Figura 3.15. Curva de costos asociada a diferentes metas de emisión en el año 2020 para el sector industrial. ....	25
Figura 3.16. Emisión de material particulado entre los años 2010 y 2020 en el escenario tendencial en comparación con las emisiones con la aplicación del plan de descontaminación. ....	30
Figura 3.17. Emisión de óxidos de nitrógeno entre los años 2010 y 2020 en el escenario tendencial en comparación con las emisiones con la aplicación del plan de descontaminación. ....	30
Figura 3.18. Emisión de monóxido de carbono entre los años 2010 y 2020 en el escenario tendencial en comparación con las emisiones con la aplicación del plan de descontaminación. ....	31
Figura 3.19. Emisión de compuestos orgánicos totales entre los años 2010 y 2020 en el escenario tendencial en comparación con las emisiones con la aplicación del plan de descontaminación. ....	31

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Resultados de la estructuración del problema. ....	6
Tabla 3.2. Costo económico asociado a la programación de proyectos. ....	18
Tabla 3.3. Sector transporte: motocicletas. ....	20
Tabla 3.4. Sector transporte: vehículos pesados de carga. ....	20
Tabla 3.5. Sector transporte: flota de transporte público colectivo y masivo. ....	21
Tabla 3.6. Sector transporte: vehículos privados de pasajeros. ....	22
Tabla 3.7. Sector industrial. ....	23
Tabla 3.8. Portafolio de proyectos y programación asociada a las diferentes metas de emisión de material particulado para el sector transporte. ....	26
Tabla 3.9. Portafolio de proyectos y programación asociada a las diferentes metas de emisión de material particulado para el sector industrial. ....	27
Tabla 3.10. Beneficios acumulados en reducción de emisiones de PM para el periodo 2010- 2020 para en el sector transporte asociado a los diferentes portafolios de proyectos. ....	27
Tabla 3.11. Beneficios acumulados en reducción de emisiones de PM para el periodo 2010- 2020 para en el sector industrial asociado a los diferentes portafolios de proyectos. ....	28
Tabla 3.12. Meta en emisiones de PM del plan de descontaminación. ....	28
Tabla 3.13. Portafolio óptimo de proyectos del plan de descontaminación y cronograma de implementación. ....	29
Tabla 3.14. Comparación entre las emisiones acumuladas en los tres escenarios. ....	32

## **1. ASPECTOS GENERALES**

Este documento constituye la Sección 3 (Modelo de optimización para la selección y programación de los proyectos que conforman el Plan Decenal de Descontaminación de Bogotá). Dicho estudio se desarrolló en el marco del Contrato de Ciencia y Tecnología Número 1040 de 2008; celebrado entre la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), Transmilenio S.A. (TMSA) y la Universidad de los Andes.

En esta sección se describe la metodología utilizada para diseñar el modelo de optimización, el cual fue utilizado en la selección de los proyectos que conforman el plan decenal de descontaminación. Asimismo, se presentan resultados del ejercicio de optimización, incluyendo las curvas de costos marginales para reducción de PM en los sectores de industria y transporte y los resultados de optimización para la meta de reducción de contaminantes propuesta en el plan de descontaminación de la ciudad.

## 2. INTRODUCCIÓN

La toma de decisiones es un proceso inherente a la operación de cualquier organización. Sin embargo, existen diferencias sobre el impacto de dichas decisiones de acuerdo al contexto en el que se ejecuten. En este caso, las decisiones involucran la implementación de proyectos de descontaminación del aire en Bogotá. Las decisiones tomadas comprometen la utilización de recursos escasos (e.g. capacidad de gestión) y generan unos beneficios e impactos económicos sobre la población. Por lo tanto, es deseable utilizar dichos recursos de la forma más eficiente posible, de tal forma que se alcancen las metas ambientales al menor costo económico. En este contexto, se pretende seleccionar y programar en un horizonte de planeación de 10 años el mejor conjunto de proyectos de descontaminación de aire para Bogotá.

El proceso de toma de decisiones es un proceso complejo ya que implica la evaluación de múltiples portafolios de proyectos. Es posible que varias configuraciones de ejecución de proyectos sean viables, pero sólo muy pocas (o a veces sólo una) pueden ser consideradas como las mejores para llevar a la práctica. Adicionalmente, la complejidad de la decisión se incrementa considerando que las decisiones deben tomarse en un lapso limitado de tiempo con la información disponible. Por estas razones, es vital la evaluación sistemática y rápida de las posibles configuraciones de ejecución de proyectos. Tomar una decisión compleja puede llegar a ser imposible sin alguna abstracción matemática y sin la ayuda de herramientas computacionales que ayuden a evaluar lo que, literalmente, representa millones de configuraciones.

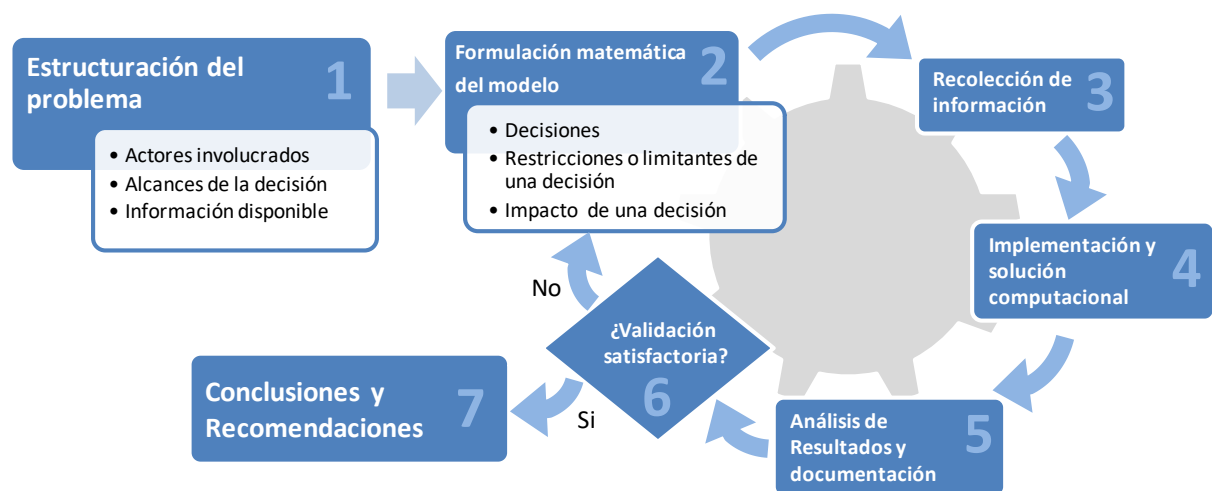
En este documento se presenta una metodología rigurosa de toma de decisiones que se apoya en herramientas cuantitativas y computacionales. Dicha metodología combina datos, modelos cuantitativos (particularmente de programación matemática) y herramientas computacionales, conformando así un *sistema de apoyo a la decisión*.

### 3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Una de las herramientas matemáticas disponibles para soportar los sistemas de apoyo a la decisión es la *optimización*. Sin embargo, para su aplicación adecuada es necesaria una etapa previa para entender y estructurar el problema subyacente a la decisión (ver Figura 3.1). Este proceso pretende identificar los actores involucrados y los alcances de la decisión. En otras palabras, se especifican los aspectos que estarán fuera del alcance de la decisión y, aquellos que se modificarán producto de la decisión. En esta etapa también se debe evaluar la disponibilidad de información, ya que no será posible determinar si una configuración de proyectos es más conveniente que otra si no existe información suficiente para compararlas.

Una vez se ha estructurado el problema se formula un modelo matemático. Dicho modelo busca representar matemáticamente de la situación a la que se enfrenta el tomador de decisión de una forma simplificada pero acorde con el alcance establecido. En este sentido, debe asegurarse que el modelo represente correctamente tres aspectos fundamentales: 1) las decisiones, 2) las reglas que limitan las decisiones y 3) el impacto de una decisión sobre uno o más criterios.

Una vez se ha realizado la abstracción matemática de la realidad (modelo), se debe recolectar la información necesaria, luego se debe realizar una traducción del modelo a un lenguaje que el computador pueda entender, y finalmente a través del computador, se pueden evaluar una gran cantidad de alternativas y escoger entre ellas la mejor. A partir de la solución encontrada se valida el modelo en conjunto con el tomador de decisión de tal forma que se ajuste a la situación real. Si no es así, el modelo debe ajustarse, replanteando la formulación matemática (ver Figura 3.1) hasta realizar una validación satisfactoria. Cuando lo anterior ocurre, es posible determinar que se ha encontrado la mejor (o mejores) decisión de acuerdo a los criterios y alcance establecidos.



Fuente: Medaglia y Sefair (2009)

**Figura 3.1.** Toma de decisiones a través de optimización.

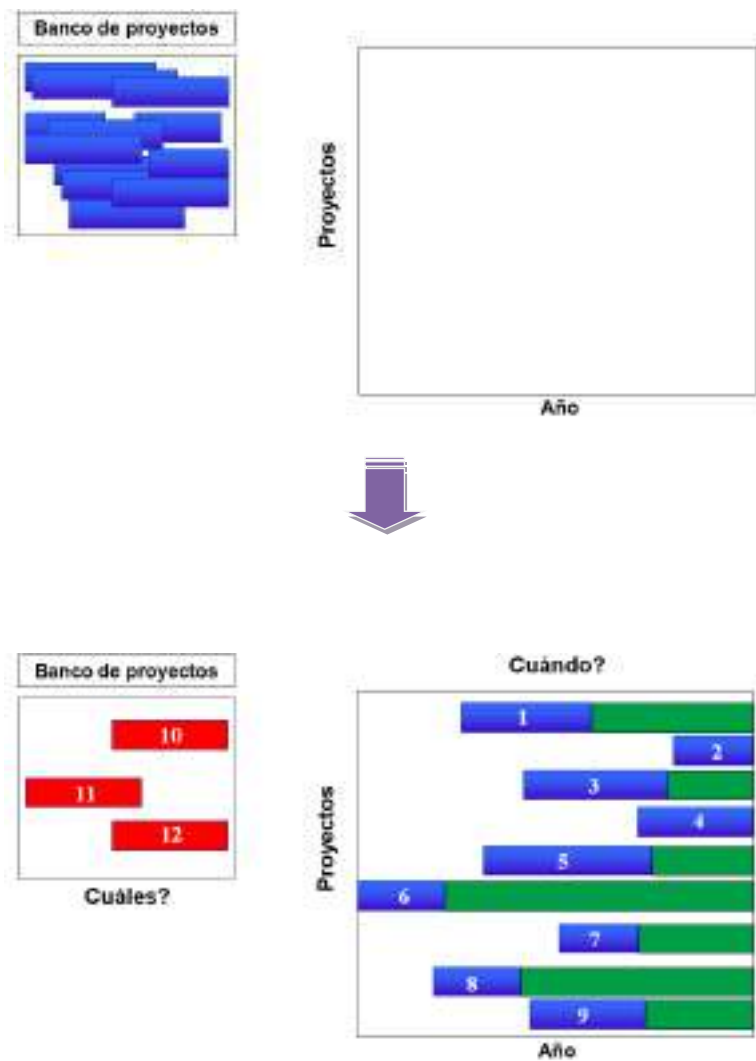
#### 3.1. Estructuración del Problema

Se considera un banco de proyectos como el que se muestra en la parte superior de la Figura 3.2. Dicho banco de proyectos contiene todos los proyectos candidatos a ser ejecutados. En la parte inferior de la Figura 3.2 se muestra como ejemplo la selección y

programación de un subconjunto de los proyectos candidatos en un horizonte de planeación anual. Allí se puede observar que los proyectos 1 a 9 son ejecutados en algún punto dentro del horizonte de planeación, mientras que los proyectos 10, 11 y 12 quedaron por fuera de la programación. Adicionalmente, se tiene que el proyecto 6 se debe llevar a cabo al inicio del horizonte de planeación. Luego se deben ejecutar, en su orden, los proyectos 8, 1, 5, 3, 9, 7 y finalmente el proyecto 2.

La parte inferior de la Figura 3.2 también muestra que cada uno de los proyectos cuenta con dos etapas. La primera de ellas hace referencia a la implementación del proyecto, en donde gradualmente se introduce la medida de política ambiental. Por ejemplo, considere que uno de los proyectos se refiere a la reconversión a gas natural del sector industrial. Por lo tanto, el primer período de ejecución pretende la reconversión de 10% de la industria, en el segundo período se pretende llegar al 20%, y así sucesivamente hasta alcanzar al 40% de la industria. Estos períodos de implementación están representados en color azul para cada proyecto en la parte inferior de la Figura 3.2. Por su parte, la porción restante de cada proyecto representa los períodos en donde se perciben los beneficios del mismo. Estos periodos están representados en color verde en la parte inferior de la Figura 3.2. Debe aclararse que aunque aquí se presentan como excluyentes las etapas de implementación y generación de beneficios, es posible considerar que un proyecto genera beneficios desde el primer año de ejecución.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores se aplicó un modelo matemático para la selección y programación de los proyectos del plan de descontaminación del aire de Bogotá. En la Tabla 3.1 se presentan los resultados obtenidos en la estructuración del problema (Etapa 1), en donde se describen los actores involucrados, los alcances de la decisión y la información disponible.



**Figura 3.2.** Esquema de selección y programación de proyectos.



**Tabla 3.1.** Resultados de la estructuración del problema.

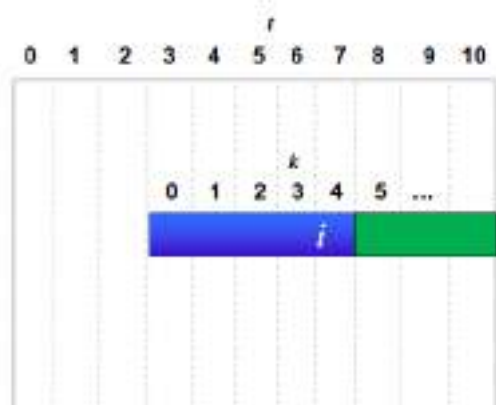
Actores involucrados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gobierno Distrital.</li> <li>• Otras entidades del gobierno distrital y nacional.</li> <li>• Ciudadanía.</li> <li>• Sector privado.</li> </ul>
Alcances de la decisión	A partir de un conjunto de proyectos candidatos, seleccionar y programar el mejor subconjunto de proyectos de descontaminación del aire, minimizando el costo económico de la decisión.
Información requerida	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conjunto de proyectos candidatos.</li> <li>• Conjunto de categorías en las que pueden ser clasificados los proyectos (e.g., tipo de fuente).</li> <li>• Conjunto de modos en los que puede ejecutarse un proyecto.</li> <li>• Longitud del horizonte de planeación (10 años).</li> <li>• Fechas más temprana y tardía de inicio de cada proyecto.</li> <li>• Categoría a la que pertenece un proyecto (un proyecto puede pertenecer a varias categorías).</li> <li>• Número máximo de proyectos que es posible iniciar cada año.</li> <li>• Costo económico de cada proyecto para cada uno de sus modos de ejecución.</li> <li>• Meta de reducción de contaminantes que debe cumplirse al final del horizonte de planeación.</li> <li>• Proyección de emisiones contaminantes para el horizonte de planeación.</li> <li>• Reducción esperada de emisiones (impacto) de cada proyecto en cada período de ejecución y en cada modo de ejecución.</li> <li>• Efecto de interacción sobre la reducción de emisiones entre dos o más proyectos dados sus modos de ejecución.</li> </ul>

### 3.2. Características del Modelo Matemático

Una vez se ha estructurado el problema y se ha establecido el alcance del modelo, es preciso determinar las reglas que limitan las decisiones, es decir, las condiciones que un portafolio de proyectos debe cumplir. Dichas condiciones son pieza fundamental en el modelaje matemático del problema, ya que permiten eliminar muchas configuraciones no factibles de proyectos de acuerdo a las características del problema. A continuación se presentan las reglas identificadas.

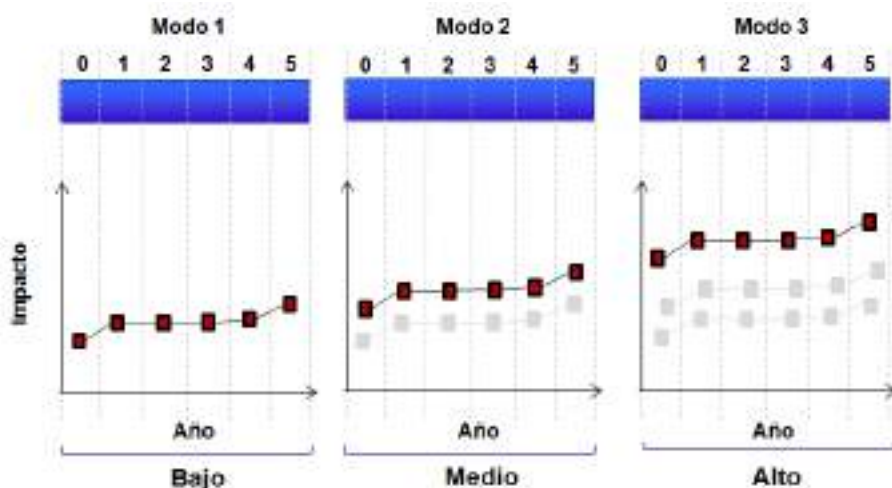
1. Un proyecto debe iniciarse solamente una vez dentro del horizonte de planeación. Esto debe cumplirse para cada proyecto, asegurando de esta forma que el modelo matemático no considere la ejecución de un proyecto más de una vez.

2. La cantidad de proyectos iniciados cada año no puede superar la máxima cantidad establecida. Esta regla cumple dos propósitos. En primer lugar, asegura que los proyectos sean ejecutados de forma balanceada durante todo el horizonte de planeación. En segundo lugar, esta condición permite modelar la capacidad de operación y gestión de proyectos que podría ser limitada. Esta condición asegura que el modelo no asigne una gran cantidad de proyectos para ser iniciados en un mismo año.
3. Una vez se inicie un proyecto, debe asegurarse su ejecución hasta el final del horizonte de tiempo. Esto permitirá contabilizar tanto el impacto de un proyecto como los costos económicos generados. En la Figura 3.3 se muestra un ejemplo de esta condición. Allí el proyecto  $i$  inicia en el año 3 del horizonte de planeación. Por lo tanto, debe asegurarse que dicho proyecto se termina de implementar en el año 7 y que continúa operando hasta el año 10 (fin del horizonte).



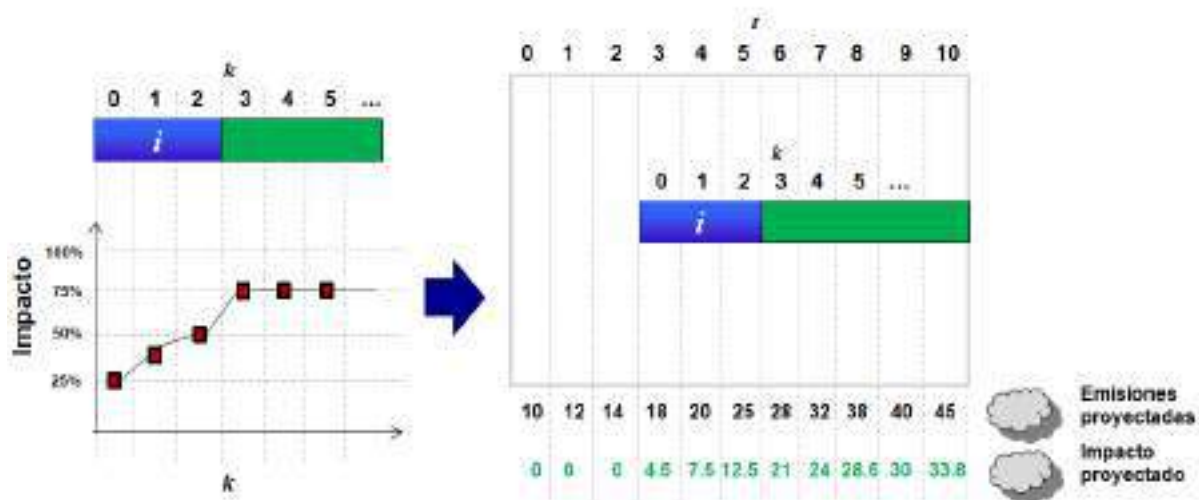
**Figura 3.3.** Ejecución de un proyecto.

4. La fecha de inicio de cada proyecto debe encontrarse dentro de la ventana de ejecución establecida. Esto permite considerar que la ejecución de un proyecto tenga que iniciarse antes o después de una determinada fecha. Por ejemplo, si el proyecto  $i$  de la Figura 3.3 tuviera como fecha máxima de inicio el año 3, entonces debería iniciar en el año 0, 1, 2, ó 3 (si se escoge). No podría iniciar en ningún otro año del horizonte de planeación.
5. Para una determinada categoría, debe elegirse un número mínimo de proyectos. Esto asegura que el modelo matemático no elija proyectos de unas pocas categorías solamente. Por ejemplo, si los proyectos se han categorizado en aquellos que afectan fuentes fijas de emisiones y aquellos que afectan fuentes móviles, entonces podría especificarse que el modelo debe seleccionar al menos un proyecto en cada categoría. Una aproximación al tratamiento matemático de esta característica puede encontrarse en Sefair & Medaglia (2009).
6. Un proyecto debe ejecutarse solamente en uno de sus modos de ejecución. En este sentido se considera que un proyecto puede ejecutarse en varios modos, los cuales hacen referencia a la escala de operación del proyecto. Por ejemplo, considere un proyecto que pretende realizar la reconversión tecnológica de cierta industria. Los modos de ejecución de dicho proyecto se muestran en la Figura 3.4, en donde se considera una escala de operación con impacto bajo, medio y alto. Por lo tanto, el modelo debe elegir el modo de ejecución más conveniente. Debe considerarse que la mejor elección no siempre es la elección del modo de ejecución con impacto más alto. Deben analizarse también los costos que involucra dicha decisión.



**Figura 3.4.** Modos de ejecución de un proyecto.

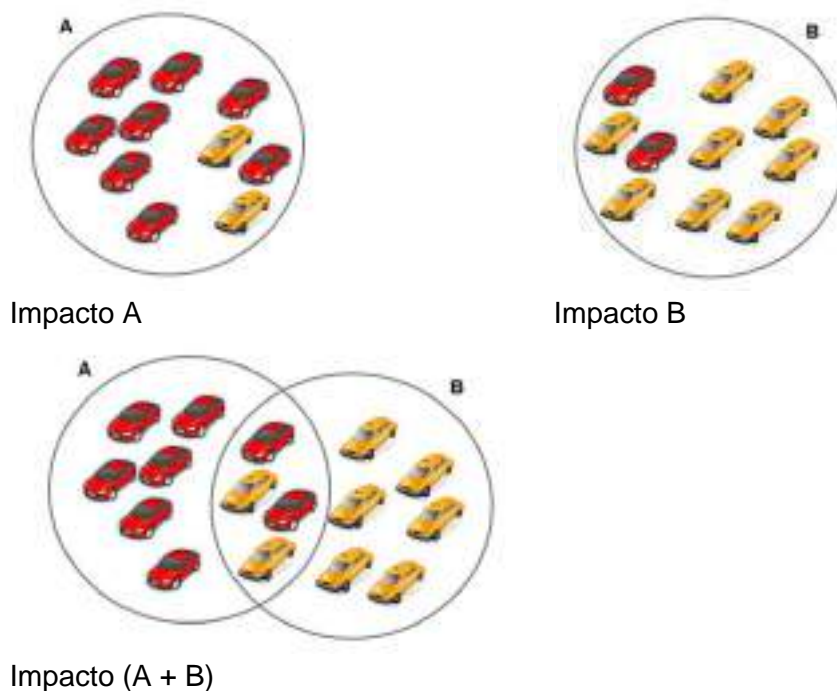
7. Al final del horizonte de planeación debe generarse un mínimo de beneficios ambientales (meta ambiental). Esto implica que el impacto agregado (beneficio) de la ejecución de los proyectos durante el horizonte de planeación debe ser superior o igual a la meta propuesta. En este sentido debe considerarse que los beneficios de un proyecto se cuantifican de acuerdo a la fecha en donde comenzó a ser ejecutado. Por ejemplo, en la Figura 3.5 se presenta el impacto generado por un proyecto que se inicia en el año 3. Allí se estima que la ejecución del proyecto reducirá las emisiones en un 25% en su primer año de ejecución. Para el segundo y tercer año se esperan reducciones de 37.5% y 50%, respectivamente. Desde el tercer año (año en donde el proyecto se ha implementado completamente) se esperan reducciones del 75%. De esta forma, la Figura 3.5 muestra el impacto proyectado del proyecto si se ejecutara en el año 3 del horizonte de planeación. Debe tenerse en cuenta que para la cuantificación del impacto se debe considerar el ajuste de las emisiones proyectadas dada la ejecución de otros proyectos anteriormente. El impacto de un proyecto también puede cuantificarse de forma absoluta a través de la reducción estimada de contaminantes medidos en toneladas.



**Figura 3.5.** Beneficios de un proyecto.

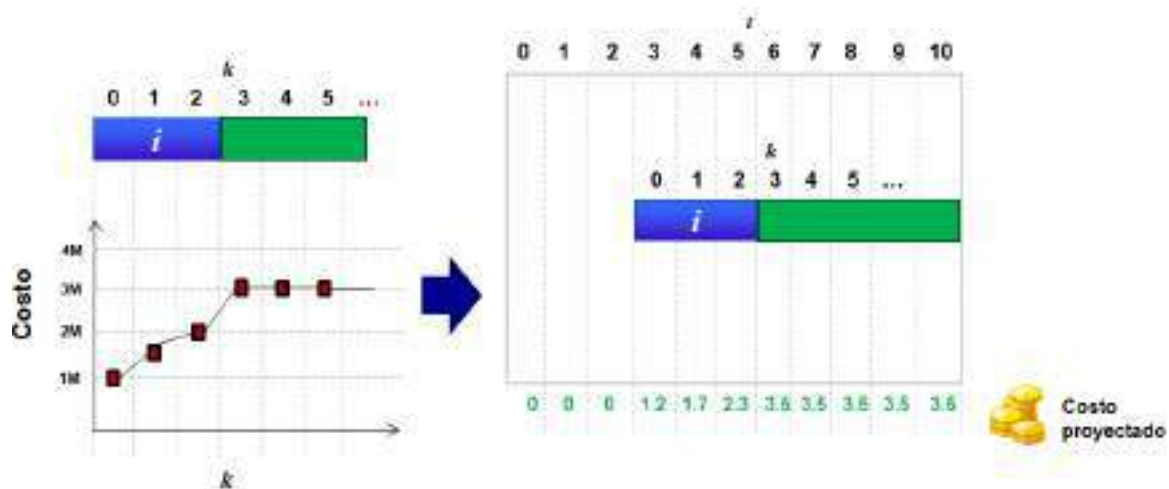
Además de los beneficios individuales de cada proyecto, también deben considerarse las posibles interacciones entre proyectos. Es posible que si dos proyectos se ejecutan al tiempo los beneficios no sean equivalentes a la suma de lo que generaría cada proyecto por separado. Por ejemplo, considere el caso ilustrado en la Figura 3.6 en donde se tienen los proyectos A y B. El proyecto A consiste en una medida de restricción vehicular mientras que el proyecto B consiste en la implementación de sistemas de control de emisiones en vehículos.

En la parte superior de la Figura 3.6 se muestran los vehículos que estarían afectados si se implementara cada medida por separado. En la parte inferior se muestra el impacto de la ejecución de los dos proyectos al mismo tiempo. Allí se consideran tanto los vehículos que tienen restricción en la circulación como los vehículos que utilizan el sistema de control. Sin embargo, la intersección muestra aquellos vehículos que además de tener restricción en la circulación, tienen el sistema de control de emisiones. Por lo tanto, si dos proyectos se realizan al tiempo, es necesario considerar la interacción de los proyectos, ya que los beneficios generados no necesariamente serán equivalentes a la sumatoria de los beneficios generados individualmente por cada proyecto. Una aproximación matemática al tratamiento de estas interdependencias puede encontrarse en Zuluaga, Sefair & Medaglia (2007).



**Figura 3.6.** Interacción entre proyectos.

8. La ejecución de los proyectos conlleva un costo económico que debe ser minimizado. Dicho costo económico representa el impacto que tiene sobre la sociedad la realización de cada proyecto. En la Figura 3.7 se muestran los costos estimados para un proyecto. Dichos costos fueron estimados teniendo como referencia el año 0 del horizonte de planeación. Dado que el proyecto fue programado para el año 3 del horizonte, los costos deben ser ajustados para tener en cuenta el crecimiento de los sectores a intervenir.



**Figura 3.7.** Costo económico proyectado.

### 3.3. Formulación Matemática del Modelo de Optimización

#### 3.3.1. Conjuntos

- $P$  : conjunto de proyectos candidatos.
- $I$  : conjunto de índices de impacto.
- $S$  : conjunto de categorías a las que puede pertenecer un proyecto. Las categorías son excluyentes, es decir, un proyecto pertenece sólo a una categoría.
- $Q_h$  : conjunto de proyectos que pertenecen a la categoría  $h \in S$ , en donde  
 $Q_h \cap Q_l = \emptyset$ ,  
 $h \in S, l \in S, h \neq l$ .

#### 3.3.2. Parámetros

- $T$  : longitud del horizonte de planeación (en años).
- $M_i$  : cantidad de modos del proyecto  $i \in P$ .
- $t_i^-$  : fecha más temprana de inicio del proyecto  $i \in P$ .
- $t_i^+$  : fecha más tardía de inicio del proyecto  $i \in P$ .
- $\alpha_i$  : tasa de crecimiento de los costos económicos del proyecto  $i \in P$ .
- $v_{im}$  : duración del proyecto  $i \in P$ , dado que se ejecuta en el modo  $m = 1, \dots, M_i$ . Puede ser interpretado como la cantidad de períodos necesarios para que el proyecto se implementa completamente.
- $\rho_{im}$  : porcentaje sobre el costo del último período que representa el costo de operación y mantenimiento hasta el final del horizonte de planeación (perpetuidad). Un valor  $\rho_{im} > 0$  implica que el proyecto  $i \in P$  en el modo  $m = 1, \dots, M_i$  genera costos económicos hasta el final del horizonte.
- $b_{imkq}$  : impacto porcentual esperado del período de ejecución  $k$  del proyecto  $i \in P$  en el modo  $m = 1, \dots, M_i$  sobre el índice de impacto  $q \in I$ . El impacto del proyecto

comprende dos etapas. Si  $b_{imkq} > 0$  la ejecución del proyecto reduce el índice de impacto  $q \in I$ . Por el contrario, si  $b_{imkq} < 0$  el proyecto aumenta el índice del impacto.

- $c_{imk}$ : costo económico asociado al período  $k$  del proyecto  $i \in P$ , dado que se ejecuta en el modo  $m = 1, \dots, M_i$ . El costo económico de cada proyecto depende de su etapa de implementación. Para los períodos de implementación ( $k \leq v_{im}$ ) el costo corresponde a  $c_{imk}$ . Para los períodos de funcionamiento ( $k > v_{im}$ ) los costos están dados por  $\rho_{im} c_{imv_{im}}$ . Es necesario precisar que dichos costos se encuentran calculados teniendo como año base el inicio del horizonte de planeación.
- $\lambda_q$ : tasa de crecimiento anual del nivel del indicador de impacto  $q \in I$  dado el crecimiento económico. Es decir, con esta tasa se modela el crecimiento tendencial de las emisiones de los contaminantes.
- $g_q$ : meta sobre el nivel del indicador de impacto  $q \in I$  que se pretende alcanzar al final del horizonte de planeación (final del año  $T$ ).
- $r_{tq}^0$ : pronóstico (línea base) del nivel del indicador de impacto  $q \in I$  para el año  $t = 1, \dots, T$ .
- $l_h$ : cantidad mínima de proyectos de la categoría  $h \in S$  que deben realizarse durante el horizonte de planeación.
- $u_h$ : cantidad máxima de proyectos de la categoría  $h \in S$  que deben realizarse durante el horizonte de planeación.
- $k_t^l$ : cantidad mínima de proyectos que se pueden realizar en el año  $t = 1, \dots, T$ .
- $k_t^u$ : cantidad máxima de proyectos que se pueden realizar en el año  $t = 1, \dots, T$ .
- $e_{i,j,m(i),m(j),q}$ : efecto de interacción (porcentual) sobre el contaminante  $q \in I$  dado que los proyectos  $i \in P$  y  $j \in P$  operan simultáneamente en el mismo año y se ejecutan en los modos  $m(i)$  y  $m(j)$  respectivamente. El efecto se contabiliza como una reducción de los efectos de los dos proyectos que se encuentran operando.

#### Variables de decisión:

- $y_{itm}$ : variable binaria que toma el valor de 1 si el proyecto  $i \in P$  se ejecuta en el año  $t = 1, \dots, T$  en el modo  $m = 1, \dots, M_i$ . Toma el valor de cero en caso contrario.
- $x_{iktm}$ : variable binaria que toma el valor de 1 si el período  $k$  del proyecto  $i \in P$  se asigna al año  $t = 1, \dots, T$  en el modo  $m = 1, \dots, M_i$ . Toma el valor de cero en caso contrario.
- $z_{i,j,m(i),m(j),t}$ : variable binaria que toma el valor de 1 si algún período del proyecto  $i \in P$  se ejecuta en el mismo año  $t = 1, \dots, T$  que algún período del proyecto  $j \in P$  y los proyectos  $i \in P$  y  $j \in P$  se ejecutan en los modos  $m(i)$  y  $m(j)$  respectivamente. Toma el valor de cero en caso contrario.
- $r_{tq}$ : nivel del índice de impacto  $q \in I$  al final del período  $t = 1, \dots, T$ .

### Restricciones:

- Activación de los períodos de operación: el conjunto de restricciones (1) permite activar todos los periodos de operación de un proyecto dependiendo de su año de inicio. Si un proyecto inicia en el año  $t$  es necesario considerar que estará activo hasta el final del horizonte de planeación para poder contabilizar sus costos y beneficios.

$$y_{itm} = x_{i,k,t+k,m}, \quad i \in P, t = t_i^-, \dots, t_i^+, k = 1, \dots, T - t + 1, m = 1, \dots, M_i \quad (1)$$

- Número de proyectos a iniciar cada año: el conjunto de restricciones (2) y (3) permite controlar el número máximo y mínimo de proyectos que es posible iniciar cada año. Dichas restricciones permiten modelar la capacidad de gestión de proyectos.

$$\sum_{i \in P} \sum_{m=1}^{M_i} y_{itm} \leq k_t^u, \quad t = 1, \dots, T \quad (2)$$

$$\sum_{i \in P} \sum_{m=1}^{M_i} y_{itm} \geq k_t^l, \quad t = 1, \dots, T \quad (3)$$

- Un proyecto se realiza máximo una sola vez: el conjunto de restricciones muestra que un proyecto solo puede realizarse una vez dentro del horizonte de planeación en un solo modo.

$$\sum_{t=t_i^-}^{t_i^+} \sum_{m=1}^{M_i} y_{itm} \leq 1, \quad i \in P \quad (4)$$

- Número de proyectos por categoría: el conjunto de restricciones (5) y (6) permite controlar el número máximo y mínimo de proyectos que se deben realizar por categoría. Dichas restricciones permiten inducir una selección balanceada de proyectos de cada categoría dentro del portafolio óptimo.

$$\sum_{i \in Q_h} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=1}^T y_{itm} \leq u_h, \quad h \in S \quad (5)$$

$$\sum_{i \in Q_h} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=1}^T y_{itm} \geq l_h, \quad h \in S \quad (6)$$

- Nivel de indicadores de impacto: las restricciones que permiten modelar el nivel del indicador de impacto  $q \in I$  se muestran en (7) y (8). Allí se observa que el nivel del indicador de impacto  $q \in I$  al final del año  $t$  ( $r_{tq}$ ) depende del nivel del mismo indicador al final del año  $t - 1$  ( $r_{t-1,q}$ ). Adicionalmente, el cálculo del nivel final del indicador

considera el crecimiento natural anual del indicador ( $e^{\lambda_q}$ ) y el efecto de los proyectos

realizados y sus interacciones ( $e^{-\sum_{i \in P} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{k=1}^{v_{im}} b_{imkq} x_{iktm} + \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} \sum_{m(i)=1}^{M_i} \sum_{m(j)=1}^{M_j} e_{i,j,m(i),m(j),q} z_{i,j,m(i),m(j),t}}$ ).

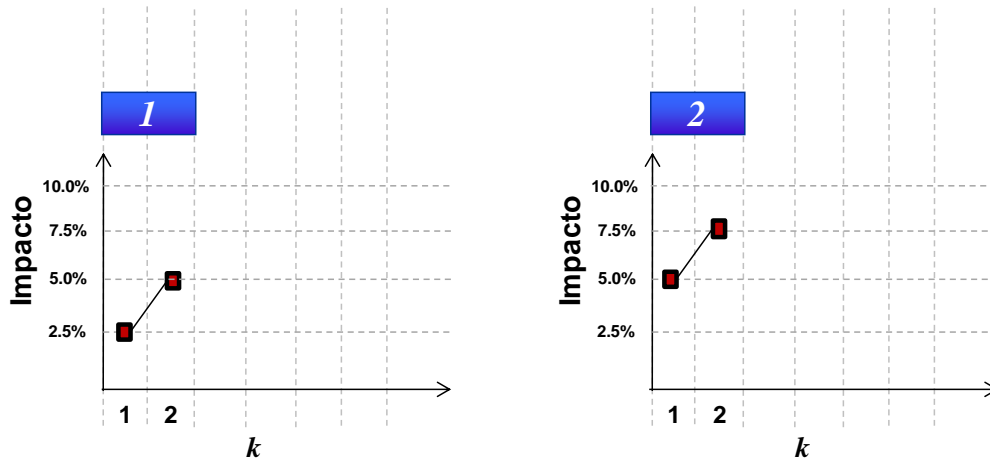
En el caso de que un indicador de impacto corresponda al nivel de un contaminante, el efecto del crecimiento natural estará directamente relacionado con el crecimiento de las fuentes emisoras. Los conjuntos de restricciones (7) y (8) difieren en que el primero modela el nivel de indicador para el año 1 solamente, mientras que el segundo lo hace

para los años siguientes hasta el final del horizonte de planeación. El nivel inicial del indicador ( $r_{1q}^0$ ) se considera en (7).

$$r_{1q} = r_{1q}^0 e^{-\sum_{i \in P} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{k=1}^{v_{im}} b_{imkq} x_{ik1m} + \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} \sum_{m(i)=1}^{M_i} \sum_{m(j)=1}^{M_j} e_{i,j,m(i),m(j),q} z_{i,j,m(i),m(j),1}}, \quad q \in I \quad (7)$$

$$r_{tq} = r_{t-1,q} e^{\lambda_q - \sum_{i \in P} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{k=1}^{v_{im}} b_{imkq} x_{iktm} + \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} \sum_{m(i)=1}^{M_i} \sum_{m(j)=1}^{M_j} e_{i,j,m(i),m(j),q} z_{i,j,m(i),m(j),t}}, \quad t = 2, \dots, T, q \in I \quad (8)$$

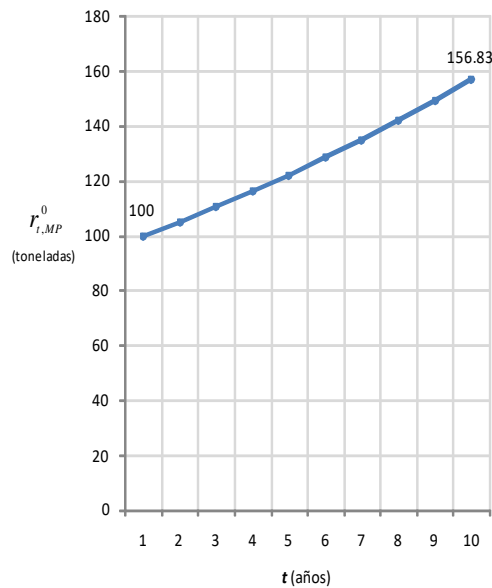
A continuación se presenta un ejemplo del funcionamiento de la restricción anterior para el caso del índice de impacto de material particulado (PM). Se supone que existen solamente los proyectos 1 y 2 cada uno con una duración de dos años ( $v_{11} = v_{21} = 2$ ) y un sólo modo de operación ( $M_1 = M_2 = 1$ ). El impacto generado por cada uno de los proyectos se muestra en la Figura 3.8. Allí se observa que el Proyecto 1 reduce el nivel de material particulado en 2.5% en su primer periodo y en 5.0% para su segundo periodo ( $b_{1,1,1,MP} = 2.5\%$ ,  $b_{1,1,2,MP} = 5.0\%$ ). Por su parte el Proyecto 2 reduce el índice de impacto en 5.0% en su primer periodo y en 7.5% en su segundo periodo ( $b_{2,1,1,MP} = 5.0\%$ ,  $b_{2,1,2,MP} = 7.5\%$ ). Adicionalmente, se asume que existe una interacción (sustitución parcial) entre los dos proyectos que indica que si operan al tiempo los beneficios conjuntos de los dos proyectos sobre indicador PM se reducen en 1% ( $e_{1,2,1,1,MP} = 1\%$ ). Se asume también una tasa de crecimiento natural del nivel del indicador PM de 3% anual ( $\lambda_{MP} = 3\%$ ).



**Figura 3.8.** Impacto esperado de dos proyectos 1 y 2.

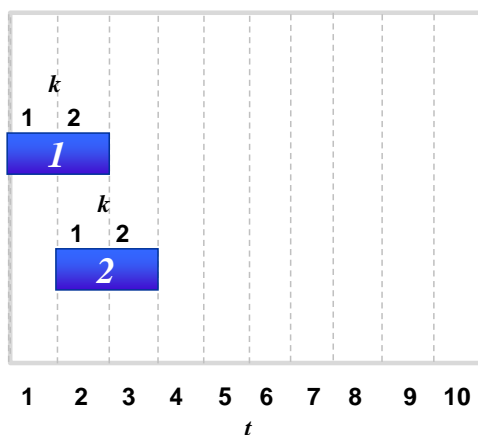
La Figura 3.9 muestra el nivel del indicador PM en toneladas dentro de un horizonte de planeación de 10 años ( $r_{t,MP}^0$ ). Esta información representa la evolución del indicador si no se realizara ningún proyecto de descontaminación (línea base). En este caso el crecimiento del nivel estaría dado por la tasa de crecimiento natural.





**Figura 3.9.** Nivel del indicador PM en el tiempo (línea base).

Para ilustrar el efecto de la realización de los proyectos, se asume que el Proyecto 1 inicia en el año 1 y que el Proyecto 2 lo hace en el año 2. De acuerdo a las restricciones mostradas en (1), esto implica que  $x_{1,1,1,1} = x_{1,2,2,1} = x_{2,1,2,1} = x_{2,2,3,1} = 1^1$ . La Figura 3.10 muestra la programación óptima de los proyectos 1 y 2 dentro del horizonte de planeación. Allí se observa que la única interacción existente se presenta en el año 2, en donde los proyectos operan simultáneamente.



**Figura 3.10.** Programación de los proyectos 1 y 2.

A continuación se calcula el impacto de la realización de los proyectos sobre el nivel del indicador PM. Dado que en el año 1 solamente se encuentra operando el Proyecto 1, se obtiene un nivel del índice de 97.53 toneladas:

$$r_{1,MP} = 100e^{-0.025}$$

$$r_{1,MP} = 97.53$$

<sup>1</sup> Note que éstas son las salidas (resultados) del modelo (e.d., selección y programación de cada uno de los proyectos en el tiempo).

Para los siguientes años se obtiene que:

$$r_{2,MP} = 97.53e^{0.03-0.05-0.05+0.01} = 91.85$$

$$r_{3,MP} = 91.85e^{0.03-0.075} = 87.81$$

$$r_{4,MP} = 87.81e^{0.03} = 90.48$$

$$r_{5,MP} = 90.48e^{0.03} = 93.24$$

$$r_{6,MP} = 93.24e^{0.03} = 96.08$$

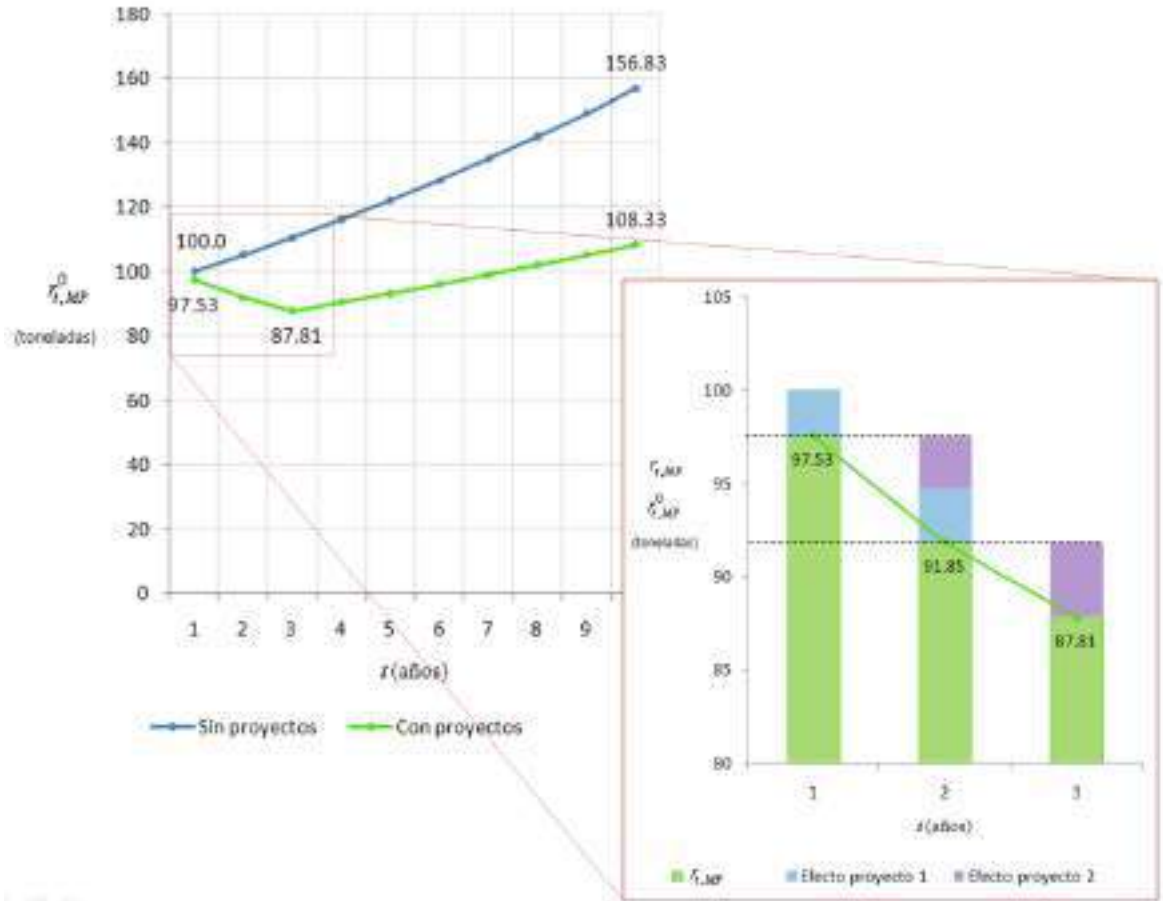
$$r_{7,MP} = 96.08e^{0.03} = 99.00$$

$$r_{8,MP} = 99.00e^{0.03} = 102.02$$

$$r_{9,MP} = 102.02e^{0.03} = 105.13$$

$$r_{10,MP} = 105.13e^{0.03} = 108.33$$

Debe notarse que para el año 2 se encuentran operando los proyectos 1 y 2 de manera simultánea. Por esta razón, se consideran no solamente los beneficios individuales de cada proyecto sobre el nivel del indicador, sino también su interacción. Para el año 3 se observa que el proyecto 2 es el único que opera. Dado que no hay proyectos operando a partir del año 3, se observa un crecimiento del nivel del indicador PM afectado solamente por su crecimiento natural. La Figura 3.11 muestra el efecto de la realización de los proyectos sobre el nivel del indicador PM. Allí se muestra la contribución de cada proyecto en la reducción del nivel del contaminante. Para el final del horizonte de planeación se llega a un nivel de 108.33 toneladas dado el efecto de los proyectos. De no hacer ningún proyecto, el nivel del indicador estaría situado en 156.83 toneladas.



**Figura 3.11.** Efecto de los proyectos sobre el nivel del indicador PM.

Desde el punto de vista matemático, las restricciones (7) y (8) son de naturaleza no lineal. Con el fin de utilizarlas dentro del contexto de programación lineal (entera) mixta, dichas restricciones se transformaron logarítmicamente. A partir de las restricciones originales en (7) se tiene que:

$$\ln(r_{1q}) = \ln \left( r_{1q}^0 e^{-\sum_{i \in P} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{k=1}^{v_{im}} b_{imkq} x_{ik1m} + \sum_{i \in P} \sum_{j \in P(m(i)=1)} \sum_{m(j)=1}^{M_j} e_{i,j,m(i),m(j),q} z_{i,j,m(i),m(j),1}} \right), \quad q \in I$$

$$\ln(r_{1q}) = \ln(r_{1q}^0) - \sum_{i \in P} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{k=1}^{v_{im}} b_{imkq} x_{ik1m} + \sum_{i \in P} \sum_{j \in P(m(i)=1)} \sum_{m(j)=1}^{M_j} e_{i,j,m(i),m(j),q} z_{i,j,m(i),m(j),1}, \quad q \in I$$

$$\hat{r}_{1q} = \hat{r}_{1q}^0 - \sum_{i \in P} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{k=1}^{v_{im}} b_{imkq} x_{ik1m} + \sum_{i \in P} \sum_{j \in P(m(i)=1)} \sum_{m(j)=1}^{M_j} e_{i,j,m(i),m(j),q} z_{i,j,m(i),m(j),1}, \quad q \in I \quad (9)$$

De las restricciones mostradas en (8) se tiene que:

$$\ln(r_{tq}) = \ln \left( r_{t-1q} e^{\lambda_q - \sum_{i \in P} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{k=1}^{v_{im}} b_{imkq} x_{ikt m} + \sum_{i \in P} \sum_{j \in P(m(i)=1)} \sum_{m(j)=1}^{M_j} e_{i,j,m(i),m(j),q} z_{i,j,m(i),m(j),t}} \right), \quad t = 2, \dots, T, q \in I$$

$$\ln(r_{tq}) = \ln(r_{t-1q}) + \lambda_q - \sum_{i \in P} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{k=1}^{v_{im}} b_{imkq} x_{ikt m} + \sum_{i \in P} \sum_{j \in P(m(i)=1)} \sum_{m(j)=1}^{M_j} e_{i,j,m(i),m(j),q} z_{i,j,m(i),m(j),t}, \quad t = 2, \dots, T, q \in I$$

$$\hat{r}_{tq} = \hat{r}_{t-1q} + \lambda_q - \sum_{i \in P} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{k=1}^{v_{im}} b_{imkq} x_{iktm} + \sum_{i \in P} \sum_{j \in P, m(i)=1}^{M_i} \sum_{m(j)=1}^{M_j} e_{i,j,m(i),m(j),q} z_{i,j,m(i),m(j),t}, \quad t = 2, \dots, T, q \in I \quad (10)$$

Las restricciones (9) y (10) permiten modelar el nivel del indicador de impacto  $q \in I$  de forma lineal, en donde  $\hat{r}_{tq} = \ln(r_{tq})$  ( $t = 1, \dots, T, q \in I$ ) y  $\hat{r}_{1q}^0 = \ln(r_{1q}^0)$ .

- Metas sobre el nivel de indicadores de impacto: estas restricciones permiten incluir metas de política sobre el nivel deseado de los indicadores de impacto al final del horizonte de planeación. Las restricciones (11) permiten asegurar el cumplimiento de las metas para cada indicador ( $g_q$ ), en donde  $\hat{g}_q = \ln(g_q)$ .

$$\hat{r}_{Tq} \leq \hat{g}_q, \quad q \in I \quad (11)$$

- Activación de interacciones entre los proyectos: estas restricciones permiten identificar los años en los que las interacciones entre proyectos se encuentran activadas. Las restricciones (12) y (13) muestran la relación existente entre las variables que indican la activación de un periodo para cada proyecto (variables  $x$ ), con las variables que indican si dos proyectos se encuentran operando al mismo tiempo (variables  $z$ ).

$$\sum_{k=1}^{v_{i,m(i)}} x_{i,k,t,m(i)} + \sum_{k=1}^{v_{j,m(j)}} x_{j,k,t,m(j)} \leq z_{i,j,m(i),m(j),t} + 1, \quad i \in P, j \in P, m(i) = 1, \dots, M_i, m(j) = 1, \dots, M_j, t = 1, \dots, T \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^{v_{i,m(i)}} x_{i,k,t,m(i)} + \sum_{k=1}^{v_{j,m(j)}} x_{j,k,t,m(j)} \geq 2z_{i,j,m(i),m(j),t}, \quad i \in P, j \in P, m(i) = 1, \dots, M_i, m(j) = 1, \dots, M_j, t = 1, \dots, T \quad (13)$$

#### Restricciones de tipo de variable:

$$\begin{aligned} y_{itm} &\in \{0,1\}, \quad i \in P, t = 1, \dots, T, m = 1, \dots, M_i \\ x_{iktm} &\in \{0,1\}, \quad i \in P, t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, T - t + 1, m = 1, \dots, M_i \\ z_{i,j,m(i),m(j),t} &\in \{0,1\}, \quad i \in P, j \in P, t = 1, \dots, T, m(i) = 1, \dots, M_i, m(j) = 1, \dots, M_j \\ \hat{r}_{tq} &\geq 0, \quad q \in I, t = 1, \dots, T \end{aligned}$$

#### Función objetivo:

El objetivo del modelo es minimizar el costo económico total de la realización de los proyectos. Este objetivo se muestra en (14), en donde el costo económico  $\bar{c}_{imk}$  está definido como:

$$\bar{c}_{imk} = \begin{cases} c_{imk} e^{\alpha_i(t-k)} & k \leq v_{im} \\ \rho_{im} c_{imv_{im}} e^{\alpha_i(t-k)} & k > v_{im} \end{cases}$$

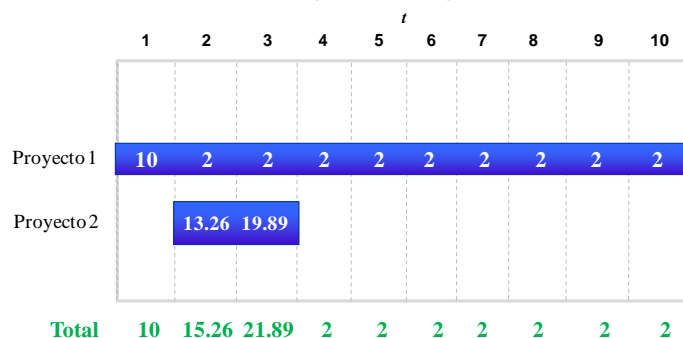
$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i \in P} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{k=0}^T \bar{c}_{imk} X_{iktm} \quad (14)$$

Si un proyecto se realiza en un año posterior, es necesario ajustar los costos para incorporar el efecto del crecimiento del sector, ya que los costos económicos generados por la realización de un proyecto no son los mismos hoy que en el futuro. Para ilustrar el funcionamiento de la función objetivo, considere la programación de los proyectos 1 y 2 tal como se mostró en la Figura 3.11. Considere que el Proyecto 1 tiene costos económicos asociados de  $c_{1,11} = 10$  y  $c_{1,12} = 2$ . Este último costo se asume como un costo económico hasta el final del horizonte de planeación, derivado de la operación del proyecto. En otras palabras, se asume que  $\rho_{1,1} = 100\%$ . Para el Proyecto 2 se tienen los costos  $c_{2,11} = 12$  y  $c_{2,12} = 18$ . También se asume que la tasa apropiada para llevar el costo económico hacia el futuro es igual a  $\alpha_1 = \alpha_2 = 10\%$ . La Tabla 3.2 muestra los costos económicos asociados a la programación de los proyectos de la Figura 3.11 para cada uno de los años del horizonte de planeación.

**Tabla 3.2.** Costo económico asociado a la programación de proyectos.

Año	Costo
1	$10e^{0.1(1-1)} = 10$
2	$2e^{0.1(2-2)} + 12e^{0.1(2-1)} = 2 + 13.26 = 15.26$
3	$2e^{0.1(3-3)} + 18e^{0.1(3-2)} = 2 + 19.89 = 21.89$
>4	$2e^{0.1(3-3)} = 2$
Total	63.15

La Figura 3.12 resume la programación de los proyectos y el costo económico total generado por la realización de los proyectos. Allí debe notarse que el Proyecto 1 genera costos económicos de operación que van hasta el final del horizonte de planeación.



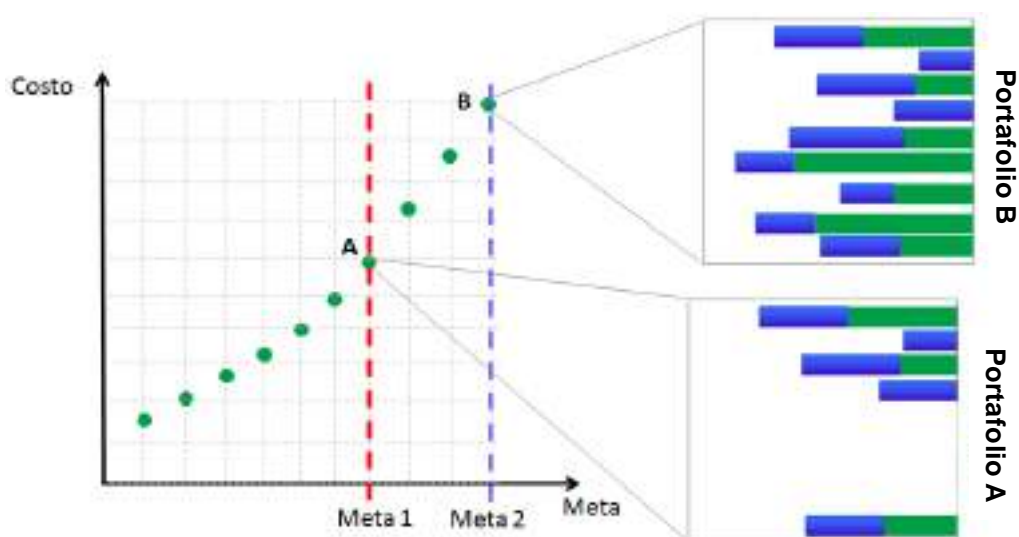
**Figura 3.12.** Programación de proyectos y costo económico total.

### 3.4. Solución del Problema

Para ilustrar el funcionamiento del modelo matemático, considere la Figura 3.13. Allí se presentan los resultados que podrían obtenerse al resolver múltiples modelos matemáticos para diferentes niveles de exigencia de la meta ambiental. En el caso ilustrado se pretende cumplir la meta generando el menor costo posible para la sociedad.

Por ejemplo, si se impone que el portafolio de proyectos debe generar como mínimo el nivel de reducción de contaminantes dado por la Meta 1 (representada por la línea en color rojo), entonces el mejor portafolio es el Portafolio A. Dicho portafolio implica la realización de 5 proyectos. Si se impone una meta más exigente como la considerada por la Meta 2 (en azul), entonces el portafolio que minimiza el costo sería el B, en el cual se realizan 9 proyectos.

De esta forma la frontera mostrada en la Figura 3.13 contiene todos los portafolios en donde se cumplen diferentes niveles de exigencia de la meta ambiental al mínimo costo. Debe tenerse en cuenta que cada uno de los portafolios de proyectos presente en la frontera, debe cumplir las condiciones 1 a 8 presentadas en el sub-capítulo 3.2 de este informe. A través de este análisis es posible generar esta frontera de Pareto y presentar al decisor múltiples alternativas que ilustran el compromiso entre costo y beneficios ambientales. Aplicaciones de la construcción de esta frontera de Pareto pueden encontrarse en Medaglia et. al., (2008) y Sefair & Medaglia (2005).



**Figura 3.13.** Análisis de resultados.

#### 4. Banco de Proyectos del plan decenal de descontaminación

A continuación se presentan los proyectos incluidos en el proceso de optimización y una breve descripción de los diferentes modos en que éstos pueden ser implementados (ver tablas 3.3 a 3.7), la descripción detallada de los proyectos y los modos se presentan en las secciones 1 y 2 (medidas para fuentes vehiculares e industriales) del Documento de Trabajo.

**Tabla 3.3.** Sector transporte: motocicletas.

Proyecto	Modo	Descripción
SCE - OC	1	Instalación de catalizador oxidativo a todas las motocicletas que cuentan con motor de cuatro tiempos que circulen en la ciudad y obligación en el uso de estos dispositivos a las motocicletas nuevas.
SCE - TWC	2	Instalación de convertidor catalítico de tres vías a todas las motocicletas que tienen motor de cuatro tiempos que circulen en la ciudad y obligación en el uso de estos dispositivos a las motocicletas nuevas.
SCE - TWC + SAI	3	Instalación de convertidor catalítico y un sistema secundario de inyección de aire a todas las motocicletas que cuentan con motor de cuatro tiempos que circulen en la ciudad y obligación en el uso de estos dispositivos a las motocicletas nuevas.
SCE - OC + SAI	4	Instalación de catalizador oxidativo y sistema secundario de inyección de aire a todas las motocicletas que cuentan con motor de cuatro tiempos que circulen en la ciudad y obligación en el uso de estos dispositivos a las motocicletas nuevas.

SCE: Sistema de control de emisiones; OC: Catalizador oxidativo; TWC: Convertidor catalítico de tres vías; SAI: Sistema secundario de inyección de aire.

**Tabla 3.4.** Sector transporte: vehículos de carga pesada.

Proyecto	Modo	Descripción
SCE - DOC	1	Instalación de catalizadores oxidativos en todos los vehículos de transporte de carga que circulen en Bogotá y obligación en el uso de estos dispositivos a los vehículos nuevos.
SCE - DPF	2	Instalación de filtros de partículas en todos los vehículos de transporte de carga que circulen en Bogotá y obligación en el uso de estos dispositivos a los vehículos nuevos.
SCE - FPF	3	Instalación de filtros parciales de partículas en todos los vehículos de transporte de carga que circulen en Bogotá y obligación en el uso de estos dispositivos a los vehículos nuevos.
SCE - SCR + DOC	4	Instalación de un sistema de control de emisiones compuesto por un catalizador de reducción selectiva más catalizador oxidativo en todos los vehículos de transporte de carga que circulen en Bogotá y obligación en el uso de estos dispositivos a los vehículos nuevos.
SCE - SCR + DPF	5	Instalación de un sistema de control de emisiones compuesto por un catalizador de reducción selectiva más un filtro de partículas en todos los vehículos de transporte de carga que circulen en Bogotá y obligación en el uso de estos dispositivos a los vehículos nuevos.

SCE: Sistema de control de emisiones; DOC: Catalizador oxidativo para motores diésel; DPF: Filtros de partículas; FPF: Filtros parciales de partículas; SCR: Sistema de reducción catalítica selectiva.

**Tabla 3.5.** Sector transporte: flota de transporte público colectivo y masivo.

Proyecto	Modo	Descripción
SITP + Chatarrización	1	Chatarrización de la flota (tasa de chatarrización anual del 6.5%) sin un programa de renovación continua.
SITP + Chatarrización + Renovación	2	Renovación continua de la flota con una tasa de adquisición de vehículos nuevos del 3% anual y chatarrización de la flota con una tasa anual del 6.5%.
SCE - DOC	1	Instalación de catalizadores oxidativos en toda la flota de transporte público y exigencia de este sistema en los vehículos nuevos que ingresen al sistema.
SCE - CEC	2	Instalación de sistemas de control de emisiones en el cárter en toda la flota de transporte público y exigencia de este sistema en los vehículos nuevos que ingresen al sistema.
SCE - DPF	3	Instalación de filtros de partículas en toda la flota de transporte público y exigencia de este sistema en los vehículos nuevos que ingresen al sistema.
SCE - FP	4	Instalación de filtros de paso en toda la flota de transporte público y exigencia de este sistema en los vehículos nuevos que ingresen al sistema.
SCE - SCR	5	Instalación de sistemas de reducción catalítica selectiva en toda la flota de transporte público y exigencia de este sistema en los vehículos nuevos que ingresen al sistema.
SITP + DOC	1	Implementación del SITP más instalación de catalizadores oxidativos en toda la flota de transporte público y exigencia de este sistema en los vehículos nuevos que ingresen al sistema.
SITP + CEC	2	Implementación del SITP más instalación de sistemas de control de emisiones en el cárter en toda la flota de transporte público y exigencia de este sistema en los vehículos nuevos que ingresen al sistema.
SITP + DPF	3	Implementación del SITP más instalación de filtros de partículas en toda la flota de transporte público y exigencia de este sistema en los vehículos nuevos que ingresen al sistema.
SITP + FP	4	Implementación del SITP más instalación de filtros de filtros de paso en toda la flota de transporte público y exigencia de este sistema en los vehículos nuevos que ingresen al sistema.
SITP + SCR	5	Implementación del SITP más instalación de sistemas de reducción catalítica selectiva en toda la flota de transporte público y exigencia de este sistema en los vehículos nuevos que ingresen al sistema.

SITP: Sistema integrado de transporte público; SCE: Sistema de control de emisiones; DOC: Catalizador oxidativo para motores diésel; CEC: Control de emisiones para el cárter; DPF: Filtros de partículas; FP: Filtros de paso; SCR: Sistema de reducción catalítica selectiva.



**Tabla 3.6.** Sector transporte: vehículos privados de pasajeros.

Proyecto	Modo	Descripción
SCE - TWC	1	Renovación gradual de los convertidores catalíticos que hayan cumplido su ciclo de vida útil, iniciando con el 50% hasta renovar el 80%.
SCE - TWC	2	Renovación gradual de los convertidores catalíticos que hayan cumplido su ciclo de vida útil, iniciando con el 20% hasta renovar el 50%.
SCE - TWC	2	Renovación gradual del 20% de los convertidores catalíticos que hayan cumplido su ciclo de vida útil.
Renovación de la flota	1	Renovación gradual de los vehículos que tienen más de 20 años de uso iniciando con el 20% hasta llegar al 50%, más renovación anual del 50% de los vehículos con año modelo anterior a 1996 de manera continua hasta el año 2020.
Renovación de la flota	2	Renovación gradual de los vehículos que tienen más de 20 años de uso iniciando con el 20% hasta llegar al 50%, más renovación anual del 50% de los vehículos con año modelo anterior a 1996 de manera continua hasta el año 2017.
Renovación de la flota	3	Renovación gradual de los vehículos que tienen más de 20 años de uso iniciando con el 10% hasta llegar al 35%.
Renovación de la flota + TWC	1	Renovación gradual de los vehículos de año modelo anterior a 1996, iniciando con el 10% cada año hasta lograr el 60% al año, más reemplazo gradual de los catalizadores que hayan cumplido su vida útil, empezando con el 50% hasta llegar al 80% anual.
Renovación de la flota + TWC	2	Renovación gradual de los vehículos de año modelo anterior a 1996, iniciando con el 10% cada año hasta lograr el 50% cada año, más reemplazo gradual de los catalizadores que hayan cumplido su vida útil, empezando con el 20% hasta llegar al 50% al año.
Renovación de la flota + TWC	3	Renovación del 20% de los vehículos de año modelo anterior a 1996 más reemplazo del 20% de los catalizadores que hayan cumplido su vida útil cada año.

SCE: Sistema de control de emisiones; TWC: Convertidor catalítico de tres vías.

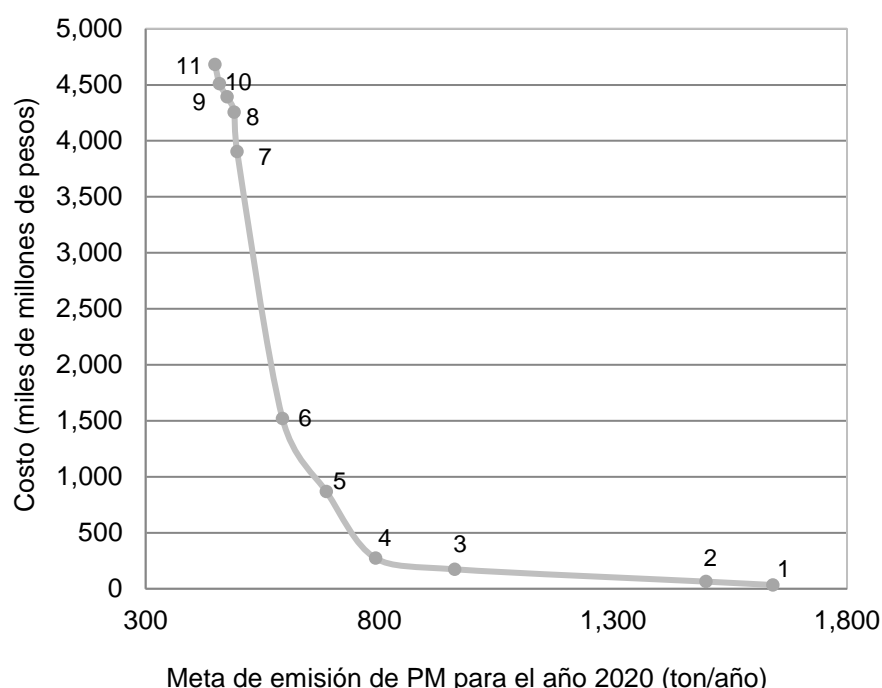
**Tabla 3.7. Sector industrial.**

Proyecto	Modo	Descripción
Gas natural	1	Reconversión a gas natural del 10% de las fuentes que actualmente no lo usan.
Gas natural	2	Reconversión a gas natural del 40% de las fuentes que actualmente no lo usan.
Gas natural	3	Reconversión a gas natural del 60% de las fuentes que actualmente no lo usan.
Gas natural	4	Reconversión a gas natural del 90% de las fuentes que actualmente no lo usan.
Gas natural	5	Reconversión a gas natural del 100% de las fuentes que actualmente no lo usan.
SCE	1	Reducir en 60% las emisiones anuales de PM <sub>10</sub> respecto a las que se emiten en el año 2010. La meta de reducción se impone de manera proporcional al aporte de cada categoría al inventario de emisiones.
SCE	2	Reducir en 60% las emisiones anuales de PM <sub>10</sub> respecto a las que se emiten en el año 2010. La meta de reducción se logra instalando SCE al mínimo número de fuentes posibles.
SCE	3	Reducir en 40% las emisiones anuales de PM <sub>10</sub> respecto a las que se emiten en el año 2010. La meta de reducción se impone de manera proporcional al aporte de cada categoría al inventario de emisiones.
SCE	4	Reducir en 40% las emisiones anuales de PM <sub>10</sub> respecto a las que se emiten en el año 2010. La meta de reducción se logra instalando SCE al mínimo número de fuentes posibles.
Gas natural + formalización	1	Considera que el 10% de las fuentes que actualmente no usan gas natural se acogerían a la medida implementando gas natural como combustible principal. Así mismo, considera que durante la campaña se formaliza el 50% del sector informal.
Gas natural + formalización	2	Considera que el 40% de las fuentes que actualmente no usan gas natural se acogerían a la medida implementando gas natural como combustible principal. Además considera que durante la campaña se formaliza el 50% del sector informal.
Gas natural + formalización	3	Considera que el 60% de las fuentes que actualmente no usan gas natural se acogerían a la medida implementando gas natural como combustible principal. Además considera que durante la campaña se formaliza el 50% del sector informal.
Gas natural + formalización	4	Considera que el 90% de las fuentes que actualmente no usan gas natural se acogerían a la medida implementando gas natural como combustible principal. Además considera que durante la campaña se formaliza el 50% del sector informal.
Gas natural + formalización	5	Considera que el 100% de las fuentes que actualmente no usan gas natural se acogerían a la medida implementando gas natural como combustible principal. Además considera que durante la campaña se formaliza el 50% del sector informal.
SCE en ladrilleras	1	Implementar sistemas de control de emisiones en el 50% de las industrias del sector ladrillero.
SCE en ladrilleras	2	Implementar sistemas de control de emisiones en el 70% de las industrias del sector ladrillero.
SCE en ladrilleras	3	Implementar sistemas de control de emisiones en el 90% de las industrias del sector ladrillero.
SCE en ladrilleras	4	Implementar sistemas de control de emisiones en el 100% de las industrias del sector ladrillero.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Potencial Máximo de Reducción de Material Particulado y Costos Asociados

Se construyeron curvas de costos asociadas a diferentes metas de reducción de material particulado. Se realizó una para el sector transporte y una para el sector industrial con el fin de comparar el potencial máximo de reducción de emisiones en cada sector y los costos asociados a los proyectos en cada caso. En las figuras 3.14 y 3.15 se presentan las curvas de reducción de material particulado para el sector transporte y para la industria, respectivamente. En éstas se presentan diferentes metas de emisión (ton PM/ año) para el año 2020 con el costo de las medidas de reducción de emisiones asociadas a lograr dicha meta y con un número que representa el portafolio óptimo de proyectos que sería necesario implementar.

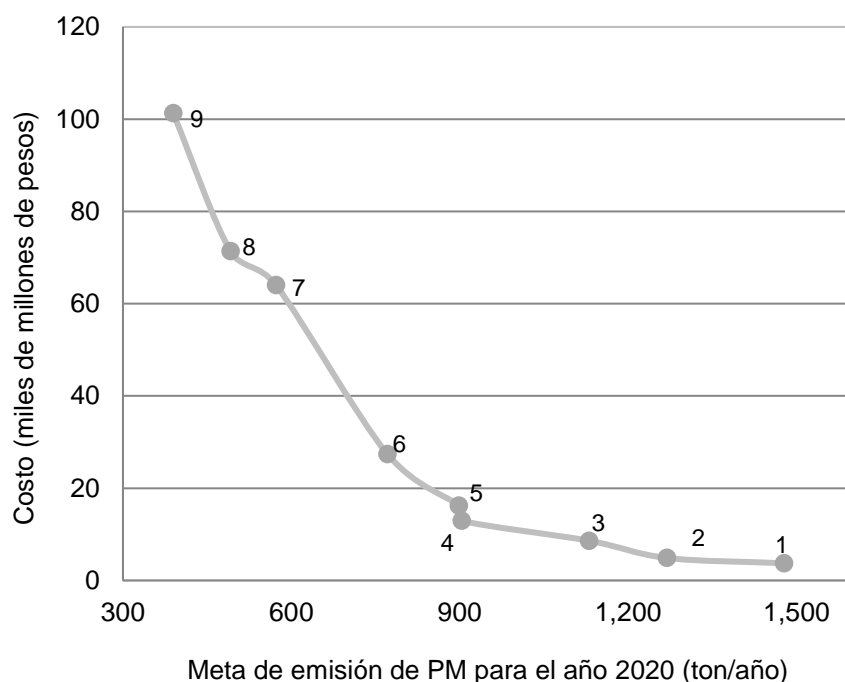


**Figura 3.14.** Curva de costos asociada a diferentes metas de emisión en el año 2020 para el sector transporte.

En cada sector, industria y transporte, la diferente configuración de proyectos y las diferentes opciones de planeación de los mismos durante el horizonte de análisis permite lograr reducciones hasta del 80% en las toneladas anuales de PM emitidas en el año 2020 respecto a las emisiones que se emitirían en cada sector en ese mismo año bajo el escenario tendencial. En las figuras 3.14 y 3.15 es posible observar cómo debido al comportamiento exponencial del costo de los proyectos, hacia el final de la curva de costos a medida que la meta en emisiones se hace más estricta los costos aumentan significativamente.

El máximo potencial de reducción de emisiones en el sector transporte con los proyectos planteados está dado por una emisión de 450 toneladas anuales de material particulado en el año 2020. Esta meta implica la ejecución de cuatro proyectos (ver Tabla 3.8) con inicio en el corto plazo (2010-2012) y con un costo aproximado de 4.7 billones de pesos. Por su parte, la meta de emisión más exigente para el sector industrial es de 400 toneladas anuales de material particulado para el año 2020. Esto exige la implementación de dos proyectos, con un costo total cercano a los 100,000 millones de pesos, uno iniciando en el

corto plazo (año 2012) y el otro con inicio hacia el final del horizonte de análisis (año 2019) (ver Tabla 3.9).



**Figura 3.15.** Curva de costos asociada a diferentes metas de emisión en el año 2020 para el sector industrial.

El efecto absoluto en la reducción de emisiones y el costo de cada medida varía en el tiempo como consecuencia del crecimiento de la economía y el consecuente cambio en el número de las fuentes sobre las cuales actúa cada medida. Por la razón expuesta anteriormente, dependiendo de la meta en reducción de emisiones el modelo de optimización puede ubicar una misma medida en distintos momentos en el horizonte de planeación para obtener diferentes beneficios netos al final del periodo de evaluación.

Como se había mencionado en la metodología, al momento de analizar los resultados es importante tener en cuenta el efecto de interacción entre proyectos, por el cual, en algunos casos el beneficio de implementar dos proyectos o más de manera simultánea no es equivalente a la suma de los efectos independientes de cada uno de los proyectos.

En las tablas 3.8 y 3.9 se presenta para cada meta de emisión el cronograma de implementación de los diferentes proyectos. Según el ejercicio de optimización, para cumplir las metas de emisión en el año 2020 en el sector transporte es necesario iniciar la implementación de la mayoría de los proyectos en el corto plazo.

Debido al crecimiento tendencial que tienen las emisiones en este sector, si las mismas medidas se inician hacia mediados o finales del horizonte de análisis ya no serán lo suficientemente efectivas para lograr los niveles de emisión requeridos o tendrán costos muy altos en comparación con los beneficios que generan. Este es un aspecto importante al momento de decidir con cuáles proyectos iniciar el desarrollo del plan de descontaminación. En cambio en las medidas del sector industrial, dependiendo de la meta de emisión fijada para el año 2020 los diferentes proyectos inician en el corto, mediano o largo plazo.

**Tabla 3.8.** Portafolio de proyectos y programación asociada a las diferentes metas de emisión de material particulado para el sector transporte.

Meta	Proyectos	Modo	Horizonte de planeación										
			2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	MOTOSCAT	1			+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	MOTOSCAT	1			+	+	+	+	+	+	+	+	+
	SCEFM	2								+	+	+	+
3	CAMIONMP	1			+	+	+	+	+	+	+	+	+
	MOTOSCAT	1			+	+	+	+	+	+	+	+	+
4	CAMIONMP	1			+	+	+	+	+	+	+	+	+
	MOTOSCAT	4			+	+	+	+	+	+	+	+	+
	SCEFM	1								+	+	+	+
5	CAMIONMP	1			+	+	+	+	+	+	+	+	+
	MOTOSCAT	1			+	+	+	+	+	+	+	+	+
	SITP	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	SCEFM	1	+	+	+	+	+						
6	CAMIONMP	1			+	+	+	+	+	+	+	+	+
	MOTOSCAT	2			+	+	+	+	+	+	+	+	+
	SITP	2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	SCEFM	4	+	+	+	+	+						
7	CAMIONMP	2			+	+	+	+	+	+	+	+	+
	MOTOSCAT	2			+	+	+	+	+	+	+	+	+
	SITP	2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	SCEFM	4	+	+	+	+	+						
8	CAMIONMP	2			+	+	+	+	+	+	+	+	+
	MOTOSCAT	4			+	+	+	+	+	+	+	+	+
	SITP	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	SCEFM	3	+	+	+	+	+						
9	CAMIONMP	2			+	+	+	+	+	+	+	+	+
	MOTOSCAT	4			+	+	+	+	+	+	+	+	+
	SITP	2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	SCEFM	3								+	+	+	+
10	CAMIONMP	2			+	+	+	+	+	+	+	+	+
	MOTOSCAT	4			+	+	+	+	+	+	+	+	+
	SITP	2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	SCEFM	3	+	+	+	+							
11	CAMIONMP	2			+	+	+	+	+	+	+	+	+
	MOTOSCAT	2			+	+	+	+	+	+	+	+	+
	SITP	2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	SCEFM	3	+	+	+	+							

CAMIONMP: Sistemas de control de emisiones en camiones; MOTOSCAT: Sistemas de control de emisiones en motocicletas; SITP: Sistema integrado de transporte público; SCEFM: Sistemas de control de emisiones en la flota de transporte público colectivo y masivo.

**Tabla 3.9.** Portafolio de proyectos y programación asociada a las diferentes metas de emisión de material particulado para el sector industrial.

Meta	Proyectos	Modo	Horizonte de planeación										
			2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	GNLEGAL	1											+
2	SCE	4											+
3	GNLEGAL	1											+
	SCE	4											+
4	GNLEGAL	1											+
	SCE	4			+	+	+	+	+	+	+	+	+
5	GNLEGAL	1										+	+
	SCE	4			+	+	+	+	+	+	+	+	+
6	GNLEGAL	2										+	+
	SCE	4			+	+	+	+	+	+	+	+	+
7	GNLEGAL	3									+	+	+
	SCE	2			+	+	+	+	+	+	+	+	+
8	GNLEGAL	4			+	+	+	+	+				
	SCE	4			+	+	+	+	+	+	+	+	+
9	GNLEGAL	5										+	+
	SCE	2			+	+	+	+	+				

SCE: Sistemas de control de emisiones; GNLEGAL: Conversión hacia gas natural más formalización de industrias.

En las tablas 3.10 y 3.11 se presenta la reducción que se obtendría para cada meta en las emisiones acumuladas entre los años 2010 y 2020 respecto a las emisiones acumuladas que se tendrían en el escenario tendencial en este mismo periodo. Las diferentes metas de emisión de PM fijadas para el sector transporte para el año 2020, permiten reducciones acumuladas entre los años 2010 y 2020 entre el 25% y el 65% respecto a las emisiones que se tendrían para este mismo periodo en el escenario tendencial de fuentes móviles. Por su parte, las metas del sector industrial tienen asociados porcentajes de reducción de emisiones acumuladas desde un 1% hasta de un 40%.

**Tabla 3.10.** Beneficios acumulados en reducción de emisiones de PM para el periodo 2010-2020 para en el sector transporte asociado a los diferentes portafolios de proyectos.

Meta	PM reducido 2010-2020
1	25%
2	25%
3	45%
4	50%
5	55%
6	55%
7	60%
8	60%
9	55%
10	65%
11	65%

**Tabla 3.11.** Beneficios acumulados en reducción de emisiones de PM para el periodo 2010-2020 para en el sector industrial asociado a los diferentes portafolios de proyectos.

Meta	PM reducido 2010-2020
1	1%
2	5%
3	5%
4	30%
5	35%
6	35%
7	45%
8	55%
9	40%

Desde el punto de vista de exposición de la población, la manera como se logra la meta de emisiones en el año 2020 es un factor importante. En términos de los beneficios sobre la salud de la población sí hay una diferencia dependiendo del momento en el tiempo en el que se empiezan a lograr las mejoras en la calidad del aire. No solo es importante iniciar la implementación de las medidas en el corto y mediano plazo para poder frenar el crecimiento tendencial de las emisiones y por lo tanto poder cumplir la meta de calidad del aire fijada para el año 2020, sino porque se obtienen mayores beneficios en términos de salud en la medida en que se anticipen las mejoras en la calidad del aire.

## 5.2. Metas de Reducción de Emisiones del Plan y Portafolio Óptimo de Proyectos

La principal meta del plan decenal de descontaminación es lograr cumplir al final del periodo de análisis (año 2020) la norma nacional de calidad del aire para material particulado. Según la estimación realizada mediante el modelo matemático utilizado para convertir los cambios en el inventario de emisiones en cambios en las concentraciones atmosféricas (ver Anexo 3.1), para cumplir esta meta de concentración es necesario lograr una reducción del 80% de las emisiones del año 2020 del escenario tendencial. Esta meta equivale a tener en el año 2020 aproximadamente el 35% de las emisiones que tenemos hoy en día en la ciudad.

Además de la meta en reducción de emisiones de PM, para los otros contaminantes (NO<sub>x</sub>, CO y COT) la meta de emisión en el año 2020 consiste en mantener los niveles actuales de emisión.

En la Tabla 3.12 se presenta la meta de emisiones de PM para el año 2020 propuesta para el plan de descontaminación, con el beneficio esperado en términos de calidad del aire y el costo asociado a los proyectos que permitirían lograr dicha meta en emisiones.

**Tabla 3.12.** Meta en emisiones de PM del plan de descontaminación.

Emisión de PM año 2020 (Ton/año)	Concentración PM (µg/m <sup>3</sup> ) <sup>1</sup>	Costo (miles de millones de pesos)
940	50	1,700

<sup>1</sup> Este valor representa la concentración de PM que se tendría en el año 2020.

La meta de reducción de emisiones de PM planteada para el plan de descontaminación es cercana al potencial máximo de reducción que se tiene tanto para fuentes fijas como para fuentes móviles. Esto se ve reflejado en el número de proyectos que sería necesario implementar y en su costo.

El costo total del plan de descontaminación se estima en 1.7 billones de pesos e incluye la implementación de seis proyectos. En el sector industrial se requiere el uso de sistemas de control de emisiones, la sustitución de combustibles hacia el uso de gas natural y la formalización de una fracción de las industrias del sector informal. Por su parte, entre las medidas para el sector transporte se incluye el uso de sistemas de control de emisiones en transporte público, en transporte de carga y en motocicletas, sumado a la implementación del SITP con mejoras en su desempeño ambiental.

Según la programación óptima de los proyectos que conforman el plan, la medida de uso de sistemas de control de emisiones en la flota de transporte público y las medidas relacionadas con mejoras ambientales al SITP deberían ser implementadas en el corto plazo. En el mediano plazo (2012-2013) se debería iniciar la implementación de uso de sistemas de control de emisiones en la flota de transporte de carga y motocicletas, y en el sector industria la sustitución de combustibles mediante gas natural. Finalmente, hacia el final del periodo de planeación se debería iniciar la implementación del uso sistemas de control de emisiones en la industria.

**Tabla 3.13.** Portafolio óptimo de proyectos del PDDB y cronograma de implementación.

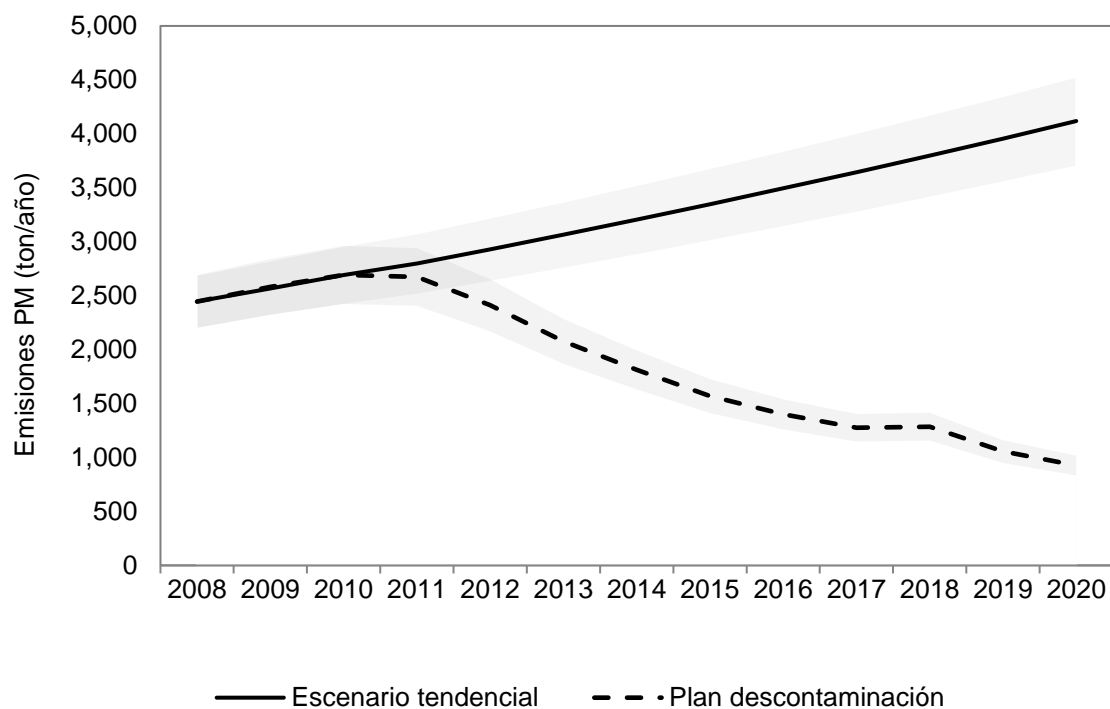
Proyectos	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
SCE										+	+
GNLEGAL				+	+	+	+	+			
CAMIONMP			+	+	+	+	+	+	+	+	+
MOTOSCAT			+	+	+	+	+	+	+	+	+
SITP		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
SCEFM		+	+	+	+	+					

CAMIONMP: Sistemas de control de emisiones en camiones; MOTOSCAT: Sistemas de control de emisiones en motocicletas; SITP: Sistema integrado de transporte público; SCEFM: Sistemas de control de emisiones en la flota de transporte público colectivo y masivo; SCE: Sistemas de control de emisiones en industrias; GNLEGAL; Conversión hacia gas natural y formalización de industrias.

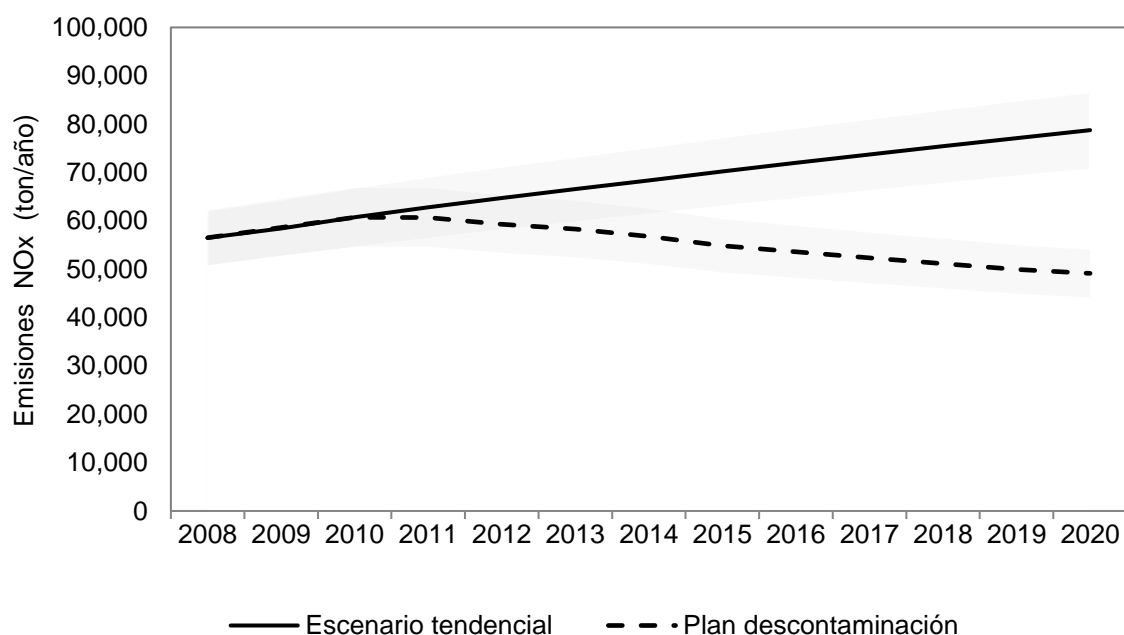
En las figuras 3.16 a 3.19<sup>2</sup> se presentan las emisiones de PM, NO<sub>x</sub>, CO y COT para el periodo comprendido entre los años 2010 y 2020 en el escenario tendencial y en el escenario con aplicación del plan de descontaminación.

<sup>2</sup> En estas figuras la sombra gris alrededor de las líneas del escenario tendencial y del escenario con plan, representa de manera esquemática la incertidumbre asociada a la estimación de dichos valores.

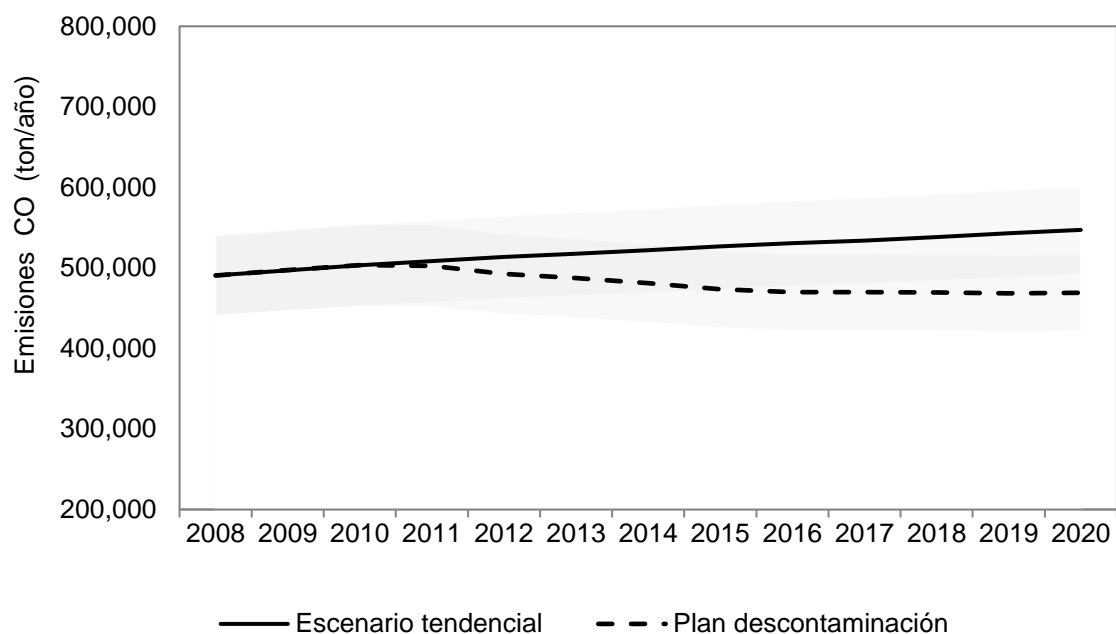




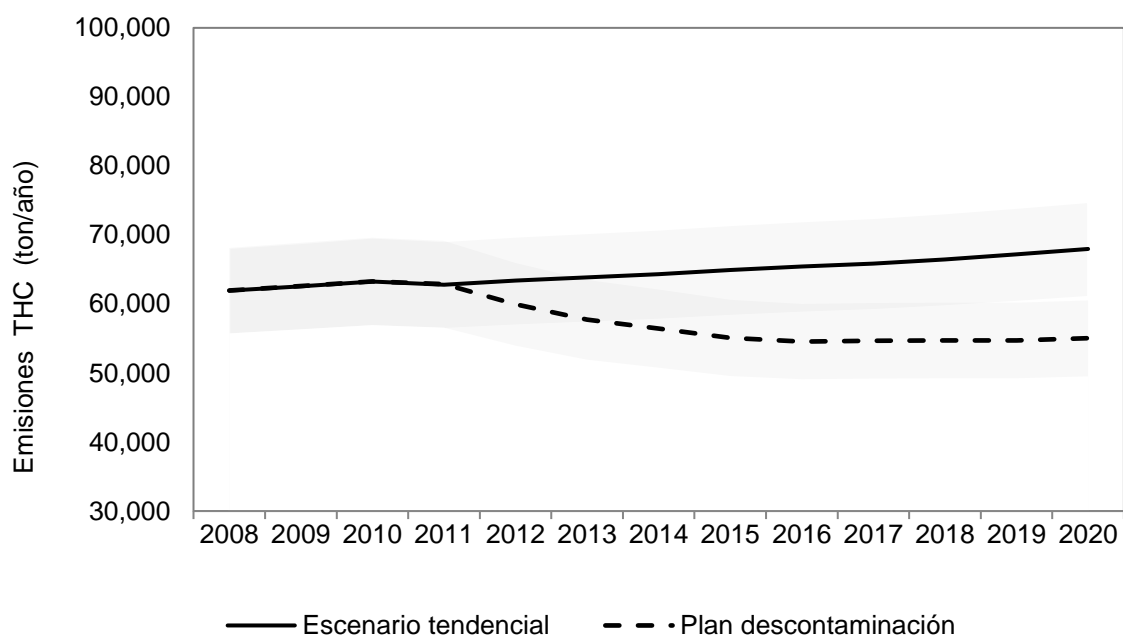
**Figura 3.16.** Emisión de material particulado entre los años 2010 y 2020 en el escenario tendencial en comparación con las emisiones con la aplicación del plan de descontaminación.



**Figura 3.17.** Emisión de óxidos de nitrógeno entre los años 2010 y 2020 en el escenario tendencial en comparación con las emisiones con la aplicación del plan de descontaminación.



**Figura 3.18.** Emisión de monóxido de carbono entre los años 2010 y 2020 en el escenario tendencial en comparación con las emisiones con la aplicación del plan de descontaminación.



**Figura 3.19.** Emisión de compuestos orgánicos totales entre los años 2010 y 2020 en el escenario tendencial en comparación con las emisiones con la aplicación del plan de descontaminación.

En la Tabla 3.14 se presentan las emisiones acumuladas en el periodo comprendido entre los años 2008 y 2020 de los contaminantes en el escenario tendencial y las que se tendrían con la aplicación del plan de descontaminación.

**Tabla 3.14.** Comparación entre las emisiones acumuladas en los dos escenarios.

Escenario	Emisiones acumuladas 2008-2020 (Ton)			
	PM	NO <sub>x</sub>	CO	TOC
Línea base	43,400	883,000	6,700,000	830,000
Plan descontaminación	24,000	714,000	6,200,000	742,000

La implementación del plan de descontaminación supone reducciones en las emisiones acumuladas durante el periodo 2008-2020 de más del 40% para PM. Para el caso de los otros contaminantes se obtienen reducciones de emisiones de alrededor del 20% para NO<sub>x</sub>, y del 10% para CO y TOC.

## 6. CONCLUSIONES

- Los resultados del ejercicio de optimización sugieren que para cumplir la meta de calidad del aire en el año 2020 es necesario implementar un número importante de proyectos en el corto plazo. Si éstos se implementan muy tarde, el beneficio no será suficiente para frenar el incremento de las emisiones debido al crecimiento tendencial de los sectores industrial y transporte.
- Para cumplir la meta en calidad del aire de material particulado en el año 2020, es necesario lograr una reducción en las emisiones del 80% respecto a las emisiones que se tendrían para ese mismo año en el escenario tendencial.
- El portafolio de proyectos óptimo para lograr una concentración de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el año 2020 está compuesto por seis proyectos. Dos proyectos en el sector industrial y los restantes en el sector transporte. Este portafolio tiene un costo aproximado de 1.7 billones de pesos.

## REFERENCIAS

Medaglia, A. L. Sefair, J.A. 2009. Optimizando la planeación en el sector público. EGOB Revista de Asuntos Públicos. Escuela de Gobierno Alberto Lleras Camargo, Universidad de los Andes. En revisión.

Medaglia A. L., Hueth D., Mendieta J. C., Sefair J. A. Multiobjective model for the selection and timing of public enterprise projects. Socio-Economic Planning Sciences. 42(1):31-45. 2008. url: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seps.2006.06.009>. ISSN: 0038-0121

Sefair J. A., Medaglia A. L. 2009. Project selection and timing under finite capacity resource constraints. En revisión. 2009. url: <http://hdl.handle.net/1992/1071>

Sefair J. A., Medaglia A. L. Towards a model for selection and scheduling of risky projects. Ellen J. Bass, (editor). In Proceedings of the 2005 Systems and Information Engineering Design Symposium, University of Virginia. 2005. url: [www.sys.virginia.edu/sieds05/proceedings/A602.pdf](http://www.sys.virginia.edu/sieds05/proceedings/A602.pdf). ISBN: 0-9744559-4-6

Zuluaga A., Sefair J. A., Medaglia A. L. Model for the selection and scheduling of interdependent projects. Michael DeVore, (editor). In Proceedings of the 2007 Systems and Information Engineering Design Symposium, University of Virginia. 2007. <http://dx.doi.org/10.1109/SIEDS.2007.4374020>. ISBN: 9781424412853.

**PLAN DECENAL DE DESCONTAMINACIÓN DE BOGOTÁ**

**PARTE B - DOCUMENTO DE TRABAJO**

**SECCIÓN 4 – ESTIMACIÓN DE LOS BENEFICIOS EN LA SALUD Y LOS COSTOS  
ASOCIADOS AL PLAN DE REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN BOGOTÁ**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. ASPECTOS GENERALES .....</b>	<b>1</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES .....</b>	<b>2</b>
<b>3. MARCO CONCEPTUAL.....</b>	<b>4</b>
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>5</b>
4.1. Área de Estudio y Horizonte Temporal del Análisis.....	5
4.2. Indicador de Calidad del Aire Utilizado en la Valoración .....	5
4.3. Estimación del Número de Casos de Morbilidad y Mortalidad Evitados con la Implementación del Plan de Descontaminación .....	6
4.3.1. Selección de Efectos .....	7
4.3.2. Funciones Concentración Respuesta. ....	8
4.3.3. Línea Base de los Efectos Evaluados.....	9
4.3.4. Determinación del Cambio en el Nivel de Exposición a la Contaminación Atmosférica .	10
4.4. Estimación de Costos .....	11
4.4.1. Morbilidad.....	11
4.4.2. Mortalidad.....	13
4.4.3. Transferencia de beneficios.....	13
4.5. Incertidumbre .....	14
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>19</b>
5.1. Estimación de Beneficios en Salud .....	19
5.1.1. Selección de Efectos .....	19
5.1.2. Valores de Riesgo Relativo Utilizados en la Estimación de los Efectos en la Salud Derivados de la Contaminación del Aire .....	21
5.1.3. Línea Base de los Efectos Evaluados.....	21
5.1.4. Cambio en el Nivel de Exposición de la Población a Material Particulado .....	22
5.2. Número de casos potencialmente evitados.....	22
<b>6. ESTIMACIÓN DE COSTOS.....</b>	<b>24</b>
<b>7. VALORACIÓN USANDO TASA DE DESCUENTO .....</b>	<b>28</b>
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>29</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>30</b>

- ANEXO 4.1. Estado del arte en la evaluación de beneficios en salud asociados a la reducción de la contaminación atmosférica, estudios desarrollados para Colombia.
- ANEXO 4.2. Revisión del capítulo de salud de los planes de descontaminación de Santiago de Chile, Barcelona y la Zona Metropolitana del Valle de México.
- ANEXO 4.3. Efectos en la salud y riesgo relativo de la exposición a material particulado
- ANEXO 4.4. Registros de salud disponibles para Bogotá.
- ANEXO 4.5. Comparación bases de datos de morbilidad para el periodo 2004-2007.
- ANEXO 4.6. Proyección de crecimiento de la población de Bogotá.
- ANEXO 4.7. Evaluación anual del riesgo relativo.
- ANEXO 4.8. Casos potencialmente evitados – Datos anuales.
- ANEXO 4.9. Valores utilizados en la estimación de costos.

## INDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Estructura metodológica para la determinación del número de casos evitados por una reducción en la concentración de $PM_{10}$ .....	7
Figura 4.2. Escenarios de concentración evaluados. ....	22

## INDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Riesgos relativos. ....	21
Tabla 4.2. Tasas de mortalidad y morbilidad. ....	21
Tabla 4.3. Comparación en el número casos escenario tendencial y el escenario con plan.....	23
Tabla 4.4. Valores unitarios (miles de pesos de 2009) .....	24
Tabla 4.8. Valoración de los beneficios en mortalidad del PDDB .....	27
Tabla 4.9. Resumen de beneficios por la implementación del PDDB .....	27
Tabla 4.10. Análisis beneficio/costo usando diferentes tasas de descuento.....	28



## **1. ASPECTOS GENERALES**

Este documento constituye la Sección 4 (Estimación de efectos y costos asociados a la salud derivados del Plan Decenal de Descontaminación de Bogotá). Dicho estudio se desarrolló en el marco del Contrato de Ciencia y Tecnología Número 1040 de 2008; celebrado entre la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), Transmilenio S.A. (TMSA) y la Universidad de los Andes.

En esta sección se presenta la estimación de los beneficios en la salud y los costos asociados, derivados de la reducción de la contaminación atmosférica en Bogotá. Los valores obtenidos permiten evaluar la inversión para la reducción de la contaminación atmosférica desde un análisis costo-beneficio.

## 2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El deterioro de la calidad del aire es un factor determinante en la incidencia de enfermedades especialmente de tipo respiratorio y cardiovascular. Esto se ve reflejado en la aparición de una amplia gama de síntomas entre los que se incluyen efectos leves como la irritación ocular y tos, enfermedad respiratoria aguda y para el caso de la población sensible incluso puede llegar a producir ataques cardíacos y muerte prematura (Griffin, 2007; EPA, 2003).

La valoración económica de los efectos que tiene la contaminación atmosférica sobre la salud de la población es fundamental en la evaluación de la viabilidad y pertinencia de la implementación de políticas y medidas para el control de la contaminación (Künzli et al., 2008, Ibáñez et al., 2003).

Con el objeto de fortalecer el proceso de toma de decisiones en el campo del control de la contaminación atmosférica, el gobierno colombiano estableció en el documento CONPES 3334-Lineamientos para la Formulación de la política de Prevención y Control de la Calidad del Aire, que “la recolección y reporte de datos y estadísticas sobre infecciones respiratorias agudas y su análisis conjunto con los datos de calidad del aire son la base para el diseño, evaluación y ajuste de políticas, regulaciones y estrategias eficientes y equitativas para el control de la calidad del aire”. Sin embargo, actualmente las deficiencias en la calidad de la información primaria generan incertidumbre sobre los costos derivados de la contaminación que son asumidos por la sociedad. Esto limita la estimación de los beneficios reales de las medidas adoptadas en el país para la mejora de la calidad del aire.

En Colombia el porcentaje de mortalidad asociado a causas ambientales alcanza un 17% (CONPES, 2008). Para el caso de la contaminación atmosférica esto representa cerca de 6,000 muertes y el costo económico es de 1.5 billones de pesos al año (Larsen, 2004). Se estima que el 38% de estos casos se presentan en Bogotá (ibídem).

Desde mediados de los años noventa las autoridades ambientales del país y la academia han desarrollado investigaciones con el fin de valorar económicamente los efectos de la contaminación atmosférica en la salud de los colombianos. Estos estudios regularmente realizan la estimación de los efectos mediante la adopción de funciones concentración respuesta desarrolladas en otros países o mediante la construcción de éstas a partir de estudios epidemiológicos. Por otra parte, las metodologías de valoración económica de mayor utilización en dichos estudios para valorar el costo de la morbilidad incluyen: **1)** Evaluación de la disponibilidad a pagar, **2)** Estimación de los costos de enfermedad y **3)** Pérdida de productividad; y entre las metodologías comúnmente utilizadas para valorar la mortalidad, se encuentran: **1)** Enfoque en capital humano y **2)** Valor estadístico de la vida.

En el estudio desarrollado por Larsen (2004) se realizó una evaluación integral de los efectos de la contaminación atmosférica por material particulado en Colombia. No obstante este estudio se realizó de forma general para Colombia y los valores para Bogotá solo pueden aproximarse. Existen otros estudios (Lozano, 2004; Solarte, 1999) desarrollados en la ciudad para grupos específicos de población cuyo diseño se centra en el seguimiento de algunos efectos para grupos prioritarios o cohortes reducidas.

Una recopilación de los estudios técnicos realizados en Colombia para la estimación de los daños en salud por la contaminación atmosférica y su valoración económica fue realizada por Ibáñez (2003), y complementada por el estudio de IDEAM (2005). Ambas revisiones sirvieron de base para la identificación de los estudios realizados en Colombia incluidos en la revisión

bibliográfica de este trabajo. En el Anexo 4.1 se presentan los aspectos más importantes de todos los estudios nacionales evaluados.

La información recopilada permitió identificar la necesidad de desarrollar una metodología que de manera específica permitiera evaluar el impacto en la salud de la población generado por las medidas propuestas en el plan decenal de descontaminación de atmosférica de Bogotá. La valoración de estos impactos y su incorporación como elemento de soporte para justificar la inversión en las medidas del plan son el principal objetivo de este trabajo.

### 3. MARCO CONCEPTUAL

La salud es el resultado de la interrelación de los individuos con su medio, de la genética del individuo y de su comportamiento individual. Por lo tanto la salud y la enfermedad pueden ser entendidos como expresiones diferentes de la interrelación entre los individuos con el ambiente natural y social en el que viven y se desarrollan (Gómez, 2008).

Se pueden identificar tres enfoques conceptuales para evaluar el proceso salud-enfermedad. En primer lugar el enfoque de riesgo donde se puede ubicar el modelo de Lalonde, desarrollado en 1974, el cual concibe que el nivel de salud de la población está influido por cuatro grupos determinantes: **1) Factores biológicos**, **2) Estilo de vida y conductas de salud**, **3) Medio ambiente** y **4) Organización de los servicios de salud**. De estos, según el trabajo realizado por Carol Buck (1986) el ambiente es el principal determinante. Buck afirma “Si el entorno no es adecuado, tampoco lo serán la biología humana, los estilos de vida y el sistema organizativo de la atención de salud”. Según el mismo autor, el ambiente puede actuar de modo favorable o desfavorable en la salud constituyéndose en un entorno peligroso o en un entorno saludable. Este enfoque está explícito en el Plan Nacional de Salud Pública de Colombia.

Una aproximación más completa del proceso salud-enfermedad, es el modelo de determinación social de la OMS y el modelo crítico latinoamericano. En estos modelos se jerarquizan los factores que influyen en la red causal del proceso salud enfermedad considerando el ambiente en un nivel estructural, intermedio y proximal. El trabajo desarrollado por Corvalán (1997) ilustra estos enfoques. Corvalán desarrolló un modelo conceptual de fuerzas motrices (v.g., modelo de desarrollo de la sociedad, crecimiento poblacional, crecimiento económico) las cuáles generan presiones en el ambiente modificando su estado. Las modificaciones en el ambiente determinan cambios en la exposición de la población y como consecuencia generan efectos en la salud. La Secretaría Distrital de Salud, ha optado por un enfoque explicativo de determinación social para el proceso salud-enfermedad, el cual opera con una estrategia promocional de calidad de vida y salud (OPS, 2009).

Este sencillo recuento de los enfoques de abordaje del proceso salud-enfermedad, permite identificar que este es un proceso complejo, en el cual la variable ambiental es uno de los factores determinantes, siendo la contaminación atmosférica una de las variables dentro de la categoría ambiental. Por este motivo, la existencia de otros factores distintos a los ambientales en el proceso de desarrollo de enfermedades puede hacer que una mejora en la calidad del aire no se traduzca en una reducción en morbilidad y mortalidad de la población.

El uso de modelos concentración-respuesta se sustenta en la identificación del riesgo relativo específico para uno de los determinantes en la salud (en este caso la concentración de  $PM_{10}$ ). Esta metodología permite ver el efecto específico que este factor ambiental podría tener en la salud, sin que esto considere el efecto potencial que los demás factores (y su variación) podrían tener sobre la salud en el periodo de análisis. Por esta razón, los resultados en términos de reducción en mortalidad y morbilidad al final del periodo de análisis pueden diferir de las proyecciones presentadas en este estudio.

## 4. METODOLOGÍA

En el ámbito internacional los beneficios esperados en la salud de la población asociados con la reducción de la contaminación atmosférica constituye el argumento más importante para implementar planes de descontaminación (Künzli et al., 2007; Larsen, 2004; Comisión Ambiental Metropolitana, 2002; Sánchez et al., 1998).

La revisión de estudios nacionales e internacionales (ver Anexo 4.2) permitió identificar las metodologías específicas que constituyen los diferentes pasos necesarios para estimar los beneficios en salud de los planes de descontaminación. En el Manual para la Elaboración de Planes de Gestión de la Calidad del Aire (MAVDT, 2008) se presenta una metodología general para la estimación de los beneficios en salud derivados de mejoras en la calidad del aire. Según este documento la estimación de beneficios expresados como la reducción del número de casos en morbilidad y mortalidad consta de 4 etapas: 1) Determinación de la línea base de un efecto en la población; 2) Determinación del nivel de exposición de la población a un contaminante, 3) Estimación cuantitativa de los efectos en la salud de la población debidos a la exposición de un contaminante de interés y 4) la valoración económica de estos beneficios.

La metodología de valoración establecida por el MAVDT (2008) es una metodología estándar propuesta por la EPA (EPA, 2004b) y por lo tanto similar a las metodologías utilizadas en los estudios que hicieron parte de la revisión bibliográfica desarrollada para este trabajo. Esta metodología sirvió de base para el desarrollo de los resultados que serán presentados en las páginas posteriores de este documento.

La valoración de los beneficios de un plan de descontaminación implica la evaluación de los efectos en salud bajo un escenario tendencial, en el cual las concentraciones de los contaminantes siguen un crecimiento inercial, y su comparación con los efectos en el escenario con la aplicación del plan de descontaminación. La diferencia entre ambos escenarios constituye los beneficios de la implementación del plan. La valoración del impacto en salud comprende dos etapas fundamentales: **1)** Cálculo del número de casos evitados o generados (morbilidad y mortalidad) debidos a los cambios en los niveles de contaminación y **2)** Valoración de los impactos en términos económicos. En las siguientes secciones se presenta de manera detallada la metodología utilizada en este estudio para desarrollar las dos etapas mencionadas.

### 4.1. Área de Estudio y Horizonte Temporal del Análisis

En el presente estudio se pretende estimar los efectos esperados sobre la salud de la población por la implementación del plan decenal de descontaminación atmosférica de Bogotá. El análisis se centra sobre la población del área urbana de Bogotá en un horizonte temporal de diez años (2010-2020).

### 4.2. Indicador de Calidad del Aire Utilizado en la Valoración

En la atmósfera se encuentran presentes al tiempo una variedad de sustancias contaminantes que interactúan entre ellas y pueden encontrarse interrelacionadas. Existe evidencia toxicológica de la aparición de efectos específicos en la salud para los diferentes contaminantes, algunos de los cuales pueden ser similares o idénticos (Griffin, 2007).

El impacto en la salud por la exposición a la contaminación atmosférica hace referencia al efecto global de los contaminantes presentes en el aire. Sin embargo, debido a que los efectos pueden ser similares o estar influenciados por relaciones sinérgicas entre los contaminantes, una suma de la evaluación de los efectos individuales puede resultar en una sobreestimación del impacto total (Künzli et al., 2007). Por esta razón, la evaluación generalmente se realiza con base en un solo indicador de la calidad del aire, que sea representativo de la contaminación en el área de estudio y que además pueda ser relacionado con los efectos sobre la salud de la población (Comisión Ambiental Metropolitana, 2002; Sánchez et al., 1998).

Para este trabajo se seleccionó el material particulado en su fracción respirable (PM<sub>10</sub>) como el indicador de la contaminación, por las razones que se mencionan a continuación: **1)** Se ha documentado en la literatura médica la existencia de efectos negativos sobre la salud que afectan principalmente los sistemas respiratorio y cardiovascular (EPA, 2004); **2)** Se cuenta con evidencia epidemiológica suficiente que demuestra que la contaminación por material particulado afecta la salud de la población; especialmente la de los grupos sensibles, y que esta contaminación puede ser considerada un problema de salud pública (OMS, 2005); **3)** Es el principal objetivo en cuanto a reducción de las emisiones en el plan de descontaminación y **4)** Para este contaminante se cuenta con registros históricos confiables generados por la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá.

#### 4.3. Estimación del Número de Casos de Morbilidad y Mortalidad Evitados con la Implementación del Plan de Descontaminación

La estimación de beneficios en salud se desarrolló mediante el uso de funciones concentración respuesta (FCR). Una FCR representa el promedio de la respuesta humana asociada a la exposición a un contaminante. Esta función permite determinar la variación en el número de casos de un efecto dado sobre la población debido a la variación de un factor de riesgo, para este caso la contaminación atmosférica. El número de casos evitados, para cada efecto asociado, se calculó según lo establecido en la Ecuación 4.1.

$$H = FAP \cdot I_t \cdot \Delta C \cdot N \quad \text{Ecuación 4.1}$$

En donde H es el número de casos atribuibles a un cambio en la concentración del contaminante; FAP es la fracción atribuible poblacional, definida como el porcentaje de casos que pueden ser evitados en la población si se suprime el factor de riesgo (Walter, 1975 en Llorca, 2001);  $I_t$  es la línea base del efecto (número de casos por habitante al año) del efecto evaluado en la población (la línea base para los efectos evaluados);  $\Delta C$  es el cambio en la concentración del contaminante y N es el número de personas expuestas.

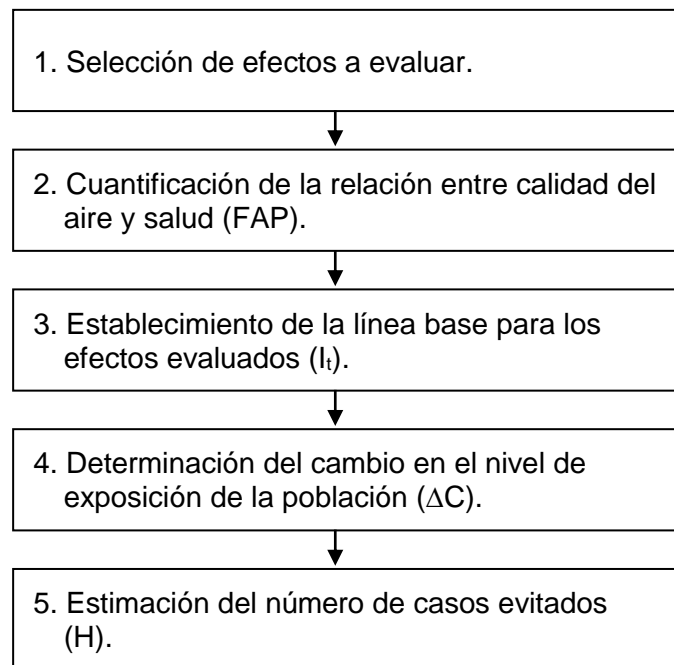
El término de las FCR que relaciona el cambio en la concentración de los contaminantes con la aparición de efectos<sup>1</sup> en la salud de la población es la FAP. Como se muestra en la Ecuación 4.2 la FAP se construye a partir del riesgo relativo (RR) y la fracción de la población expuesta a un factor de riesgo ( $p_e$ ). Debido a que toda la población de la ciudad está expuesta a la contaminación del aire,  $p_e = 1$ .

$$FAP = \frac{p_e(RR-1)}{p_e(RR-1)+1} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

---

<sup>1</sup> Efecto se entiende como la variación de un parámetro en la salud (enfermedad o muerte) asociado a un cambio en las condiciones externas.

La metodología utilizada en la estimación de los beneficios en salud, dada como número de casos de morbilidad y mortalidad evitados por la reducción de la contaminación atmosférica se presenta en la Figura 4.1. En las siguientes secciones se describe cada una de las etapas de la metodología.



**Figura 4.1.** Estructura metodológica para la determinación del número de casos evitados por una reducción en la concentración de  $PM_{10}$ .

#### 4.3.1. Selección de Efectos

Si bien existen múltiples efectos (respiratorios y cardiovasculares) relacionados con la contaminación del aire, para el análisis de este proyecto se seleccionaron los efectos más relevantes según la frecuencia con que se presentan y los costos económicos que representan. La disponibilidad de información local (línea base del efecto) también fue un factor determinante en la selección de los efectos que se incluyeron en el análisis.

Los efectos en la salud relacionados con la contaminación del aire se clasifican en dos grandes grupos: 1) Efectos en mortalidad y 2) Efectos en morbilidad. Los efectos en mortalidad hacen referencia al número de muertes asociadas a la contaminación, mientras que los efectos en morbilidad hacen referencia al número de casos de enfermedades relacionadas con la contaminación atmosférica.

Los efectos en morbilidad a su vez se subdividen en: a) Morbilidad atendida, referente al uso de asistencia médica por parte de la población y b) Morbilidad sentida, la cual se asocia a la aparición de síntomas sin que la persona afectada haga uso de asistencia médica.

En el Anexo 4.3 se presenta una revisión de los efectos en salud asociados al material particulado y la compilación de los valores de riesgo relativo de los estudios de referencia evaluados.

#### 4.3.2. *Funciones Concentración Respuesta.*

El riesgo relativo es la razón entre la incidencia de un efecto en una población expuesta a un factor de riesgo, frente a la incidencia del efecto en una población no expuesta o para el caso de la contaminación atmosférica menos expuesta. El RR se obtiene a través de estudios epidemiológicos<sup>2</sup>.

La exposición a la contaminación atmosférica, tema que ha sido estudiado ampliamente, es un factor de riesgo que genera diversos efectos en la salud (Griffin, 2007; EPA, 2003). Los RR determinados en los diferentes estudios son utilizados como elemento de soporte para el desarrollo de las normas de calidad del aire y en la evaluación del impacto de la contaminación en términos de salud pública (OMS, 2005).

Con el objetivo de identificar los RR se realizó una revisión bibliográfica de los estudios epidemiológicos que relacionan la exposición a concentraciones ambiente de PM<sub>10</sub> con la aparición de efectos en la salud. En la revisión se incluyeron documentos que hacen parte de una de estas cuatro categorías: 1) Documentos soportes de norma (OMS, 2005; EPA, 2004), 2) Planes de descontaminación de otras ciudades, 3) Compilación de estudios epidemiológicos realizados en América Latina (Organización Panamericana de la Salud, 2005) y 4) Estudios epidemiológicos disponibles en literatura indexada. En los análisis se consideraron de manera prioritaria los estudios desarrollados en América Latina de los cuales se supone que las características poblacionales presentan mayor similitud con las de Bogotá.

En los casos en que no fue posible encontrar riesgos relativos para la evaluación de algunos efectos específicos en salud se usaron las proporciones históricas locales. Estas proporciones se validaron con los registros de salud de la Secretaría Distrital de Salud de Bogotá y con expertos en este tema de la misma institución.

Debido a las diferencias en la temporalidad del análisis, se evaluaron de distinta manera los efectos asociados a material particulado por exposición aguda y los efectos relacionados con exposición crónica. De acuerdo con la definición del riesgo relativo en los efectos de exposición aguda, es de esperarse que el beneficio se presente completamente en el momento en que se logra la reducción en la concentración de PM<sub>10</sub>, de este modo se tiene un RR que cambia de manera inmediata con el cambio en los niveles del contaminante. Mientras que en el caso de los efectos asociados a exposición crónica, los RR han sido construidos a partir de estudios de cohorte prospectiva, y por lo tanto no existe una clara definición temporal del momento en que se presenta el efecto completo sobre la salud. Sin embargo, por las características de la exposición crónica se supone que los beneficios se empiezan a presentar de forma gradual a partir del momento en el que se logra la mejora sostenida en la calidad del aire.

En este trabajo para la estimación de los beneficios por reducción de la exposición crónica se realizó una aproximación metodológica basada en el trabajo desarrollado por Rööslä et. al., (2005) y Miller & Hurley (2002). Según ésta, la manifestación de los beneficios en salud asociados a una reducción sostenida en la exposición crónica de la población, se empiezan a presentar de forma parcial desde el momento en que se da la mejora en la calidad del aire (40% del efecto se manifiesta a partir del año 1 de la reducción) y se logra completamente y de

---

<sup>2</sup> El diseño de los estudios puede variar según el efecto que quiera evaluarse. Los estudios incluidos en la revisión utilizan para la evaluación de efectos agudos series de tiempo. Para la evaluación de efectos crónicos se realizan estudios de cohorte prospectiva. En ambos casos se incluyeron estudios con análisis multivariado y con corrección por factores de confusión.



manera gradual en un periodo de tiempo determinado. Para este estudio se supuso que en un periodo de 10 años se manifiestan completamente los efectos.

#### 4.3.3. *Línea Base de los Efectos Evaluados*

El término  $I_t$  de la Ecuación 4.1 con la cual se estiman las FCR corresponde a la línea base del efecto que se está evaluando para la población de estudio. Estas proporciones representan el número inicial de casos que se están presentando en la ciudad y por lo tanto constituyen línea base de la evaluación.

La principal fuente de información de línea base de los efectos son los registros epidemiológicos locales. En la revisión de estos registros para el caso de Bogotá se identificaron las siguientes bases de datos disponibles: 1) Base de datos del registro individual de prestación de servicios de salud (RIPS) del Ministerio de la Protección Social; 2) Sistema de estadísticas vitales del Departamento Nacional de Estadística (DANE); 3) Infraestructura Colombiana de Datos – DANE; 4) Compilación y análisis de datos epidemiológicos en Bogotá (Muñoz & Behrentz, 2009); 5) Sistema de vigilancia epidemiológica (SIVIGILA); 6) Boletines epidemiológicos de la Secretaría Distrital de Salud (SDS) y 7) Encuesta Nacional de Salud (2007). En el Anexo 4.4 de este informe se presenta una descripción de cada uno de estos registros.

A partir de la revisión de estas bases de datos se identificaron las que podrían ser utilizadas para establecer la línea base de los diferentes efectos a evaluar. Para mortalidad se identificaron las siguientes bases de datos: 1) Sistema de estadísticas vitales del DANE; 2) Infraestructura colombiana de datos (DANE) y 3) Compilación y análisis de datos epidemiológicos en Bogotá (Muñoz & Behrentz, 2009). Para morbilidad atendida se identificaron las siguientes fuentes de información: 1) Base de datos del registro individual de prestación de servicios de salud (RIPS) del Ministerio de la Protección Social; 2) Compilación y análisis de datos epidemiológicos en Bogotá (Muñoz & Behrentz, 2009); 3) Sistema de vigilancia epidemiológica (SIVIGILA) y 4) Boletines epidemiológicos de la Secretaría Distrital de Salud (SDS). Para el establecimiento de la línea base en morbilidad sentida, se identificó la Encuesta Nacional de Salud como una fuente de información válida.

Con el fin de seleccionar la información que conformaría la línea base, se evaluó la calidad de la información de las diferentes bases de datos disponibles teniendo en cuenta el cubrimiento poblacional de la base (porcentaje de la población cubierto por la base de datos) y el periodo de tiempo para el que se cuenta con información disponible (número de años con información). Adicionalmente, se realizó un análisis de los registros en el que se evaluaron para los diferentes años los siguientes parámetros: número de registros anuales, variabilidad anual del número de registros, consistencia entre los registros de un mismo año y consistencia de los registros para cada efecto entre las bases evaluadas. Este análisis se complementó con una investigación con el fin de conocer la opinión de expertos de las entidades responsables de la información en cuanto a la calidad y potencial de uso de las bases de datos. El análisis detallado de las bases se presenta en el Anexo 4.5.

Los datos poblacionales utilizados en la determinación de la línea base de los efectos en salud corresponden a las series de población desarrolladas por el DANE a partir de la información obtenida del Censo general del año 2005 y a la proyección de estos datos para el periodo de interés de este estudio (2010-2020), realizada por la misma entidad (ver Anexo 4.6).

La línea base para los efectos evaluados se calcularon a partir de los datos poblacionales y epidemiológicos para el año de referencia. Estos resultados se presentan como número de casos por cada 1,000 habitantes al año. Para la determinación de la línea base de mortalidad la información se corrigió por muertes violentas.

#### 4.3.4. *Determinación del Cambio en el Nivel de Exposición a la Contaminación Atmosférica*

La evaluación de los efectos en salud considera el cambio en el factor de riesgo debido a un cambio en los niveles de exposición ( $\Delta C$ , ver Ecuación 4.1). Como ya se mencionó, en este estudio el factor de riesgo es la exposición de la población a la fracción respirable de material particulado.

En todos los estudios epidemiológicos que sirvieron de base para la elaboración de este trabajo, los niveles de exposición de la población se determinan a partir de las concentraciones de material particulado registradas por las estaciones fijas de monitoreo de calidad del aire. Utilizando dichos valores y los registros epidemiológicos de cada ciudad se estima el riesgo relativo para los diferentes efectos evaluados. Siendo consistentes con la metodología utilizada en los estudios originales, para este trabajo los niveles de exposición de la población se basan en los valores registrados por la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá para el año base y a las proyecciones de dichos valores para el horizonte de análisis (2010-2020). Los niveles de material particulado se estimaron siguiendo la metodología de análisis de componentes principales.

En los estudios en los que se evalúan efectos de la exposición crónica a material particulado se utilizan promedios anuales de concentración. Por otra parte, en los estudios en los que se evalúan efectos asociados a la exposición aguda generalmente se utilizan promedios diarios de concentración para estimar los efectos en salud. Debido a la dificultad técnica de realizar proyecciones diarias de concentración de PM para el horizonte de análisis del plan (2010-2020), en el presente estudio se supuso que los cambios en la concentración promedio anual son representativos de los cambios diarios y por lo tanto pueden ser utilizados para la evaluación de efectos relacionados con exposición aguda. Esto supone que los cambios en los promedios diarios se ven reflejados en un cambio en el promedio anual de concentración, lo cual es de esperar a partir de la definición matemática del promedio.

El término  $\Delta C$  de la Ecuación 4.1, se estimó como la diferencia en la concentración anual de PM entre el escenario tendencial y el escenario con plan. Los valores de concentración utilizados para el escenario tendencial corresponden a los estimados a partir de las proyecciones de las emisiones para estos años, mientras que los valores de concentración utilizados en el escenario con plan son el resultado en términos de concentración de implementar el portafolio óptimo de medidas del plan. El uso de  $\Delta C$  evaluado de la manera como se explicó anteriormente, permite estimar el número de casos de morbi-mortalidad que se evitarían con la implementación del plan de descontaminación respecto al escenario tendencial.

Es necesario mencionar que no existe un umbral de concentración reportado en la literatura para la aparición de la mayoría de los efectos en salud. Solo los efectos en mortalidad presentan un umbral de concentración de PM<sub>2.5</sub> estimado de 7.5  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , por debajo del cual no se ha demostrado que se presenten casos atribuibles a la contaminación por material particulado (WHO, 2002). Por tal razón, pese a cumplir los objetivos de reducción de acuerdo con la normativa nacional, se seguiría contando con una carga de enfermedad atribuible a la concentración remanente de material particulado. La reducción en la concentración de PM

significa también una reducción en la carga de morbi-mortalidad. Por esta razón, la evaluación de los casos evitados frente a la carga total de enfermedad por la contaminación por material particulado es también un elemento importante para el análisis de beneficios derivados del plan.

#### 4.4. Estimación de Costos

La valoración monetaria de los beneficios en la salud por la reducción en la concentración de material particulado está asociada con la reducción en el número de casos de morbilidad y mortalidad. La revisión bibliográfica realizada permitió identificar dos enfoques principales para realizar esta valoración: 1) la evaluación de los costos de enfermedad (COI por sus siglas en inglés) los cuales incluyen los costos de atención de la enfermedad y la pérdida de productividad por la restricción en la actividad laboral; y 2) la valoración de la disponibilidad a pagar (WTP por sus siglas en inglés) por evitar los episodios de enfermedad o reducir el riesgo de muerte. La WTP incluye los valores cuantificados mediante COI más la valoración que los individuos hacen de la pérdida de bienestar que implica sufrir el efecto en la salud.

Mientras los valores de COI suelen ser relativamente sencillos de determinar para el contexto local los valores de WTP requieren el desarrollo de estudios más largos y costosos (Ibáñez et al, 2002) lo cual hace menos probable que estos valores estén disponibles para países en vía de desarrollo. Cuando no se cuenta con estudios locales disponibles de WTP para los efectos a evaluar puede usarse la metodología de transferencia de beneficios (BT por sus siglas en inglés). Esta metodología permite el traspaso del valor monetario de un bien ambiental determinado para un sitio de estudio a un nuevo contexto político (sitio de intervención) (Brouwer, 2000). Para todos los casos de WTP en esta valoración se usó BT. Para los valores en dólares se usó una tasa de cambio de 1 USD = 2,170.375 COP.

En términos generales la evaluación de los beneficios requiere conocer el valor monetario de cada uno de los efectos en salud para posteriormente con el número total de casos evitados conocer el beneficio total. En las siguientes subsecciones se presenta la metodología usada para estimar los beneficios económicos de los efectos evaluados.

El PDDB reporta todos sus datos de costos asumiendo precios constantes del año 2009. Debido a la discusión existente sobre la tasa de descuento a usar para estimar el valor presente neto de los beneficios ambientales durante un periodo de tiempo (Saavedra, 2009) se realizó la evaluación de cuatro escenarios: 1)  $TD_0$  en donde no se incluye tasa de descuento (tasa de descuento = 0%); 2)  $TD_1$ , tasa de descuento de 3.0% acorde a lo sugerido por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2002) y en conformidad a lo usado por Larsen (2004), 3)  $TD_2$ , tasa de descuento variable y decreciente en el tiempo (4.38% – 3.49% para un periodo de 10 años) acorde a Saavedra (2009) y 4)  $TD_3$ , tasa de descuento del 12%, el valor coincide con el utilizado por el Departamento de Planeación Nacional para proyectos de inversión social (Correa, 2008) y es el mismo utilizado en la evaluación del plan de descontaminación de Santiago de Chile (Sánchez, 1998) y Ciudad de México (World Bank, 2002).

##### 4.4.1. *Morbilidad*

Diversos autores coinciden en afirmar que la mejor expresión monetaria de los beneficios en salud corresponde a los valores de disponibilidad a pagar (Cifuentes et al, 2005, Mendieta, 2005, Freeman III, 2003). Esto debido a que la WTP permite la valoración de elementos intangibles como la pérdida de bienestar asociada con el dolor y el sufrimiento de la enfermedad

(Cifuentes et al; 2005). Al contar con una mayor integralidad en la estimación de los beneficios la valoración de la WTP reviste también de mayor importancia en términos de evaluación de políticas públicas e inversión en proyectos ambientales (IDEAM, 2003; Ibáñez et al, 2002). El análisis de COI por su parte se considera un límite inferior de la valoración (Freeman III, 2003).

Sin embargo, para los fines de este estudio resulta de interés también conocer los resultados de una valoración mediante COI que permita comparar con los costos directos de atención de enfermedades. Por esta razón para la evaluación de la morbilidad se consideran los dos escenarios de valoración (COI y WTP). A continuación se describe la metodología para estimar los valores unitarios de los efectos en morbilidad en ambos escenarios de valoración.

– Costos de Enfermedad:

Los COI hacen referencia a dos componentes: 1) los costos directos del tratamiento de la enfermedad (costos de atención) y 2) los costos asociados a la pérdida de productividad por incapacidad laboral.

Para la valoración de estos costos se realizó una investigación que permitió identificar el consumo de recursos y procedimientos realizados para los diferentes efectos que se evaluaron. Se identificó también el tiempo de uso de los diferentes niveles de asistencia médica para estos efectos. Esta información se obtuvo a través de consulta directa con la Secretaría Distrital de Salud y fue complementada con una revisión bibliográfica para identificar las principales características del tratamiento de las enfermedades evaluadas (American Heart Association 2008, Liao et al., 2006, ISS 1998).

El consumo de recursos y los procedimientos realizados en cada nivel de atención fueron valorados según el Manual Tarifario SOAT. Las tarifas consignadas en este manual (Decreto 2423 de 1996, actualización 2009) son de obligatorio cumplimiento para las IPS públicas y es usado de forma obligatoria en algunos casos específicos por las entidades privadas. Estas tarifas son aceptadas por las Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud (IPS), según información validada con la Asociación Colombiana de Clínicas y Hospitales (ACCH).

La pérdida de productividad hace referencia a las pérdidas asociadas a los días no laborados por el efecto de la enfermedad (atención hospitalaria y orden de incapacidad expedida por el médico). La información sobre los días de atención para los efectos evaluados se obtuvo a través de la SDS y se complementó con una revisión bibliográfica (American Heart Association, 2008) y consulta directa a especialistas de la salud. Según las fuentes de información utilizadas en promedio se generan dos días de incapacidad por cada día de hospitalización y tres días de incapacidad por cada día que se pase en la unidad de urgencias o en la de cuidados intensivos. Como una medida para valorar el trabajo de las personas se asume que todos los casos de incapacidad generan pérdida en la productividad aún cuando la persona no tenga un empleo formal. La incapacidad de los niños genera también pérdida de productividad al implicar el acompañamiento de un adulto.

Para cuantificar el costo asociado a la pérdida de días laborales, se construyó un rango donde el límite superior corresponde al PIB per cápita diario para la ciudad de Bogotá (DANE, 2009) y el límite inferior corresponde 1 SMMLVD. El valor central corresponde al promedio de estos dos valores. Los resultados de la valoración se reportan con el valor central.

– Disponibilidad a Pagar

No se encontraron valores locales de WTP calculados con información primaria que coincidieran con los efectos evaluados. Se recurrió al uso de valores determinados por otros estudios realizados en América Latina los cuales están compilados en la revisión realizada por Cifuentes et al (2005). Los valores fueron transferidos usando BT al contexto colombiano. Se incluyeron también los valores de WTP por evitar admisiones hospitalarias por causas respiratorias calculados por Lozano (2004) para Colombia usando BT.

#### 4.4.2. *Mortalidad*

La muerte prematura es el efecto de mayor impacto de la contaminación atmosférica. En este estudio se utilizó el valor estadístico de la vida (VSL, por sus siglas en inglés) como metodología de valoración económica de la mortalidad.

El VSL es una aproximación económica útil en la valoración de la reducción de los casos evitados en mortalidad como resultado de la implementación de mejoras ambientales (Bowland & Beghin, 2001). Es una metodología de amplia implementación en términos de evaluación de políticas e inversión ambiental (Arigoni Ortiz, Markandya, & Hunt, 2009).

El VSL es la metodología utilizada por la EPA (2004b) y por la Comisión Europea de Ambiente (CAFE, 2005) para expresar los beneficios de la reducción del riesgo de mortalidad en términos monetarios y de esta forma realizar los análisis costo beneficio de sus normas y programas (EPA, 2004b).

El VSL representa la WTP por la disminución del riesgo de muerte. Es decir, representa la cantidad de dinero que una persona está dispuesta a pagar por disminuir un factor de riesgo de muerte. Este valor no representa el valor de la vida sino el valor asociado a una reducción en el riesgo de muerte. En este caso entendido como la reducción de los niveles de concentración de material particulado.

El valor estadístico de la vida se calcula mediante fuentes primarias usando la metodología de valoración contingente. De este modo se realizan encuestas que permiten identificar la WTP de las personas por reducir un riesgo específico o la disponibilidad a aceptar por exponerse a un factor de riesgo. El VSL es específico para cada país y contempla la disponibilidad a pagar de sus ciudadanos en su contexto económico, social y cultural. No existe en Colombia estudios en los que se haya construido el VSL a partir de información primaria. Por esta razón, en este estudio se estimó el VSL mediante transferencia de beneficios. Se usó el mismo valor de VSL para niños que para adultos. Esto coincide con evaluaciones realizadas en Europa (Pérez et al, 2009). No obstante, difiere de lo hallado en Ciudad de México por Hammitt & Ibarrán (2002) quienes encontraron valores mayores de VSL para los menores de edad.

#### 4.4.3. *Transferencia de beneficios*

La transferencia de beneficios puede realizarse mediante la transferencia de valores y la transferencia de funciones. En este estudio se utilizó la transferencia de valores, la cual consiste en realizar la transferencia de un valor económico promedio basado en un conjunto de estudios

desarrollados en un contexto socio-económico similar al del sitio de intervención (Carriazo, Ibáñez, & García, 2003).

Para la transferencia de un valor se requieren dos elementos: 1) La transferencia del valor entre países que se realiza con base en los cambios en el PIB per cápita en términos de poder de paridad adquisitiva (PPP) entre el sitio de estudio y el sitio de intervención y 2) La transferencia del valor en el tiempo hasta el año de evaluación usando la variación en el índice de precios al consumidor (IPC). La ecuación 4.3 muestra la expresión matemática para la transferencia de un valor. En donde el subíndice “i” representa los valores para el sitio de intervención mientras que “e” representa los valores para el sitio de estudio. El valor transferido mediante esa ecuación debe ser llevado a valor presente. Los valores de IPC y PIB per cápita en términos de PPP fueron obtenidos de la World Economic Outlook Database –Actualización octubre de 2009 del Fondo Monetario Internacional.

$$\text{Valor}_i = \text{Valor}_e \cdot \frac{\text{PIB}_{PCPPP_i}}{\text{PIB}_{PCPPP_e}} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

La transferencia de beneficios es la aproximación más adecuada para determinar un valor en un contexto dado, ante la imposibilidad de calcularla con información primaria (Freeman III, 2003). Debe procurarse que exista similitud entre el sitio de estudio y el sitio de intervención. Para tal fin se realizó una revisión de los estudios desarrollados en América Latina que determinaron el VSL. En la BT de esta evaluación se tuvieron en cuenta los resultados de tres estudios: 1) la investigación desarrollada por Arigoni Ortiz et al (2009) en Sao Paulo; 2) el desarrollado por Hammitt & Ibarrán (2002) en Ciudad de México y 3) el realizado en Santiago de Chile por Bowland & Beghin (2001). Los dos primeros usan metodología de valoración contingente para la determinación del VSL mientras que el desarrollado por Bowland & Beghin (2001) consiste en una transferencia de beneficios usando transferencia de la función la cual es ajustada por diferentes aspectos socioeconómicos.

#### 4.5. Incertidumbre

Asociada a la metodología usada en la evaluación, la disponibilidad de información y los supuestos realizados en la valoración se presenta una incertidumbre en los cálculos realizados. Los resultados de este informe se presentan con un intervalo de confianza. Sin embargo, este intervalo corresponde exclusivamente al proporcionado en el RR de los estudios epidemiológicos usados para la evaluación de los efectos y no representa la totalidad de la incertidumbre. Atendiendo a lo anterior, los valores obtenidos en este informe deben entenderse como un orden de magnitud de los efectos (número de casos y estimación de costos) de la contaminación sobre la salud de la población y no como valores exactos.

Se realizó una descripción detallada de los factores de incertidumbre identificados, los cuales se exponen a continuación.

- **Funciones concentración respuesta:** Una de las principales limitaciones para la adecuada utilización de las FCR es la disponibilidad de información local. Para el caso específico de Bogotá no se cuenta con suficientes estudios que determinen el riesgo relativo por exposición a material particulado para los diferentes efectos evaluados en salud. Por esta razón se utilizaron RR determinados para otras ciudades. Esto supone que la respuesta epidemiológica de la población bogotana frente a la contaminación es similar a la de la población de los estudios originales.

Para minimizar el error debido a este supuesto se le dio prioridad a estudios epidemiológicos desarrollados en países de América Latina para los cuales se espera que la población tenga un comportamiento muy similar al de la población de Colombia. Es importante resaltar que esto constituye una limitación muy común en el uso de FCR según la revisión de bibliografía realizada.

- **Representatividad poblacional de las bases de datos de morbilidad y mortalidad:** Se realizó una rigurosa revisión de información local para identificar las bases de datos de morbilidad y mortalidad disponibles para la ciudad. La revisión realizada incluyó el dialogo directo con las diferentes entidades responsables de la recopilación de datos epidemiológicos en el país.

En Colombia existen tres regímenes de salud: 1) Régimen contributivo, constituido por la población con empleo formal, quienes aportan al sistema de salud, 2) Régimen subsidiado, representado por las personas de bajos ingresos que reciben cobertura del SISBEN y 3) Régimen vinculado, el cual es un régimen transicional hacia el régimen subsidiado.

El régimen vinculado está constituido por personas que no están empleadas formalmente y por ende no están cubiertas por el régimen contributivo. A su vez, por problemas en la expansión de la cobertura del sistema de salud aún no se encuentran cubiertas por el régimen subsidiado. Las personas pertenecientes a este régimen no tienen capacidad de pago para acceder a los servicios de salud y son considerados como población vulnerable por su bajo nivel de ingresos. Adicionalmente, podría esperarse que su vivienda se encuentre ubicada en zonas de mayor concentración de  $PM_{10}$ . Como consecuencia de lo anterior, la línea base de enfermedades respiratorias en este segmento de la población podría ser mayor que la del resto de la ciudad.

La frecuencia inicial de casos para los efectos evaluados en este trabajo se calculó con información del régimen vinculado de salud debido a que no se encontró información completa para los otros regímenes. Se supuso que la proporción de casos registrada en este régimen es representativa para toda la población de la ciudad. Según cifras oficiales<sup>3</sup> el régimen vinculado representa alrededor del 30% de la población bogotana. Teniendo en cuenta las características de este régimen, el supuesto utilizado podría llevar a una sobreestimación de la línea base.

- **Línea base:** Después de hacer una revisión detallada de las bases de datos de salud disponibles para la ciudad, se decidió utilizar los registros de salud del año 2006 para el establecimiento de la línea base. Al momento del desarrollo de este estudio la información del año 2006 constituye la información más completa y reciente sobre los efectos en salud de la población de Bogotá. Se supuso que las tasas de incidencia son constantes entre el año 2006 y el periodo de análisis del PDDb (2010-2020).
- **Efectos de salud incluidos en la valoración:** La selección de los efectos incluidos en la valoración del impacto de la calidad del aire en la salud depende de tres aspectos principales: 1) La existencia de la relación causal entre la exposición al contaminante y el efecto evaluado, 2) La disponibilidad de información para el uso de la función concentración respuesta, incluyendo la existencia misma de la FCR y 3) La relevancia del efecto en términos de salud y en términos económicos.

---

<sup>3</sup> Ministerio de Protección Social. Dirección General de Planeación y Análisis de Política. Disponible en línea: <http://www.minproteccionsocial.gov.co/>

De estos aspectos, la disponibilidad de información, y específicamente de la proporción de casos que se presentan actualmente en la ciudad para cada efecto en la salud fue la principal limitación para la valoración realizada en este trabajo. La información disponible en los registros locales de salud limitó la evaluación de algunos efectos de la línea base de morbilidad sentida. La no inclusión de la totalidad de los efectos implica una potencial subestimación de los beneficios estimados en salud. Por ejemplo, no se cuenta con información local acerca de la tasa de prevalencia de la bronquitis crónica. En un estudio acerca de los costos ambientales en Colombia (MAVDT, 2004) mediante una tasa de prevalencia de otro país, Larsen estimó que la bronquitis crónica podía representar el 17% de los costos en morbilidad asociados a la contaminación del aire.

- **Fracción  $PM_{2.5}/PM_{10}$ :** En este estudio se utilizó 0.5 como la fracción  $PM_{2.5}/PM_{10}$  para el aire ambiente de la ciudad. Este valor fue identificado en la caracterización de material particulado que se realizó en Bogotá como parte de la fase anterior del proyecto (SUR, 2008). La fracción  $PM_{2.5}/PM_{10}$  depende entre otros factores, de las características de las fuentes de emisión y de las condiciones meteorológicas, y por lo tanto podría variar espacialmente en la ciudad y a lo largo del periodo de análisis del plan de descontaminación.

En la literatura internacional, generalmente se reportan valores para esta fracción en el rango entre 0.5 y 0.7.

- **Métrica de la exposición:** Los efectos en la salud de la población se evalúan con respecto a cambios en la concentración anual de material particulado. Para la evaluación de los efectos por exposición aguda se supone que cambios en los niveles de concentración diaria se ven reflejados en el valor de la concentración anual. Si bien esto es matemáticamente correcto, la suposición utilizada impide observar el efecto de los picos de concentración los cuales tienen una fuerte influencia en la aparición de efectos por exposición aguda.
- **Tiempo de respuesta de los efectos sobre la salud de la población:** Los efectos en la salud derivados de cambios en la calidad del aire se pueden clasificar en dos grupos según el tiempo en que tardarían en presentarse respecto al momento en que se dan los cambios en los niveles de contaminación: 1) Efectos asociados con exposición aguda, éstos hacen referencia a los efectos en salud por cambios diarios en los niveles de exposición. Se supone que los efectos en la salud se presentan de manera inmediata con el cambio en la concentración de material particulado; 2) Efectos por exposición crónica, hacen referencia a los efectos en salud por cambios prolongados en la exposición al material particulado. En este trabajo se supuso que la manifestación de los efectos en la salud asociados a exposición crónica se presentan de forma gradual desde el momento en que cambian las condiciones de la calidad del aire y se completan en un periodo de 11 años. Este tiempo de respuesta es estimado y por lo tanto la expresión máxima de los efectos podría observarse en un periodo de tiempo diferente.
- **Uso de proporciones locales para evaluar efectos en salud:** La estimación del número de casos para efectos en morbilidad atendida para los cuales no se cuenta con RR específicos para la población de América Latina, se realizó mediante el uso de proporciones identificadas en los registros de información local de salud (ver Sección 4.3.3). Estas proporciones no necesariamente son las mismas para la fracción de estos efectos atribuida a la contaminación atmosférica.



- **Niveles de exposición personal:** La literatura científica ha demostrado que los niveles de contaminantes registrados por las estaciones fijas de monitoreo no son necesariamente representativas de los niveles de contaminación a los que se expone la población en los diferentes microambientes que hacen parte de su rutina diaria, y que los niveles de exposición en éstos últimos pueden ser incluso varias veces superiores. Sin embargo, los estudios epidemiológicos utilizados como base para este estudio definen la exposición de la población con base en los registros de las redes de monitoreo de las ciudades. De manera consistente con dichos estudios, los niveles de exposición utilizados para la valoración de efectos en salud en este trabajo se basan en los niveles de calidad del aire registrados por la red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad.
- **Análisis espacial de los efectos ( $Pe = 1$ ):** En la estimación de efectos sobre la salud se supuso que los beneficios en la calidad del aire derivados de la implementación del plan de descontaminación se presentan de manera uniforme para toda la ciudad y afectan en igual proporción a toda la población (esto se evidencia en el  $Pe=1$ ). Este supuesto implica que toda la población está expuesta al mismo riesgo por la contaminación atmosférica.

Si bien es cierto que toda la población se encuentra expuesta al material particulado, la información de la red de monitoreo de calidad del aire evidencia que la concentración de material particulado no es uniforme en la ciudad. En adición a lo anterior, es posible que la aplicación de ciertas medidas de reducción de la contaminación presente impactos diferenciados en la ciudad. Acorde a lo anterior es de esperarse que la población de la ciudad experimente diferentes reducciones en los niveles de concentración de  $PM_{10}$ .

El supuesto asumido cumple una función de simplificación del cálculo del número de casos evitados. Las limitaciones en las fuentes de información (línea base de efectos y concentración de  $PM_{10}$ ) impiden realizar un análisis espacial detallado durante el periodo de análisis.

- **Determinación de los valores de COI:** Los valores usados para los costos de atención podrían ser una subestimación de los costos reales, debido a que éstos no incluyen costos indirectos como los gastos de transporte u otros adicionales que puedan generarse por la enfermedad.

El valor usado para la estimación de la pérdida de productividad es un estimativo basado en un valor promedio. Se genera incertidumbre adicional al considerar que toda la población aporta de igual manera en términos de productividad. El supuesto según el cual todos los días de incapacidad de los niños resultan en pérdida de productividad para los adultos puede ser un factor de sobreestimación adicional.

- **Determinación de los valores de a pagar:** La disponibilidad a pagar para los efectos evaluados incluye los valores de COI más la valoración que realizan las personas por la pérdida de bienestar. Debido a que se usaron valores por transferencia de beneficios es posible que estos no necesariamente representen de manera adecuada el caso colombiano. Sin embargo para este caso constituyen la mejor aproximación disponible.
- **Tasa de descuento:** Para la evaluación de proyectos en el tiempo se hace necesario el uso de una tasa de descuento para conocer el valor presente neto de los beneficios. Sin embargo, no existe consenso sobre que tasa de descuento usar para proyectos

ambientales, por esta razón se realizó la evaluación de cuatro escenarios con valores de diferentes autores.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Estimación de Beneficios en Salud

#### 5.1.1. *Selección de Efectos*

De acuerdo con los criterios de selección establecidos, estos fueron efectos que se incluyeron en la valoración: **1)** Efectos en mortalidad (mortalidad por exposición crónica en mayores de 30 años y mortalidad por exposición aguda en niños menores de 1 año), **2)** Efectos en morbilidad atendida (atención en sala de urgencias, hospitalizaciones, atención en salas de enfermedad respiratoria aguda y atención en unidad de cuidados intensivos) y **3)** Efectos en morbilidad sentida (aparición de síntomas respiratorios). A continuación se presenta una descripción de estos efectos y se referencian los estudios de los cuales proviene el RR utilizado.

#### Mortalidad

- Mortalidad por exposición crónica (mayores de 30 años, todas las causas): Existe evidencia científica que relaciona la exposición prolongada a la fracción fina del material particulado con el aumento de la tasa de mortalidad en la población (Lipfert et al., 2000, Pope et al., 1995, Dockery et al., 1993). Esta evidencia epidemiológica ha sido utilizada por instituciones como la OMS y la EPA para el establecimiento de los estándares de calidad del aire.

Una de las investigaciones más representativas en este tema es la que realizó la American Cancer Society (Pope et al., 1995), en la cual se incluyó una población de estudio superior a 500,000 personas distribuidas en 151 ciudades de Estados Unidos. Este estudio ha sido objeto de revisión por parte del Health Effects Institute y por los autores originales (Krewski et al., 2000, Pope et al., 1995) quienes han podido verificar los resultados iniciales.

Debido a su representatividad y después de realizar una comparación frente a otros estudios en el ámbito internacional, se decidió utilizar el RR determinado en la versión más reciente de este estudio (Pope et al., 2002) para evaluar el efecto en mortalidad por exposición crónica a material particulado.

- Mortalidad infantil (menores de 1 año, todas las causas): Por su desarrollo fisiológico, los niños menores un año de edad hacen parte de la población sensible a los efectos de la contaminación. Diferentes autores han encontrado una relación positiva entre los cambios diarios en la concentración de material particulado y el aumento de la mortalidad infantil (Lacasaña et al., 2005, Loomis 1999). El RR seleccionado para la evaluación de este efecto corresponde al hallado por Loomis (1999) en un estudio desarrollado para Ciudad de México.

#### Morbilidad Atendida

- Admisiones hospitalarias por causas respiratorias (menores de 5 años): Estudios epidemiológicos desarrollados para América del Sur, Estados Unidos y Europa señalan una relación entre el aumento en la concentración de PM<sub>10</sub> y el incremento de las admisiones hospitalarias por causas respiratorias en niños (Gouveia, 2003; Braga, 2001 en OPS, 2005). El RR usado en este trabajo corresponde al hallado por Gouveia (2003) en un estudio

desarrollado en Rio de Janeiro, para admisión hospitalaria por causas respiratorias en niños menores de 5 años de edad.

- Admisiones hospitalarias por causas respiratorias (mayores de 5 años): El aumento en las hospitalizaciones por causas respiratorias asociado al incremento de la concentración de material particulado también se observa en la población mayor a cinco años de edad (APHEIS 3, 2005 en Künzli, 2007 y Burnett et al., 1995 en Sánchez, 1998). Según la información de las bases de datos de RIPS cerca del 28% de los casos de admisiones hospitalarias por causas respiratorias ocurren en pacientes mayores de cinco años. Esta proporción se utilizó para determinar el número de casos evitados en la población de Bogotá derivados de una mejora en la calidad del aire.
- Admisiones hospitalarias por causas cardiovasculares (toda la población): Burnett et al., (1995) y Le Tertre et al., (2002) reportan un incremento de los casos de admisiones hospitalarias por causas cardiovasculares relacionado con el aumento en la concentración de PM<sub>10</sub>. Se utilizó el RR determinado por Le Tertre (2002) para la estimación del número de casos evitados.
- Atención en urgencias por causas respiratorias (niños menores de 5 años): La estimación del número de casos evitados se determinó a partir del análisis realizado por la SDS según el cual el 15% de los niños que presentan síntomas respiratorios realiza consulta en urgencias (IDEAM, 2005).
- Atención en urgencias por causas respiratorias (mayores de 5 años): Existe una relación entre el aumento en la concentración de PM<sub>10</sub> y un aumento en el número de casos de atención en salas de urgencias por causas respiratorias (INE 2003, World Bank 2002, American Thoracic Society, 1996). En Bogotá según la información registrada en las bases de datos de RIPS cerca del 32% de los casos de consulta en salas de urgencia por causas respiratorias corresponde a la población mayor de cinco años.
- Salas ERA (niños menores de 5 años): Las salas ERA son salas de atención especializada para pacientes con enfermedad respiratoria aguda que pueden ser tratados con esquemas terapéuticos básicos, sin los requerimientos de una sala de urgencias (SDS, 2004). Para la determinación del número de caso se usó la información de la SDS según la cual el 90% de los casos de atención en urgencias por causas respiratorias se direcciona a salas ERA.
- Unidades de cuidados intensivos (niños menores de 5 años): Para la evaluación de este efecto se utilizó la información proporcionada por la SDS. Según los registros de esta entidad el 20% de los casos de hospitalización por causas respiratorias son remitidos a unidades de cuidados intensivos.

#### Morbilidad Sentida

- Síntomas respiratorios (niños menores de 5 años): Según el estudio realizado por Aristizabal et al., (IDEAM, 2005). En promedio los niños menores de 5 años tienen 4 episodios de enfermedad respiratoria al año. De estos el 15% realizan consulta en urgencias y de este porcentaje el 30% son hospitalizados. Estas proporciones fueron utilizadas para estimar el número de episodios potencialmente evitados de síntomas respiratorios en la población infantil.

### 5.1.2. Valores de Riesgo Relativo Utilizados en la Estimación de los Efectos en la Salud Derivados de la Contaminación del Aire

En la Tabla 4.1 se presentan los RR utilizados en la estimación de efectos de la contaminación del aire sobre la salud de la población. Estos valores corresponden a los RR para un aumento de 10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  de  $\text{PM}_{10}$ .

**Tabla 4.1.** Riesgos relativos.

Efecto Evaluado	Edad	RR (IC 95% <sup>1</sup> ) por un aumento en 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{10}$	Fuente
Mortalidad por exposición crónica (todas las causas)	> 30 años	1.030 (1.010-1.054)	Pope, 2002
Mortalidad infantil	< 1 año	1.034 (1.012-1.055)	Loomis, 1999
Admisiones hospitalarias por causas respiratorias	< 5 años	1.018 (1.004-1.024)	Gouveia, 2003
Admisiones hospitalarias por causas cardiovasculares	Todas	1.006 (1.003-1.009)	Le Tertre, 2002

<sup>1</sup> El intervalo de confianza para cada función corresponde al intervalo estimado en el estudio original.

El comportamiento año a año del RR para todos los efectos se presenta en el Anexo 4.7. El RR que se presenta en el anexo ya se encuentra afectado por los cambios en los niveles de concentración de PM esperados con la implementación del plan de descontaminación.

### 5.1.3. Línea Base de los Efectos Evaluados

Para morbilidad atendida el registro de RIPS y la compilación de Muñoz y Behrentz (2009) son las bases de datos que ofrecen la mejor información. De estas dos fuentes se seleccionó la revisión generada por Muñoz & Behrentz (2009), tanto para la evaluación de morbilidad atendida como de mortalidad, por ser la que mejor responde a los criterios de calidad establecidos en la metodología de este trabajo. En la Tabla 4.2 se presentan las tasas utilizadas para la construcción de la línea base.

**Tabla 4.2.** Tasas de mortalidad y morbilidad.

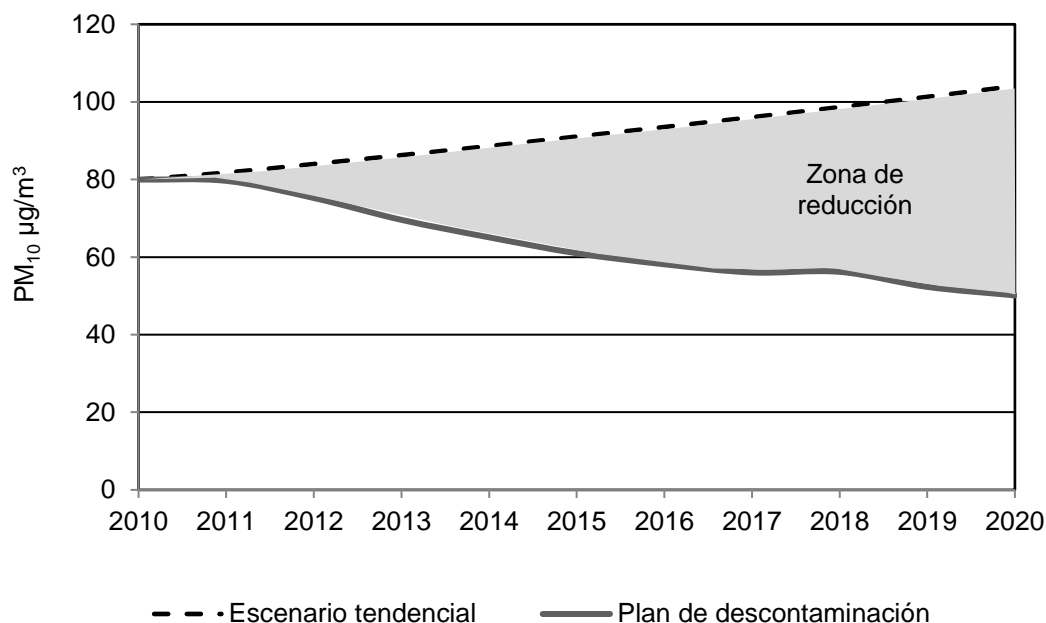
Efecto	Edad	Tasa <sup>1</sup>
Mortalidad	> 30	6.3
Mortalidad	< 1	12.2
Admisiones hospitalarias por causas respiratorias	< 5	82.7
Admisiones hospitalarias por causas cardiovasculares	Toda	2.2

<sup>1</sup> Número de casos por cada mil habitantes por año.

La revisión de los registros locales de salud permitió evidenciar que existe mayor solidez en las bases de datos de mortalidad en comparación con las de morbilidad.

#### 5.1.4. Cambio en el Nivel de Exposición de la Población a Material Particulado

En la Figura 4.2 se presentan los niveles de material particulado que se tendrían durante el periodo de análisis (2010-2020) en el escenario tendencial en comparación con los niveles que se tendrían con la implementación del plan de descontaminación (ver resultados del modelo de optimización utilizado en este proyecto). Los beneficios del plan de descontaminación se hallaron mediante la comparación de los efectos que se tendrían en estos dos escenarios.



**Figura 4.2.** Escenarios de concentración evaluados.

#### 5.2. Número de casos potencialmente evitados

En la Tabla 4.3 se presenta el número de casos de morbi-mortalidad que ocurrirían en el escenario tendencial y los casos potencialmente evitados con la implementación del plan de descontaminación. Los casos evitados se estimaron como la diferencia entre el número de casos en el escenario con plan frente al número de casos en el escenario sin plan. En ambos casos los valores representan la sumatoria de los beneficios generados durante el periodo 2010-2020.

Vale la pena aclarar que bajo el modelo utilizado existe una gradualidad en la aparición de los beneficios en reducción de la mortalidad asociados con la exposición crónica. De este modo se espera que algunos de los beneficios generados por el plan de descontaminación alcancen su máxima expresión después del año 2020.

**Tabla 4.3.** Comparación en el número casos entre el escenario tendencial y el escenario con plan de descontaminación para el periodo 2010-2020.

Efecto	Edad	Número de casos - carga de enfermedad escenario tendencial 2010-2020 (IC 95%) <sup>1</sup>	Casos evitados con el plan 2010-2020 (IC 95%) <sup>1</sup>
Mortalidad por exposición crónica	> 30 años	49,500 (17,900-82,500)	13,700 (4,700-24,500)
Mortalidad infantil	< 1 año	3,700 (1,500-5.500)	1,500 (550-2,400)
Admisiones hospitalarias (causas respiratorias)	< 5 años	84,300 (19,700-107,000)	27,500 (6,000-35,700)
Admisiones hospitalarias (causas respiratorias)	> 5 años	33,400 (7,800-42,500)	10,900 (2,400-14,200)
Admisiones hospitalarias (causas cardiovasculares)	Todas	10,300 (5,200-15,200)	3,200 (1,600-4,900)
Atención en urgencias (causas respiratorias)	< 5 años	25,300 (5,900-32,100)	8,200 (1,800-10,700)
Atención en urgencias (causas respiratorias)	> 5 años	117,400 (27,400-149,000)	38,300 (8,400-49,700)
Atención en salas ERA (Enfermedad Respiratoria Aguda)	< 5 años	227,600 (53,200-288,900)	74,200 (16,300-96,400)
Atención en unidades de cuidados intensivos	< 5 años	16,900 (3,900-21,400)	5,500 (1,200-7,100)
Síntomas respiratorios	< 5 años	1,686,000 (393,700-2,140,000)	550,000 (121,000-714,000)

<sup>1</sup>Los valores entre paréntesis representan el intervalo de confianza del valor, este se estimó a partir de los intervalos de confianza de los RR correspondientes.

La carga de enfermedad corresponde al número de casos atribuibles a la contaminación bajo el escenario tendencial durante el periodo de análisis. Esto corresponde al número máximo de casos evitables. Puede observarse una reducción en la morbilidad cercana al 32%; una reducción en la mortalidad infantil del orden del 40% y una reducción del 28% en la mortalidad en adultos mayores de 30 años. La estimación de casos potencialmente evitados para cada año de análisis del plan (2010-2020) se presenta en el Anexo 4.8.

Según estos resultados la población infantil (menores de 5 años) recibe beneficios muy importantes en salud por la reducción de los niveles de PM<sub>10</sub> en la ciudad. Cerca del 72% de los casos evitados en hospitalización corresponde a niños menores de 5 años. La reducción propuesta por el plan de descontaminación representaría una reducción cercana a las 27,500 hospitalizaciones por causas respiratorias en niños, 74,200 atenciones en salas ERA y alrededor de 5,500 casos evitados en Unidad de Cuidados Intensivos. Adicionalmente, 1,500 casos potencialmente evitables de mortalidad en niños.

En adultos (población mayor a 30 años de edad), los beneficios de la implementación del plan representan alrededor de 13,700 muertes evitadas, más de 38,300 casos de atención en urgencias evitados y alrededor de 10,900 casos evitados en admisiones hospitalarias por causas respiratorias.

## 6. ESTIMACIÓN DE COSTOS

En el Anexo 4.9 se presentan los costos detallados que se utilizaron para realizar la valoración de los costos de tratamiento, vale la pena resaltar los siguientes puntos:

- En las salas ERA se atiende el 90% de los casos que llegan a las salas de urgencia, con un costo por usuario siete veces menor. Según lo anterior, las salas ERA son una alternativa altamente costo-efectiva para la atención de los pacientes.
- El tiempo de hospitalización promedio por causas respiratorias es de 5 días. La incapacidad corresponde a 10 días. Para causas cardiovasculares el tiempo de hospitalización promedio es de 5.5 días y 11 días de incapacidad (AHA, 2008).
- Una consulta en sala de urgencias implica en promedio la pérdida de 1 día laboral por el tiempo de atención y 3 días adicionales de incapacidad.
- En salas ERA el tiempo laboral perdido por el tiempo de atención es de medio día. Se genera en promedio una incapacidad de 1.5 días.
- En unidad de cuidados intensivos el tiempo de atención es de 8 días promedio y la incapacidad es de 24 días en promedio.
- Los síntomas respiratorios asociados con la enfermedad respiratoria aguda generan un tiempo de incapacidad de 3 días en promedio, siendo una aproximación más conservadora que los 7 días sugeridos por el Instituto de Seguridad Social (ISS, 1998).

En la Tabla 4.4 se presentan los valores unitarios calculados para los efectos seleccionados. Para obtener el rango de evaluación se buscó identificar para cada efecto los valores de COI y WTP. De manera consistente con lo esperado, se tiene que, para un mismo efecto los valores de WTP son mayores que los de COI. La información disponible no permitió identificar diferencias en los costos entre grupos etáreos.

**Tabla 4.4.** Valores unitarios (miles de pesos de 2009)

Efecto	C.A.	PP	COI	WTP	WTP/COI
VSL	---	---	---	1,008,000	---
Admisiones hospitalarias: causas respiratorias	1,290	470	1,760	4,000	2.27
Admisiones hospitalarias: causas cardiovasculares	1,370	520	1,890	4,600	2.43
Atención en urgencias: causas respiratorias	310	130	440	670	1.52
Atención en salas ERA	50	60	110	---	---
Atención en unidad de cuidados intensivos	6,600	1,000	7,600	---	---
Síntomas respiratorios (menores de 5 años)	---	95	95	400	4.21

C.A: Costos de atención. PP: Pérdida de productividad. COI: Costos de enfermedad (corresponde a la suma de C.A.+PP). WTP: Disponibilidad a pagar. WTP/COI: Relación entre WTP y COI.

En la Tabla 4.5 se presentan los valores de pérdida de productividad y costos de atención para los efectos en morbilidad. Puede observarse que para los efectos evaluados los costos de atención son mayores que los asociados la pérdida de productividad (con excepción de la atención en Salas ERA). El resultado obtenido para las salas ERA permite verificar su consolidación como alternativa de atención costo-eficiente para la atención de los niños con bronquiolitis. En ausencia de las salas ERA estos casos serían atendidos en salas de urgencias con un mayor costo.



El impacto en la población infantil es importante también en términos económicos: más del 70% de los costos evitados asociados a la pérdida de productividad (88,000 millones de peso) se atribuye a los días perdidos por la enfermedad del niño que obliga a los padres a quedarse cuidándolo. En el caso de los costos de atención más del 70% de los beneficios (77,500 millones de pesos) corresponden a la valoración de los casos de hospitalización y atención en unidades de cuidados intensivos para niños menores a 5 años.

**Tabla 4.5.** Costos de atención y pérdida de productividad para los casos potencialmente evitados por el PDDb (millones de pesos de 2009<sup>a</sup>).

Efecto	Edad	CA (IC 95%) <sup>b</sup>	PP (IC 95%) <sup>b</sup>
Admisiones hospitalarias: causas respiratorias	< 5 años	35,500 (7,800-46,000)	13,000 (2,900-16,900)
Admisiones hospitalarias: causas respiratorias	> 5 años	14,100 (3,100-18,300)	5,200 (1,100-6,700)
Admisiones hospitalarias: causas cardiovasculares	Toda	4,500 (2,200-6,700)	1,700 (900-2,500)
Atención en urgencias: causas respiratorias	< 5 años	2,500 (600-3,300)	1,000 (200-2,000)
Atención en urgencias: causas respiratorias	> 5 años	11,800 (2,600-15,300)	4,800 (1,100-6,300)
Atención en salas ERA	< 5 años	3,300 (700-4,300)	4,700 (1,000-6,100)
Atención en unidad de cuidados intensivos: causas respiratorias	< 5 años	36,200 (8,000-47,100)	5,600 (1,200-7,200)
Síntomas respiratorios	< 5 años	---	52,000 (11,400-67,500)
Total		107,900 (25,000-141,000)	88,000 (19,800-115,200)

<sup>a</sup> Usando tasa de descuento de 0%. <sup>b</sup> El intervalo de confianza corresponde específicamente al estimado para el RR en el estudio epidemiológico. CA: Costos de atención. PP: Pérdida de productividad. ERA: Enfermedad respiratoria aguda.

En la Tabla 4.6 se realiza la comparación de la valoración económica de la morbilidad mediante COI y WTP. Los resultados muestran que la valoración mediante WTP arroja valores superiores a la valoración mediante COI. Aunque esperado, se resalta esto debido a que los valores de WTP fueron estimados mediante transferencia de beneficios. Los beneficios en morbilidad usando WTP superan los 400,000 millones de pesos frente a la estimación de 195,000 millones mediante la evaluación de los costos de enfermedad. Debe tenerse en cuenta que no se cuenta con valores de WTP para todos los efectos, por lo cual es de esperarse que la valoración total mediante WTP sea mayor que la estimada en este estudio.

En la Tabla 4.7 se presentan los costos en morbilidad por grupos de edades usando datos de disponibilidad a pagar. Para los efectos evaluados más del 80% de los beneficios se presenta en menores de 5 años. La alta sensibilidad a la contaminación atmosférica determina que las reducciones obtenidas por la implementación del PDDb representen beneficios significativos para este grupo etáreo.

**Tabla 4.6.** Valoración de los beneficios en morbilidad del PDDB (millones de pesos de 2009<sup>a</sup>).

Efecto	Edad	COI (IC 95%) <sup>b</sup>	WTP (IC 95%) <sup>b</sup>
Admisiones hospitalarias: causas respiratorias	< 5 años	48,500 (10,600-62,900)	109,900 (24,200-142.800)
Admisiones hospitalarias: causas respiratorias	> 5 años	19,200 (4,200-25,000)	43,600 (9,600-56,600)
Admisiones hospitalarias: causas cardiovasculares	Toda	6,100 (3,100-10,000)	14,900 (7,500-22,300)
Atención en urgencias: causas respiratorias	< 5 años	3,600 (800-5,300)	5,300 (1,200-7,200)
Atención en urgencias: causas respiratorias	> 5 años	16,600 (3,700-21,600)	25,700 (5,700-33,400)
Atención en salas ERA	< 5 años	8,000 (1,800-10,400)	---
Atención en unidad de cuidados intensivos: causas respiratorias	< 5 años	41,800 (9,200-54,300)	---
Síntomas respiratorios	< 5 años	52,000 (11,400-67,500)	222,000 (48,800-288,300)
Total		195.800 (44,800-257,000)	421,400 (97,000-550,600)

<sup>a</sup> Usando tasa de descuento de 0%. <sup>b</sup> El intervalo de confianza corresponde específicamente al estimado para el RR en el estudio epidemiológico. COI: Costos de enfermedad. WTP: Disponibilidad a pagar. ERA: Enfermedad respiratoria aguda.

**Tabla 4.7.** Valoración de los beneficios en morbilidad por grupos de edades (millones de pesos de 2009<sup>a</sup>).

Población	Beneficio económico (IC 95%) <sup>b</sup>
Infantil (< 5 años)	340,000 (74,000-440.000)
Mayores de 5 años	80,000 (23,000-110,000)
Total	420,000 (97,000-550,000)

<sup>a</sup> Valoración usando disponibilidad a pagar y tasa de descuento de 0%. <sup>b</sup> El intervalo de confianza corresponde específicamente al estimado para el RR en el estudio epidemiológico.

En la Tabla 4.8 se consigna la valoración de los casos potencialmente evitados en mortalidad. Los beneficios económicos por reducción en la mortalidad pueden alcanzar los 15.3 billones de pesos. Estos representan el mayor componente de los beneficios del plan, puede decirse que la reducción en la mortalidad es el principal beneficio del plan.

En la Tabla 4.9 se presentan los beneficios totales del plan (morbilidad y mortalidad). Usando disponibilidad a pagar, los costos potencialmente evitados en morbilidad se estiman en cerca de 470,000 millones de pesos. Los costos evitados en mortalidad son superiores a 15 billones de pesos. El beneficio económico por mejoras en la salud derivado de la implementación del plan se estima en 15.8 billones de pesos.

**Tabla 4.8.** Valoración de los beneficios en mortalidad del PDDB (millones de pesos de 2009<sup>a</sup>)

Efecto	Edad	Beneficio económico (IC 95%) <sup>b</sup>
Mortalidad por exposición crónica	> 30 años	13,860,000 (4,740,000-24,700,000)
Mortalidad infantil	< 5 años	1,490,0 00 (550,000-2,380,000)
Total		15,350,000 (5,290,000-27,080,000)

<sup>a</sup> Usando tasa de descuento de 0%. <sup>b</sup> El intervalo de confianza corresponde específicamente al estimado para el RR en el estudio epidemiológico

**Tabla 4.9.** Resumen de beneficios por la implementación del PDDB (millones de pesos de 2009<sup>a</sup>)

Efecto	Beneficio económico (IC 95%) <sup>b</sup>
Morbilidad	470,000 (110,000-610,000)
Mortalidad	15,350,000 (5,290,000-27,080,000)
Total	15,820,000 (5,400,000-27,690,000)

<sup>a</sup> Usando tasa de descuento de 0%. <sup>b</sup> El intervalo de confianza corresponde específicamente al estimado para el RR en el estudio epidemiológico. <sup>c</sup> Valoración usando disponibilidad a pagar. Para atención en salas ERA y en unidad de cuidados intensivos se utilizó COI.

Teniendo en cuenta que los costos de implementación del plan se estiman en cerca de 1.7 billones de pesos la relación beneficio costo del PDDB es cercana a 9. Esto es un indicador de los réditos de la inversión en mejoramiento ambiental.

## 7. VALORACIÓN USANDO TASA DE DESCUENTO

Los resultados de la valoración usando tasa de descuento para conocer el valor presente de los beneficios y costos se presentan en la Tabla 4.10. Debe destacarse que en todos los escenarios contemplados se presenta una relación beneficio/costo significativa. Adicionalmente debe considerarse que debido a las características de los beneficios en salud, estos continuarán presentándose aún después del periodo de análisis del plan (2010-2020) y por lo tanto podría presentarse una relación beneficio/costo superior a la reportada en este informe.

**Tabla 4.10.** Análisis beneficio/costo usando diferentes tasas de descuento (millones de pesos de 2009).

Resumen de evaluación	PC	TD1	TD2	TD3
Tasa de descuento*	0.0%	3.0%	Variable	12.0%
Beneficios en salud (VPN)**	15,825,000	15,950,000	15,067,000	8,017,000
Costos de implementación (VPN)**	1,690,000	1,700,000	1,611,000	972,000
Relación B/C	9.4	9.4	9.4	8.2

\* En el análisis de los cuatro escenarios, la tasa de descuento utilizada para determinar el valor presente neto de beneficios se usó para la proyección de costos. \*\*Valor presente neto en millones de pesos (precios constantes 2009). PC: Escenario de valoración usando precios constantes. TD1: Tasa de descuento de 3.0% acorde a lo sugerido por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2002) y en conformidad a lo usado por Larsen (2004). TD2: Tasa de descuento variable y decreciente en el tiempo (4.38 – 3.49 para un periodo de 10 años) acorde a Saavedra (2009). TD3: Tasa de descuento del 12% el valor coincide con el utilizado por el Departamento de Planeación Nacional para proyectos de inversión social (Correa, 2008) y es el mismo utilizado en la evaluación plan de descontaminación de Santiago de Chile (Sánchez, 1998) y Ciudad de México (World Bank, 2002).\*\*\* Para el VPN de los costos de implementación se usaron las mismas tasas de descuento e IPC de los beneficios en salud.

## 8. CONCLUSIONES

- La valoración realizada permitió identificar que el beneficio económico de la reducción en el número de casos de morbilidad y mortalidad debido a la implementación del plan de descontaminación es cercano a 15.8 billones de pesos para el periodo 2010-2020.
- El mayor componente del costo evitado con la implementación del plan de descontaminación corresponde a la valoración de los casos evitados en mortalidad.
- Los costos evitados en morbilidad por la implementación del plan se estiman en más de 470,000 millones de pesos.
- Los resultados del presente estudio permitieron corroborar la magnitud del impacto de la contaminación atmosférica sobre la población infantil (menores de 5 años). En términos de hospitalización cerca del 72% de los casos evitados corresponde a niños menores de 5 años. La reducción propuesta por el plan de descontaminación representaría una reducción cercana a las 27,000 hospitalizaciones por causas respiratorias en niños, 74,000 atenciones en salas ERA y alrededor de 5,500 casos evitados en Unidades de Cuidados Intensivos. Adicionalmente, 1,500 casos de mortalidad potencialmente evitables.
- La implementación del plan evitaría alrededor de 13,700 muertes para el periodo 2010-2020 por exposición crónica, en la población mayor a 30 años de edad. El número de muertes evitadas al año asociadas a este efecto alcanzaría en el año 2020 alrededor de 3,000 casos evitados.
- Los resultados obtenidos muestran un alto impacto derivado de la implementación del plan de descontaminación, no solo en términos económicos sino sociales (casos de mortalidad evitados) y constituyen una razón de peso para priorizar la inversión en el control de la contaminación atmosférica en la ciudad de Bogotá.

## REFERENCIAS

American Thoracic Society. 1996. Health Effects of Outdoor Air Pollution. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 153(1): 3-50 y 153(2): 477-498.

Abbey, D. E., Mills, P. K., Petersen, F. F., & Beeson, W. L. 1993. Long-term Ambient Concentrations of Total Suspended Particulates, Ozone, and Sulfur Dioxide and Respiratory Symptoms in a nonsmoking Population. Environmental Health Perspectives.

American Heart Association (AHA). 2008. Heart Disease and Stroke Statistics-2008 Update: A Report From the American Heart Association Statistics Committee and Stroke Statistics Subcommittee. Circulation. Journal of the American Heart Association, 117(4): e25-e146.

Arigoni Ortiz, R., Markandya, A., & Hunt, A. 2009. Willingness to Pay for Mortality Risk Reduction Associated with Air Pollution in São Paulo. RBE: 3–22.

Bowland, B., & Beghin, J. 2001. Robust estimates of value of a statistical life for developing economies. Journal of Policy Modeling: 385-369.

Brouwer, R. 2000. Environmental value transfer: state of the art and future prospects. Ecological economics: 137-152.

Bustillo, A. M. 2009. Valoración del Impacto del Material Particulado en Enfermedades Asociadas con la Contaminación del Aire. Tesis de Maestría. Universidad de los Andes. Bogotá.

Clean Air for Europe (CAFE). 2005. Methodology Paper for the Cost-Benefit Analysis for CAFE. Volume 2: Health Impact Assessment. European Commission DG Environment.

Carriazo, F., Ibáñez, A. M., & García, M. 2003. Valoración de los beneficios económicos provistos por el sistema de parques nacionales naturales: una aplicación del análisis de transferencia de beneficios. Bogotá.

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. Interamerican Development Bank. Washington.

Comisión Ambiental Metropolitana. 2002. Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002 - 2010. México D.F.

Consejo Nacional de Política Económica y Social. 2005. CONPES 3344: Lineamientos para la Formulación de la Política de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica. Bogotá.

Consejo Nacional de Política Económica y Social. 2008. CONPES 3550: Lineamientos para la Formulación de la Política Integral de Salud Ambiental con Énfasis en los Componentes de Calidad del Aire, Calidad de Agua y Seguridad Química. Bogotá.

Correa, F. 2008. Tasa de descuento ambiental gamma: una aplicación para Colombia. Lecturas de Economía, 69: 141-162. Universidad de Antioquia-

Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE). 2009. Cuentas Nacionales Departamentales. Recuperado en Agosto de 2009 de:  
[http://www.dane.gov.co/index.php?option=com\\_content&task=category&sectionid=33&id=59&Itemid=241](http://www.dane.gov.co/index.php?option=com_content&task=category&sectionid=33&id=59&Itemid=241)

Dockery, D. W., Pope, C. A., Xu, X., Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., Ferris, B. G., & Speizer, F.E. 1993. An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities. The New England Journal of Medicine, 329(24): 1753-1759.

Echeverry, J. C., Ibáñez, A. M., Moya, A., & Hillón, L. C. 2005. The Economics of TransMilenio, a Mass Transit System for Bogota. Economía, 5(2): 151-196.

Environmental Protection Agency (EPA). 2003. Particle Pollution and Your Health.

Environmental Protection Agency (EPA). 2004. Air Quality Criteria for Particulate Matter. Volume II. National Center for Environmental Assessment-RTP Office. Office of Research and Development.

Environmental Protection Agency (EPA). 2004a. Value of Statical Life Analysis and Environmental Policy: A White Paper. National Center for Environmental Economics.

Environmental Protection Agency (EPA). 2004b. The Integrated Environmental Strategies Handbook: A Resource Guide for Air Quality Planning.

Fondo Monetario Internacional. 2009. Recuperado en diciembre de 2009 de:  
<http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2008/01/weodata/index.aspx>

Freeman III, A. M. 2003. *The Measurement of Environmental and Resource Values*. Washington: RFF Press book.

Gómez, M., Ponzo, J., Bruno, A., Macri, M., Bálsamo, A., Álvarez, B. 2008. Salud Ambiental. CEFA. Departamento de Medicina Preventiva y Social.

Gouveia, N., Mendonça, G. A., Ponce de Leon, A., de Menezes Correia, J. E., Junger, W. L., de Freitas, C. U., Paiva Daumas, R., Martis, L.C., Giussepe, L., Conceição G.M.S., Manerich A., & Cunha-Cruz, J. 2003. Poluição do ar e efeitos na saúde nas populações de duas grandes metrópoles brasileiras. Epidemiologia e Serviços de Saúde, 12(1): 29-40.

Griffin, R. D. 2007. Principles of Air Quality Management (2nd Ed. ed.). Taylor & Francis Group.

Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR). 2008. Definición de elementos técnicos para la formulación de políticas distritales encaminadas al mejoramiento de la calidad del aire en Bogotá. Universidad de los Andes, Bogotá.

Guh, S., et al. 2008. Comparison of cost-of-illness with willingness-to-pay estimates to avoid shigellosis: evidence from China. Health Policy and Planning 2008; 23:125–136

Hammit, J., & Ibarán, M. 2002. Estimating the economic value of reducing health risks by improving air quality in Mexico City. Obtenido de Massachusetts Institute of Technology. Recuperado de: [http://mce2.org/newsletter/nwsltr\\_2/english/econvalue.htm](http://mce2.org/newsletter/nwsltr_2/english/econvalue.htm)

Hernandez, L.J., 2009. Asociación entre la Contaminación el Aire y la Morbilidad por Enfermedad Respiratoria Aguda en Menores de 5 Años en Tres Localidades de Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. Programa de Doctorado en Salud Pública. Tesis Doctoral

Ibáñez, A. M. 2003. Benefits and Costs of Environmental Policy in Colombia: A Review of Valuation Studies. Bogotá.

Ibáñez, A. M., & McConnell, K. 2001. Valuing Morbidity: Acute Respiratory Illnesses in Bogota, Colombia. Draft. Department of Agricultural and Resource Economics. University of Maryland. College Park. Paper prepared for AERE Workshop.

Ibáñez, A. M., & Uribe, E. 2003. Medio Ambiente y Desarrollo Económico: priorización de la inversión ambiental con criterios económicos. Documentos CEDE. Número 33., Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). 2007. Informe Anual sobre el Estado del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables en Colombia: Calidad del Aire. Bogotá.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2005. Documento Soporte Norma de Calidad del Aire.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2005. Evaluación Económica de los Beneficios y Costos de la Política y las Normas de Calidad de Aire en Colombia. Anexo 2. Bogotá.

Instituto de Seguridad Social (ISS), Asociación Colombiana de Facultades de Medicina (ASCOFAME). 1998. Guías de Práctica Clínica Basadas en la Evidencia. Infección Respiratoria Aguda.

Instituto Nacional de Ecología, Instituto Nacional de Salud. 2003. The Local Benefits of Global Air Pollution Control in Mexico City. Final Report of the Second Phase of the Integrated Environmental Strategies Program in Mexico, México D.F.

Krewski, D., Burnett, R. T., Goldberg, M. S., Hoover, K., Siemiatycki, J., Abrahamowicz, M., & White, W. H. 2000. Reanalysis of the Harvard Six Cities Study and the American Cancer Society Study of Particulate Air Pollution and Mortality. Special Report, Health Effects Institute, Cambridge.

Künzli, N., & Pérez, L. 2007. Los Beneficios para la Salud Pública de la Reducción de la Contaminación Atmosférica en el Área Metropolitana de Barcelona. CREAL, Barcelona.

Larsen, B. 2004. Cost of Environmental Damage: A Socio-Economic and Environmental Health Risk Assessment. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), Bogotá.

Le Tertre, A., et al., 2002. Short-term effects of particulate air pollution on cardiovascular diseases in *eight European cities*. J Epidemiology Community Health. **56** (10): p. 773-779.

Liao, L., Jollis, J. G., Anstrom, K. J., Whellan, D. J., Kitzman, D. W., Aurigemma, G. P., Marck, D. B., Schulman, K. A., & Gottdiener, J.S. 2006. Costs for Heart Failure With Normal vs Reduced Ejection Fraction. Arch Intern Med, 166: 112-118.

Lipfert, F. W., Perry, H. M., Miller, J. P., Baty, J. D., Wyzga, R. E., & Carmody, S. E. 2000. The Washington University-EPRI Veterans Cohort Mortality Study: Preliminary Results. Inhalation Toxicology, 12: 41-73.

Llorca, J., Fariñas-Álvarez, C., & Delgado-Rodríguez, M. 2001. Fracción atribuible poblacional: cálculo e interpretación. Gaceta Sanitaria, 15(1): 61-67.



Lozano, N. 2004. A Concentration-Response Approach for Air Pollution in Bogota. Desarrollo y Sociedad. Facultad de Economía. Universidad de los Andes, ISSN 1900-7760 (54): 133-177.

Mendieta, J.C. 2005. Manual de valoración económica de bienes no mercadeables. Documento CEDE. Centro de estudios sobre desarrollo económico. Facultad de economía. Universidad de los Andes.

Miller, B., & Hurley, J. 2002. Life table methods for quantitative impact assessments in chronic mortality. *Journal of Epidemiology and Community Health* , 200-206.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). 2008. Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire. Manual para la Elaboración de Planes de Gestión de la Calidad del Aire. Contrato FONADE 2062438, Bogotá.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). 2003. Metodologías para la Valoración Económica de Bienes, Servicios Ambientales y Recursos Naturales.

Ministerio de la Protección Social (MPS). 2009. Encuesta Nacional de Salud 2007. Resultados Nacionales. Bogotá.

Ministerio de la Protección Social (MPS). 2009. Encuesta Nacional de Salud 2007. Resultados Departamentales: Bogotá. Bogotá.

Ministerio de la Protección Social (MPS). 2006. Sistema de Vigilancia en Salud Pública. Modelo General. Bogotá: Presentación con diapositivas.

Muñoz, N., & Behrentz, E. 2009. Compilación y Análisis de Datos Epidemiológicos en Bogotá. Tesis de Grado de Maestría, Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil & Ambiental, Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana Regional (SUR), Bogotá.

Organización Mundial de la Salud (OMS). 2005. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización Mundial 2005.

Organización Panamericana de la Salud (OPS). 2009. Análisis del Perfil de Salud Urbana en Bogotá. Colombia.

Organización Panamericana de la Salud (OPS). 2005. Evaluación de los Efectos de la Contaminación del Aire en la Salud de América Latina y el Caribe. Organización Mundial de la Salud, Área de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental, Washington D.C.

Ostro, B. 1996. A Methodology for Estimating Air Pollution Health Effects. Geneva: Office of Global and Integrated Environmental Health, World Health Organization.

Ostro, B., Sánchez, J. M., Aranda, C., & Eskeland, G. 1995. Air Pollution and Mortality: Results from a Study of Santiago, Chile. The World Bank, Policy Research Department, Public Economic Division, Policy Research Working Paper 1453.

Pattanayak, S., Wing, J., Depro, B., & Van Houtven, G. 2002. International Health Benefits Transfer Application Tool: the use of PPP and Inflation Indices.

- Pope, C. A., Ezzati, M., & Dockery, D. W. 2009. Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States. *New England Journal of Medicine*, 360(4): 376-386.
- Pope, C. I., Burnett, R., & Thun, M. (2002). Lung Cancer, Cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Journal of the American Medical Association*, (287): 1132-1141.
- Pope, C. A., Thun, M. J., Namboodiri, M. M., Dockery, D. W., Evans, J. S., Speizer, F. E., & Heath, C. W. 1995. Particulate Air Pollution as a Predictor of Mortality in a Prospective Study of U.S. Adults. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 151: 669-674.
- Ready, R., & Navrud, S. 2006. *International benefit transfer: Methods and validity tests*. Elsevier.
- Röösli, M., Künzli, N., Braun-Fahrländer, C., & Egger, M. 2005. Years of life lost attributable to air pollution in Switzerland: dynamic exposure-response model. *International Journal of Epidemiology*, 1029-1035.
- Saavedra, S. 2009. Estimación de una tasa social de descuento ambiental para Colombia. Memoria de grado; pregrado en Economía. Facultad de Economía. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.
- Sánchez, J. M., Ostro, B., & Valdés, S. 1998. Estimación de los Beneficios en Salud del Plan de Descontaminación de Santiago. Santiago de Chile, CONAMA.
- Sánchez, J. M., Ostro, B., & Valdés, S. 1998a. Los Efectos en Salud de la Contaminación Atmosférica por PM10 en Santiago. Santiago de Chile, CONAMA.
- Solarte, I. 1999. Contaminación Atmosférica y Enfermedad Respiratoria en niños menores de 14 años en Santa Fe de Bogotá. Universidad Javeriana, Bogotá.
- Villeneuve, P. J., Goldberg, M. S., Krewski, D., Burnett, R. T., & Chen, Y. 2002. Fine Particulate Air Pollution and All-Cause Mortality within the Harvard Six-Cities Study: Variations in Risk by Period of Exposure. *Annals of Epidemiology*, 12(8): 568-576.
- World Bank. 2002. Improving Air Quality in Metropolitan Mexico City: An Economic Valuation. Policy Research Working Paper 2785, Latin America and Caribbean Environment Department, World Bank, Environmentally and Socially Sustainable Development Sector Unit, México D.F
- World Health Organization. 2002. *The World Health Report 2002: Reducing Risks, Promoting Healthy Life*. Geneva. Switzerland.

**PLAN DECENAL DE DESCONTAMINACIÓN DE BOGOTÁ**  
**PARTE B - DOCUMENTO DE TRABAJO**

**SECCIÓN 5 – INDICADORES DE CALIDAD DEL AIRE**

## TABLA DE CONTENIDO

1. ASPECTOS GENERALES.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
3. INDICADORES DE CALIDAD DEL AIRE.....	3
4. CALIDAD DE LA INFORMACIÓN DE LA RMCAB.....	6
5. INDICADORES PROPUESTOS .....	9
5.1. Indicador Global .....	9
5.2. Indicador Local .....	15
6. EJEMPLO DE EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES .....	16
6.1 Resultados para PM <sub>10</sub> .....	16
6.1.1 Indicador Global.....	17
6.1.2 Indicador Local .....	18
7. UTILIDAD DEL MÉTODO DE COMPONENTES PRINCIPALES .....	20
8. REFERENCIAS .....	20

ANEXO 5.1. Porcentaje de datos válidos en redes de monitoreo de calidad del aire en ciudades latinoamericanas.

ANEXO 5.2. Descripción del análisis de componentes principales y propuesta para evaluar el desempeño de la RMCAB.

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1. Normativa de calidad del aire en diferentes regiones del mundo.....	3
Tabla 5.2. Indicadores de calidad del aire utilizados en Estados Unidos y Europa.....	4
Tabla 5.3. Porcentaje de datos validos reportados por la RMCAB para PM <sub>10</sub> (1997-2008). ..	6
Tabla 5.4. Porcentaje de datos validos reportados por la RMCAB para O <sub>3</sub> (1997-2008). .....	7
Tabla 5.5. Número de estaciones de la RMCAB utilizadas para los análisis de indicadores. 8	
Tabla 5.6. Participación porcentual de las estaciones en la concentración de PM10 (2008). .....	20

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.2. T <sup>2</sup> y valor de referencia asignado para el indicador. ....	14
Figura 5.3. Indicador local (datos Estación de Fontibón para el año 2008). ....	15
Figura 5.4. Ejemplo de resultados para T <sup>2</sup> (PM <sub>10</sub> en el año 2008 - referencia con respecto a la norma de 24 horas). ....	16
Figura 5.5. Promedios anuales de T <sup>2</sup> con respecto a la referencia (norma anual PM <sub>10</sub> ). ....	17
Figura 5.7. Indicador global de PM <sub>10</sub> con respecto a la norma de corta duración. ....	17
Figura 5.8. Evolución del indicador local - Estación Puente Aranda. ....	18
Figura 5.9. Evolución del indicador local - Estación Carrefour.....	19

## **1. ASPECTOS GENERALES**

Este documento constituye la Sección 5 (Indicadores de Calidad del Aire para el Plan Decenal de Descontaminación de Bogotá). Dicho estudio se desarrolló en el marco del Contrato de Ciencia y Tecnología Número 1040 de 2008; celebrado entre la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), Transmilenio S.A. (TMSA) y la Universidad de los Andes.

En esta sección se presentan los indicadores de calidad del aire que se proponen a la SDA para hacer seguimiento al plan de descontaminación, junto con la metodología de desarrollo de dichos indicadores.

## **2. INTRODUCCIÓN**

Se encuentra ampliamente documentado que la contaminación atmosférica presente en los centros urbanos tiene efectos importantes sobre la salud de la población, especialmente de ancianos y niños, pues afecta los sistemas respiratorio y cardiovascular (Pope et al., 2008; Dockery et al., 2007). Para el caso específico de Bogotá, el deterioro de la calidad del aire está relacionado directamente con el acelerado crecimiento económico durante los últimos 10 años.

Con el fin de hacer un seguimiento a esta situación, Bogotá cuenta con la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire (RMCAB) que permite obtener registros de la concentración de diferentes contaminantes y de variables meteorológicas en tiempo real. El fin último de la RMCAB es apoyar el proceso de toma de decisiones referentes a la implementación de medidas encaminadas al mejoramiento de la calidad del aire y sus implicaciones en la calidad de vida de los residentes de la ciudad.

El objetivo de esta parte del trabajo fue desarrollar un conjunto de indicadores que permitan entender la efectividad del Plan Decenal de Descontaminación de Bogotá, en términos de las concentraciones de los diferentes contaminantes del aire que se pueden encontrar en la atmósfera de la ciudad.

Los indicadores en referencia se sugieren como un mecanismo de seguimiento en el tiempo del PDDB, a partir de análisis que sean más sofisticados que el simple cálculo de un promedio de las concentraciones observadas en las diferentes estaciones que conforman a la RMCAB así como a través de una herramienta estadística que permita aprovechar la gran cantidad de datos disponibles pero otorgando a los mismos el nivel de significancia y representatividad que les corresponde.

NOTA: En el Anexo 5.2 se presenta una descripción detallada del análisis de componentes principales y de la propuesta para evaluar el desempeño de la RMCAB.

### 3. INDICADORES DE CALIDAD DEL AIRE

La calidad del aire se evalúa comparando los registros medidos en campo por medio de las estaciones de monitoreo con los valores establecidos en la normativa ambiental. La Tabla 5.1 presenta los valores límite para diferentes regiones del mundo para PM<sub>10</sub> y O<sub>3</sub>.

**Tabla 5.1.** Normativa de calidad del aire en diferentes regiones del mundo.

	Tiempo de excedencia	Colombia	Santiago de Chile	México	Reino Unido	Estados Unidos	Unión Europea	OMS
Ozono (ppm)	8 horas	0.041	0.061	-	0.050	0.075	0.06	0.050
	1 hora	0.061	-	0.11	-	0.12		-
PM <sub>10</sub> (µg m <sup>-3</sup> )	1 año	60	50	50	40	-	40	20
	24 horas	150	150	150	50	150	50	50
Entidad reguladora		MAVDT	CONAMA	SERMANAT	DEFRA	EPA	EEA	OMS

MAVDT: Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; CONAMA: Comisión Nacional del Medio Ambiente; SERMANAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; DEFRA: Department for Environment, Food and Rural Affairs in partnership with the Scottish Executive, Welsh Assembly Government; EPA: U.S. Environmental Protection Agency; EEA: European Environment Agency; OMS: Organización Mundial de la Salud.

Los indicadores de calidad del aire más utilizados se basan en promedios para diferentes intervalos de tiempo (una hora, ocho horas y 24 horas) así como en el porcentaje del tiempo de excedencia de los límites normativos. También es posible utilizar la exposición de la población a concentraciones de contaminantes que sean nocivos para la salud. A continuación se presentan de forma breve los indicadores más utilizados en entidades ambientales de diferentes lugares del mundo.

En el caso particular de los Estados Unidos, la EPA define un indicador denominado el Índice de Calidad del Aire (AQI). El AQI se utiliza para evaluar la peligrosidad de la contaminación en relación con sus efectos nocivos para la salud. Este índice según la Ecuación 5.1.

$$I_p = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_p - BP_{Lo}) + I_{Lo} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

donde  $I_p$  es el índice del contaminante  $p$ ;  $C_p$  es la concentración del contaminante  $p$ ;  $BP_{Hi}$  es el punto de quiebre que es mayor o igual a  $C_p$ ;  $BP_{Lo}$  es el punto de quiebre que es menor o igual a  $C_p$ ;  $I_{Hi}$  es el valor AQI correspondiente a  $BP_{Hi}$ ;  $I_{Lo}$  es el valor AQI correspondiente a  $BP_{Lo}$ . Este índice puede variar de 0 a 500. Un valor de AQI igual a 100 corresponde a concentraciones equivalentes al límite normativo. Los índices mayores a 100 corresponden a condiciones perjudiciales para la salud y los índices menores a 100 hacen referencia a un estado satisfactorio en la calidad del aire.

Comúnmente, el AQI se evalúa utilizando categorías como: calidad del aire *buena*, *moderada*, *perjudicial para población sensible*, *perjudicial*, *muy perjudicial* y *peligrosa* (EPA, 2009).

La agencia de control de la contaminación de la costa sur occidental de los Estados Unidos (AQMD: South Air Quality Management District) utiliza un indicador que se basa en la exposición per cápita a niveles de contaminantes que superan la norma federal.



Adicionalmente, utilizan las tendencias de concentraciones anuales máximas promedio de material particulado para evaluar la variación de la contaminación en el tiempo. El AQMD clasifica la contaminación utilizando las siguientes categorías: *moderado, serio, severo y extremo*; donde sobrepasar el nivel *moderado* equivale a concentraciones mayores a los límites normativos (AQMD, 2007).

En el Reino Unido los indicadores evalúan la calidad del aire de manera separada para cada contaminante. La evaluación utiliza las categorías *baja, moderada, alta y muy alta*; donde la contaminación *baja* corresponde a concentraciones de contaminantes que se encuentran por debajo de los estándares normativos (ver Tabla 5.1). Adicionalmente, se evalúa el cambio en el tiempo mediante dos indicadores. El primero muestra el promedio de los valores máximos de concentraciones de promedios móviles de 8 horas para O<sub>3</sub> y concentraciones de promedios anuales para PM. El segundo indicador se basa en el número de días en promedio para cada estación en el que los niveles de contaminación se encuentran por encima del nivel denominado como moderado. Una contaminación moderada, en este caso, hace referencia niveles de contaminantes para los cuales la población sensible puede sufrir efectos perjudiciales para su salud (Bower et. al., 2007).

Por otra parte, la Agencia Ambiental Europea utiliza estadísticas de la concentración de contaminantes obtenidas a partir de información horaria, promedios diarios (24 horas), promedios de 8 horas y valores máximos de los promedios de 8 horas. Además, se evalúan las excedencias a la norma en diferentes periodos de tiempo (horas o días). Adicionalmente, utilizan un indicador que muestra la fracción de población potencialmente expuesta a niveles de contaminación mayores a los permitidos (ETC/ACC, 2009) (ver Tabla 5.1). En la Tabla 5.2 se presenta un resumen de los indicadores mencionados anteriormente.

**Tabla 5.2.** Indicadores de calidad del aire utilizados en Estados Unidos y Europa.

	Indicadores más comunes	Referencia al nivel de contaminación
EPA	Porcentaje del tiempo de excedencia de la norma, el segundo promedio de 8 horas más alto del año.	Buena, moderada, perjudicial para población sensible, perjudicial, muy perjudicial y peligrosa
AQMD	Exposición per cápita a niveles de contaminantes que superan la norma federal, concentraciones anuales máximas.	Moderado, serio, severo y extremo
DEFRA	Promedio de las concentraciones máximas, número de días en promedio de violación de la norma	Baja, moderada, alta y muy alta
EEA	Promedios anuales, valores máximos de promedios de 8 horas, número de horas o días en que se excedencia la norma.	Baja, moderada, alta y muy alta

Diversos países latinoamericanos evalúan la calidad del aire por medio de valores de concentración máxima registrados y del número de días al año en los cuales se supera la norma. En Santiago de Chile y México se hace uso del AQI de la EPA, modificando los rangos de aceptabilidad. Para el caso de Bogotá, la contaminación causada por PM<sub>10</sub> se ha evaluado usando promedios diarios y anuales y más recientemente a través del denominado Índice Porcentual de Excedencias (IPE) (Gaitan et al., 2007).

El IPE es un conteo de las excedencias a la norma en un periodo de tiempo que se calcula a partir de los promedios diarios de los datos reales y utilizando la norma de calidad del aire para Bogotá (ver Ecuación 5.2).

$$IPE = \sum_i \left( \frac{N_E}{N_D} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 5.2}$$

En donde  $N_E$  es el número de veces que se excede la norma de referencia (que puede obedecer a diferentes períodos de interpolación) y  $N_D$  es el número total de datos validos en la estación (o estaciones) bajo consideración.

#### 4. CALIDAD DE LA INFORMACIÓN DE LA RMCAB

Al momento de realizar estos análisis, la RMCAB se encontraba conformada por 15 estaciones, dos de las cuales se limitan a mediciones meteorológicas. De las 13 estaciones restantes, 12 monitorean material particulado menor a 10 micras (PM<sub>10</sub>) y 11 monitorean ozono (O<sub>3</sub>).

Los análisis de la validez de las mediciones reportadas por la red durante los últimos 12 años muestran que, aunque su desempeño ha mejorado notablemente, es necesario seguir fortaleciendo los protocolos de medición y de manejo de la información. En la Tabla 5.3 se muestran los promedios de datos validos de concentración de PM<sub>10</sub> registrados en cada una de las estaciones para 11 años de operación. Es posible observar cómo en los últimos 4 años se presentan algunas estaciones que no tienen ningún registro válido durante extensos intervalos de tiempo.

**Tabla 5.3.** Porcentaje de datos validos reportados por la RMCAB para PM<sub>10</sub> (1997-2008).

Estación	Datos validos (%)											
	Años de monitoreo											
	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Bosque	28	99	89	81	80	74	51	33	43	79	87	74
Sony	30	89	92	83	92	88	88	82	72	76	91	91
Tunal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	59	78	78
IDRD	0	0	0	0	0	0	13	34	77	90	81	94
Carrefour	0	0	0	68	86	77	33	57	73	77	89	82
Escuela	0	0	0	0	55	88	86	72	79	75	0	89
Kennedy	0	0	0	0	0	0	0	0	10	75	84	91
Santo Tomas	29	96	85	80	87	80	64	74	55	73	93	79
Corpas	32	99	88	83	93	84	68	68	74	64	55	78
Puente Aranda	0	0	28	69	96	94	86	82	93	96	97	90
Cazucá	31	93	87	85	84	89	77	85	84	81	0	0
Fontibón	0	0	1	58	93	85	85	75	88	87	92	87

Una comparación de la validez de los datos de PM<sub>10</sub> de Bogotá con los de Santiago de Chile (ver Anexo 5.1) muestra que la red de Santiago de Chile se desempeña de mejor forma. Para dicha ciudad el porcentaje de datos válidos registrados en los últimos 5 años se encuentra cercano de 100% en sus siete estaciones de monitoreo. Para el caso de México y sus registros de PM<sub>10</sub> (ver Anexo 5.1), existen varias estaciones que reportan porcentajes de datos válidos inferiores al 50% en los 5 últimos años.

La información disponible en Bogotá para el O<sub>3</sub> presenta deficiencias aun más importantes (ver Tabla 5.4). En este caso es posible observar cómo en los últimos 4 años se presentan estaciones con datos inválidos por extensos períodos de tiempo.

**Tabla 5.4.** Porcentaje de datos validos reportados por la RMCAB para O<sub>3</sub> (1997-2008).

Estaciones	Datos validos (%)											
	Años de monitoreo											
	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
MAVDT	33	84	91	84	84	7	0	0	75	73	0	0
Sony	30	89	85	74	80	6	27	53	40	76	96	76
IDRD	0	0	0	0	0	0	19	90	94	76	83	98
Carrefour	0	0	0	0	0	0	0	0	3	36	0	64
Cazuca	31	85	91	80	81	9	27	0	33	0	0	11
Corpas	0	0	0	0	61	51	44	79	0	11	0	53
Puente Aranda	0	0	23	38	88	31	51	0	0	0	0	53
Fontibon	0	0	15	26	68	6	21	0	15	81	75	82
Bosque	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19
Tunal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32
Santo tomas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35

La base de datos utilizada para desarrollar los indicadores propuestos en este documento (generada a partir de los registros oficiales recolectados por la Secretaría Distrital de Ambiente) se modificó eliminando las estaciones que tuvieran un número de valores nulos igual o superior al 25% del total de datos.

En la Tabla 5.5 se muestran el número de estaciones que miden PM<sub>10</sub> y O<sub>3</sub> indicando si dichos registros superaron el filtro de calidad de información antes descrito. El número de estaciones que miden O<sub>3</sub> que quedaron después de realizar el filtro obligó a que el análisis para este contaminante se realizara basado en los registros de los últimos 5 años.

**Tabla 5.5.** Número de estaciones de la RMCAB utilizadas para los análisis de indicadores.

Año	PM <sub>10</sub>		O <sub>3</sub>	
	Estaciones antes del filtro	Estaciones después del filtro	Estaciones antes del filtro	Estaciones después del filtro
1997	5	0	3	0
1998	5	5	3	3
1999	7	5	5	3
2000	8	5	5	2
2001	9	8	6	4
2002	9	8	6	0
2003	10	5	6	0
2004	10	3	3	2
2005	11	5	6	2
2006	12	8	6	3
2007	10	9	3	3
2008	11	10	10	3

## 5. INDICADORES PROPUESTOS

Con el objetivo de hacer una evaluación efectiva del PDDB se proponen dos indicadores de seguimiento. El primer indicador es una forma de evaluar globalmente la calidad del aire, mientras que el segundo permite valorar los efectos locales. La utilización de un indicador global y uno local es útil en la medida que permite hacer un seguimiento integral de la ciudad. Lo anterior significa que la efectividad de las medidas y proyectos incluidos en el PDDB se deben reflejar en ambos indicadores: se debe cumplir la meta de descontaminación a nivel global en la ciudad pero también a nivel de cada localidad.

### 5.1. Indicador Global

El indicador global se construyó utilizando el principio de componentes principales (PCA), un método de análisis de datos no paramétrico que permite identificar patrones definidos por la correlación que encuentra entre los datos objeto de los análisis. La identificación de dichos patrones está acompañada de una reducción del espacio original de variables a un espacio más pequeño manteniendo la variabilidad original de los datos (reducción de complejidad). En general, el espacio original de variables se transforma en dos sub-espacios. El primero está definido por los componentes principales (PCS) y el segundo, denominado espacio residual (RS), por aquellos componentes no incluidos en PCS.

El PCA se ha utilizado exitosamente en una gran variedad de disciplinas, una de las cuales involucra problemas de monitoreo para la detección de fallas (Qin, 2003). Estos modelos se concentran en problemas en los cuales el comportamiento del sistema está descrito por un conjunto de sensores (v.g., estaciones) que registran información periódica. En este caso, la información suministrada por cada sensor corresponde a un proceso, y los datos entre procesos están correlacionados.

Este tipo de análisis se denominan también *análisis de procesos multivariados*, en donde el comportamiento del sistema se caracteriza mediante la evaluación y seguimiento que se hace de dos valores estadísticos: *Hottelling  $T^2$*  y *error cuadrático de predicción (SPE)* (estadística  $Q$ ). Estos índices representan la variabilidad de los registros en el espacio original y complementario respectivamente.

Puesto que  $T^2$  y SPE son complementarios, existen también índices que combinan las dos mediciones (v.g., distancia global de Mahalanobis; Qin, 2009). La derivación y definición de estos índices se presenta en la siguiente sección. Detalles adicionales sobre la derivación e implementación de PCA se pueden encontrar en Shlens (2009), Smith (2002) y Shlens (2003) y su utilización para la evaluación de la calidad del aire se puede encontrar en Koelemeijer (2006), Pires et al. (2008), Gramsch et al. (2006), Pires et al. (2009), Motallebi et al. (1990) y Statheropoulos et al. (1998).

#### 5.1.1. *Derivación de los Componentes Principales*

El PCA consiste en la construcción de un conjunto nuevo de variables compuestas que son una combinación lineal de las variables originales, llamada componentes principales. Este tipo de análisis estadístico hace posible modelar la correlación existente entre las variables de un proceso y determinar variables que tienen una mayor incidencia en la variabilidad de los datos y así poder retener esta información.

El algoritmo para realizar PCA incluye los siguientes pasos:

1. Organizar el conjunto de datos en una matriz de  $m \times n$ , donde  $m$  es el número de ensayos en cada sensor (señal) y  $n$  es el número de sensores.
2. Restar la media de la señal en cada uno de los sensores con el fin de tener una matriz de datos con media cero.
3. Calcular la matriz de covarianzas y con esto los eigenvectores de covarianza. Para esto es posible usar el método de *Singular Value Decomposition* (SVD).

### Método de SVD

Este método se utiliza para hacer cambios de base y está ampliamente relacionado con un análisis por PCA. El siguiente algoritmo presenta la forma de descomponer una matriz de registros en una “matriz de carga”  $P$  y en una “matriz de puntajes”  $T$ :

$$X = TP^T + \tilde{X} = TP^T + \tilde{T}\tilde{P}^T = [T \tilde{T}][P \tilde{P}]^T \equiv \tilde{T}\tilde{P}^T$$

donde  $\tilde{X} = \tilde{T}\tilde{P}^T$  es la matriz residual,  $\tilde{T} = [T \tilde{T}]$  y  $\tilde{P} = [P \tilde{P}]$ . Las columnas de  $\tilde{T}$  son ortogonales, entonces la matriz de covarianzas se calcula como sigue:

$$S \approx \frac{1}{N-1} X^T X = \bar{P} \bar{\Lambda} \bar{P}^T$$

donde

$$\bar{\Lambda} = \frac{1}{N-1} \bar{T}^T \bar{T} = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$$

y

$$\lambda_i = \frac{1}{N-1} t_i^T t_i \approx \text{var}\{t_i\}$$

Cuando  $N$  es grande, el “vector de puntajes”  $t_i$  es la  $i$ -ésima columna de  $\bar{T}$  y  $\lambda_i$  son los eigenvalores de la matriz de covarianzas en orden descendiente.

El subespacio de componentes principales (PCS) es  $S_p = \text{span}\{P\}$  y el subespacio residual (RS) es  $S_r = \text{span}\{\tilde{P}\}$ . Un vector de muestreo  $x$  puede ser proyectado en PCS o RS respectivamente:

$$\begin{aligned} \hat{x} &= PP^T x \equiv Cx \in S_p \\ \tilde{x} &= \tilde{P}\tilde{P}^T x = (I - PP^T)x \equiv (I - C)x \in S_r \end{aligned}$$

Como  $S_p$  y  $S_r$  son ortogonales,

$$\hat{x}^T \tilde{x} = 0$$

y

$$x = \hat{x} + \tilde{x}$$

### Índices de Detección de Falla

La detección de fallas es el primer paso que se lleva a cabo en el monitoreo de procesos multivariados. SPE y el estadístico de Hotelling  $T^2$  se usan para representar la variabilidad en el espacio residual y en el espacio definido por los componentes principales, respectivamente. Dada la naturaleza complementaria de estos dos índices, es común usar índices combinados para la detección de falla. La distancia global Mahalanobis puede ser usada como una medida combinada de la variabilidad presente en PCS y RS.

### Error Cuadrático de Predicción

El índice SPE mide la proyección de los vectores de muestreo en el espacio residual:

$$SPE = \|\tilde{x}^2\| = \|(I - PP^T)x\|^2$$

donde  $I$  es la matriz identidad,  $P$  es la matriz de coeficientes de las combinaciones lineales que generan los componentes principales y  $x$  es la matriz de registros reales. El proceso es considerado normal si:

$$SPE \leq \delta_\alpha^2$$

donde  $\delta_\alpha^2$  corresponde al límite superior de control para SPE, con un nivel de significancia  $\alpha$ . Jackson y Mudholkar desarrollaron una expresión para  $\delta_\alpha^2$ :

$$\delta_\alpha^2 = \theta_1 \left( \frac{C_\alpha \sqrt{2\theta_2 h_0^2}}{\theta_1} + 1 + \frac{\theta_2 h_0 (h_0 - 1)}{\theta_1^2} \right)^{1/h_0}$$

donde

$$\theta_i = \sum_{j=l+1}^m \lambda_j^i \quad i = 1, 2, 3$$
$$h_0 = 1 - \frac{2\theta_1 \theta_3}{3\theta_2^2}$$

$l$  es el número de componentes principales y  $C_\alpha$  es la desviación normal correspondiente al percentil superior  $1-\alpha$ . Este resultado es válido bajo las siguientes suposiciones:

- El vector de muestreo  $x$  se ajusta a una distribución normal multivariada.
- Se hace una aproximación a la distribución al derivar el límite de control, algo que es válido si  $\theta_1$  es muy grande.
- El resultado es válido sin importar el número de componentes principales retenidos en el modelo.

Una falla puede hacer que SPE sea mayor que  $\delta_\alpha^2$ , algo con lo que se puede detectar la falla.

### Estadístico Hotelling $T^2$

El estadístico Hotelling mide la variación en los componentes principales

$$T^2 = X^T P \Lambda^{-1} P^T X$$

donde  $x$  es el vector de registros reales,  $P$  es la matriz de coeficientes de las combinaciones lineales que generan los componentes principales y  $\Lambda$  son los eigenvalores de la matriz de covarianzas. Si el proceso se comporta normal y los registros siguen una distribución normal multivariada,  $T^2$  se ajusta a una distribución F con media y covarianza estimadas a partir de los registros:

$$\frac{N(N-l)}{l(N^2-1)} T^2 \sim F_{l, N-l}$$



donde  $N$  es el número de datos,  $l$  es el número de componentes principales y  $F_{l,N-l}$  es una distribución F con  $l$  y  $N - l$  grados de libertad. Para un nivel de significancia  $\alpha$ , el proceso se considera normal si:

$$T^2 \leq T_{\alpha}^2 \equiv \frac{l(N^2 - 1)}{N(N - l)} F_{l,N-l;\alpha}$$

Si se considera que la media es conocida con exactitud y que únicamente la covarianza es estimada a partir de los datos, el límite superior de  $T^2$  es:

$$T_{\alpha}^2 = \frac{l(N - 1)}{(N - l)} F_{l,N-l;\alpha}$$

La diferencia entre las dos ecuaciones anteriores es el factor  $\frac{(N+1)}{N}$ . Si el número de registros  $N$  es lo suficientemente grande que la media y la covarianza calculadas de los registros es exacta,  $T^2$  puede aproximarse a una distribución  $\chi^2$  con  $l$  grados de libertad y:

$$T_{\alpha}^2 = \chi_{l;\alpha}^2$$

### Distancia Mahalanobis

La distancia de Mahalanobis construye el índice estadístico Hotelling  $T^2$  y se define como sigue:

$$D = x^T S^{-1} x \sim \frac{m(N^2 - 1)}{N(N - m)} F_{m,N-m}$$

donde  $S$  es la covarianza de la muestra de  $x$ .

Es fácil mostrar que la distancia global de Mahalanobis es la suma de  $T^2$  en el PCS y  $T_H^2$  en el RS.  $T_H^2$  es el estadístico Hotelling  $T^2$  calculado en el espacio residual.

$$D = T^2 + T_H^2$$

En los procesos en los que  $N$  es grande la distancia global de Mahalanobis se ajusta a una distribución  $\chi^2$  con  $m$  grados de libertad.

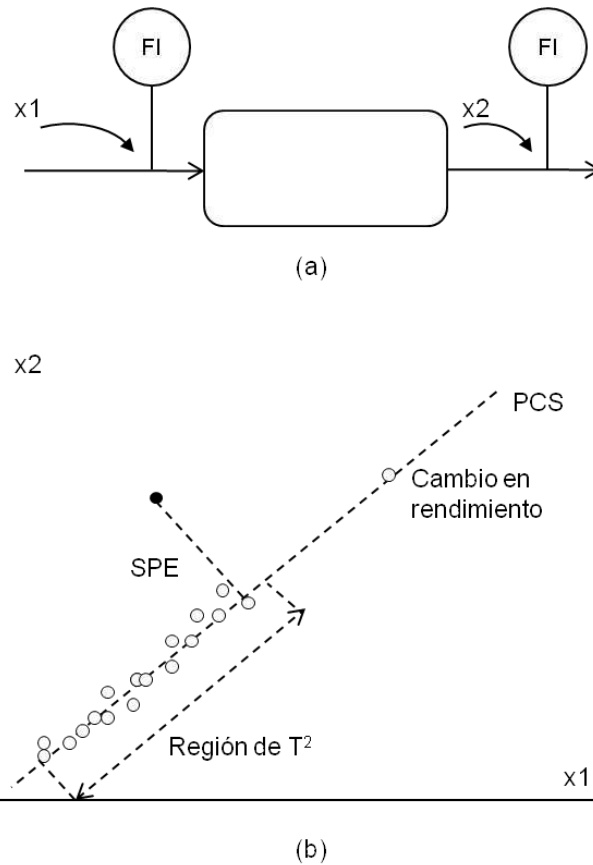
### Rol de SPE y $T^2$ en un proceso

Aunque ambas SPE y  $T^2$  se usan en procesos de monitoreo, miden diferentes situaciones del proceso y sus roles en el mismo no son simétricos. El índice SPE mide la variabilidad que rompe con la correlación normal del proceso, algo que indica una situación anormal. El índice  $T^2$  mide la distancia al origen en el subespacio del primer componente.

El uso de SPE y  $T^2$  para la detección de fallas puede explicarse mediante el ejemplo ilustrado en la Figura 5.1, en la que hay dos sensores de flujo midiendo, uno a la salida y otro a la entrada de una unidad.

El modelo PCA con un componente principal es la línea de 45°, que es el PCS. Un registro defectuoso (punto sólido negro) se desvía de la línea del modelo e incrementa el valor de SPE. Esta falla rompe el balance de masa y es detectada por SPE. Note que el índice de  $T^2$  está dentro de los límites de control.

Mientras una falla puede producir un incremento de SPE y  $T^2$ , un incremento de  $T^2$  por sí solo indica que el cambio es consistente con el modelo; puede ser solo un cambio en la región de operación. Por ejemplo, el cambio en el rendimiento del proceso mostrado en la figura producirá un incremento solamente en  $T^2$ , si ser este valor una falla. Es por esto que se considera más adecuado usar SPE y no  $T^2$  para detección de fallas.



**Figura 5.1.** (Tomado de Qin, 2003) Dos sensores de flujo midiendo el flujo de entrada y de salida de una unidad.

### 5.1.2. Interpretación del Indicador Global

El cálculo del indicador global se realizó usando el procedimiento antes descrito a través del uso de la herramienta computacional MatLab®. El indicador global propuesto describe el nivel de excedencia del indicador  $T^2$  (%) con respecto a la norma. Tal y como fue mencionado anteriormente, el indicador  $T^2$  se calcula a partir de la expresión:

$$T^2 = X^T P \Lambda^{-1} P^T X$$

Donde  $X$  es la matriz de datos [filas: mediciones; columnas - sensores (estaciones)] normalizados (media 0 y varianza 1),  $P$  es la “matriz de carga” obtenida utilizando el método de Singular Value Decomposition; y  $\Lambda$  es la matriz de correlación. Por su parte, la norma utilizada como valor de referencia fue la norma de calidad del aire establecida, por la Resolución 610 de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

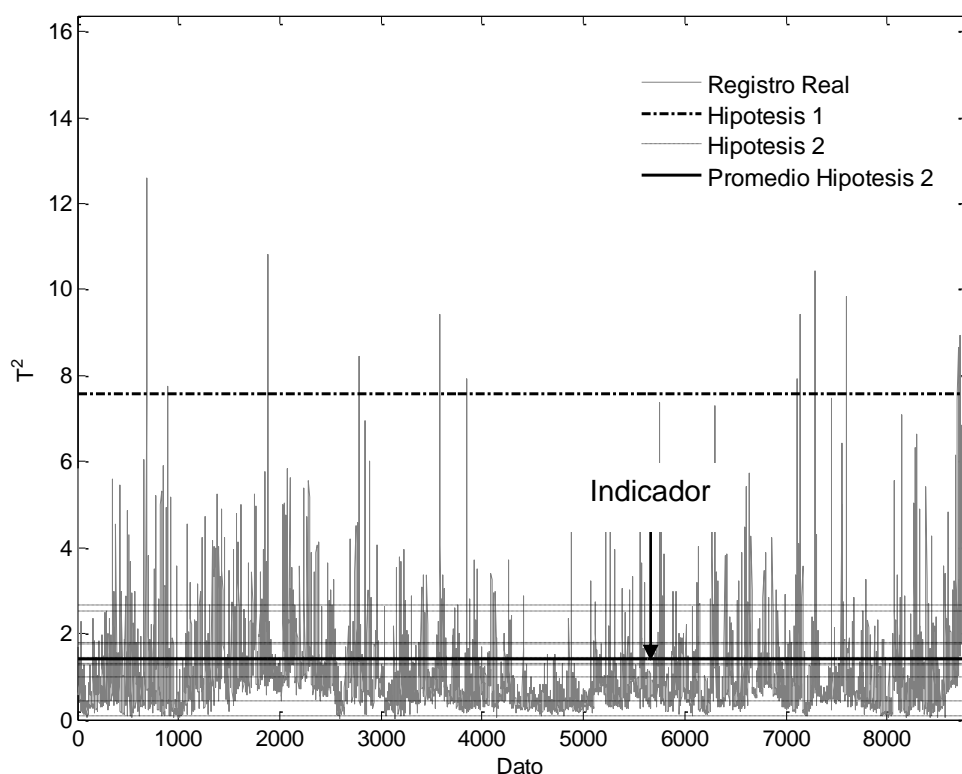
El indicador global propuesto evalúa las violaciones a la norma para periodos de excedencia de larga duración así como para periodos de corta duración. Por ejemplo, para el caso de  $PM_{10}$ , esto significa que se procesaron datos para un período de interpolación anual y dichos

resultados se compararon con el indicador resultante para la norma anual. Para este mismo contaminante se procesaron datos en períodos de interpolación diarios y se compararon con el indicador resultante para la norma diaria.

Para comparar los registros reales con las normas correspondientes se calcularon los promedios de  $T^2$  de acuerdo a sus períodos de interpolación. Para la comparación de los registros con la norma de larga duración simplemente se determina el  $T^2$  promedio de los datos válidos en la base de datos y se compara con el estadístico resultante de la norma usada como referencia (ver Figura 5.5).

El caso de los datos de corta duración es un poco más complejo pues fue necesario establecer dos hipótesis de cumplimiento de la norma correspondiente: **1)** Todas las estaciones presentes en la ciudad exceden la norma; **2)** Alguna (al menos una) estación de la red de calidad del aire está presentando excedencias a la norma. De estas dos condiciones es claro que la segunda es bastante más exigente ya que bastaría con tener una zona de la ciudad con problemas de contaminación para declararse como situación de incumplimiento de la norma.

La Figura 5.2 muestra el valor de  $T^2$  y los valores de referencia para los datos de la RMCAB del año 2008. Se observa que el valor de referencia para la primera hipótesis es mayor (e.d., menos restrictivo) que los valores de referencia obtenidos para el incumplimiento de la norma en cada una de las 12 estaciones individualmente. Con el fin de definir un valor único superior, la excedencia de  $T^2$  para la Hipótesis # 2 se evalúa sobre el promedio de los valores de referencia obtenidos para cada una de las estaciones individuales. Dicho promedio fue seleccionado como marco de referencia en lo que se refiere al cumplimiento de la norma de corta duración en la ciudad.



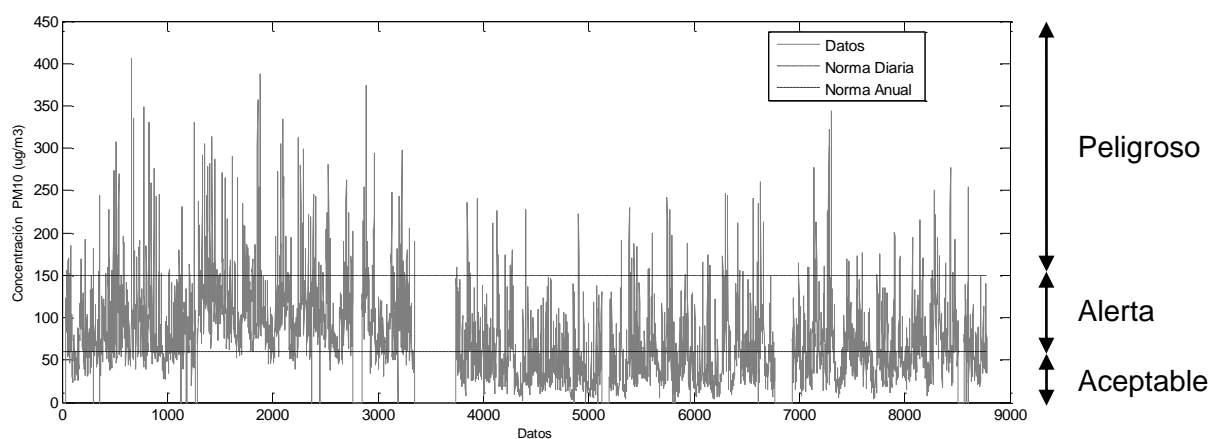
**Figura 5.2.**  $T^2$  y valor de referencia asignado para el indicador.

## 5.2. Indicador Local

El indicador local busca capturar el efecto local de la contaminación del aire en cada una de las estaciones. La evaluación de este indicador se propone realizar desde dos perspectivas: **1)** Utilizar las excedencias a la norma con base en la métrica IPE descrita en secciones anteriores, **2)** Utilizar la “intensidad normalizada” (considerando el área total bajo la curva) de excedencias horarias.

### 5.2.1. Interpretación del Indicador Local

Los valores de excedencia de corta y larga duración descritos en la sección anterior definen tres posibles rangos. Con el objetivo de facilitar la comunicación de la información a los usuarios y ciudadanos, se propone un índice cualitativo que divida dichos rangos en condiciones “aceptables”, “de alerta” o “peligrosas”. La Figura 5.3 ilustra un ejemplo de índice local para datos de PM<sub>10</sub> del año 2008 en la estación de Fontibón.



**Figura 5.3.** Indicador local (datos Estación de Fontibón para el año 2008).

## 6. EJEMPLO DE EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES

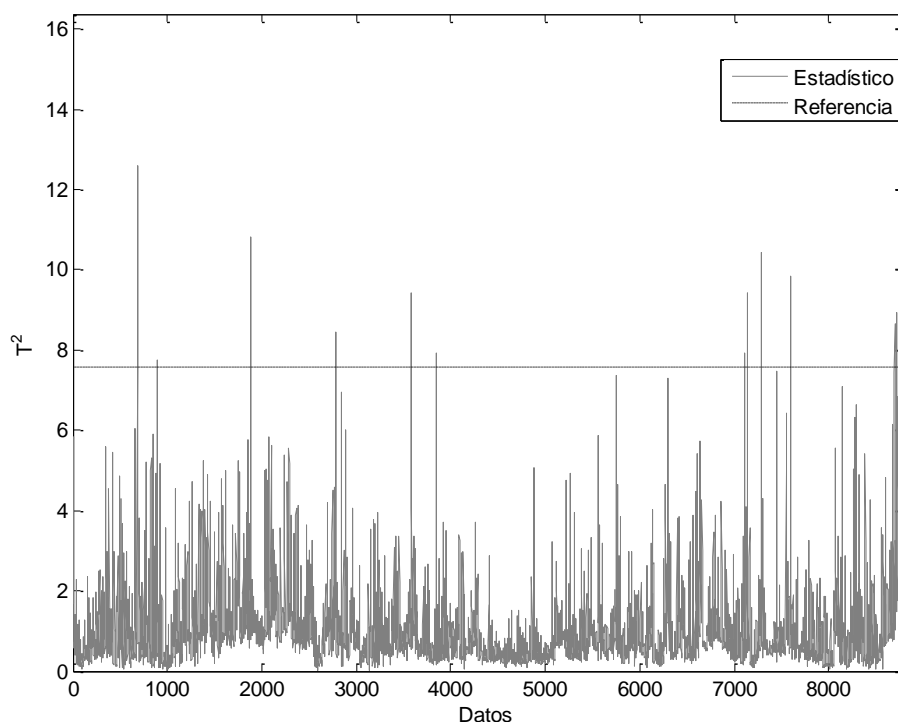
Los indicadores propuestos se utilizarían para evaluar la eficacia de las medidas presentadas en plan decenal de descontaminación hacia el futuro mediante el análisis de sus tendencias en el tiempo. Por ejemplo, si los resultados de los indicadores muestran una tendencia al alza, esto significaría que el Pddb no está generando los resultados esperados.

A manera ilustrativa, en este capítulo se presenta una evaluación de los indicadores globales y locales para el caso de datos históricos de  $PM_{10}$ .

### 6.1 Resultados para $PM_{10}$

Para los datos correspondientes al año 2008, el análisis por PCA realizado sobre los registros arrojó como resultado un número de 6 componentes principales. Esto significa que 6 de las 12 estaciones de monitoreo retienen alrededor del 90% de la información. Esta evidencia sugiere que la red de monitoreo tiene un alto grado de redundancia.

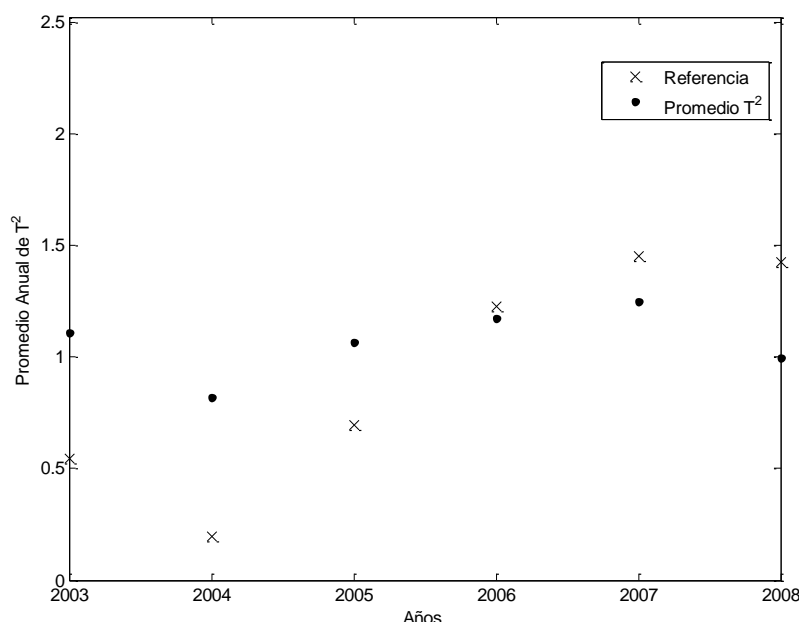
Los valores de  $T^2$  obtenidos con base en los registros de todas las estaciones en el año 2008 se presentan en la Figura 5.4. Para este caso, los valores que son superiores a la referencia corresponden a registros que exceden el valor transformado equivalente a la norma de corta duración.



**Figura 5.4.** Ejemplo de resultados para  $T^2$  ( $PM_{10}$  en el año 2008 - referencia con respecto a la norma de 24 horas).

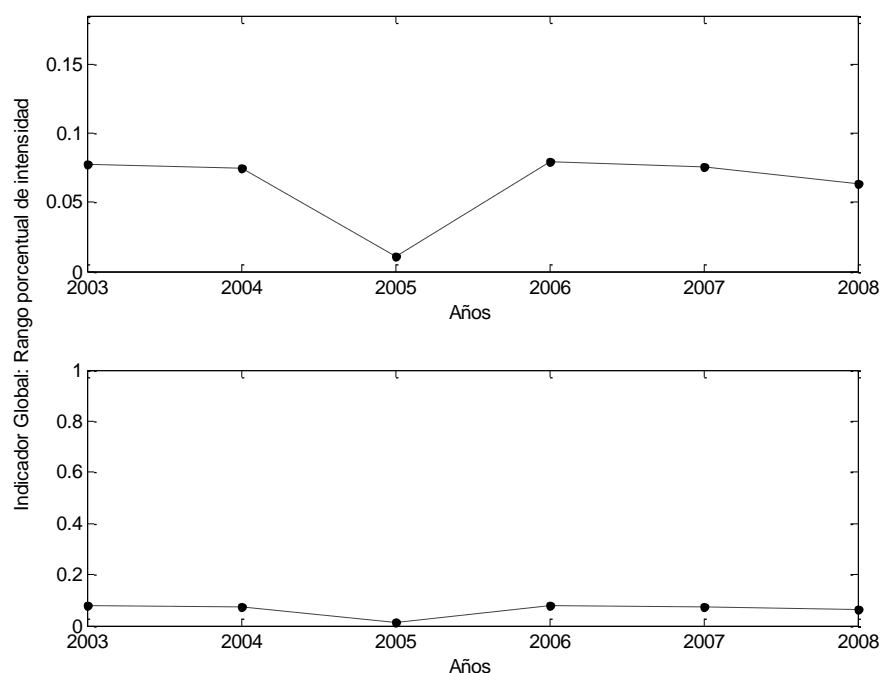
### 6.1.1 Indicador Global

La Figura 5.5 muestra los promedios anuales de  $T^2$  y los valores de referencia para el caso de la norma de larga duración (norma anual). Se puede observar cómo los valores promedio de  $T^2$  están por debajo de la referencia en los tres últimos años. Esto sugiere una mejora de la calidad del aire para los últimos años incluidos en este análisis.



**Figura 5.5.** Promedios anuales de  $T^2$  con respecto a la referencia (norma anual  $PM_{10}$ ).

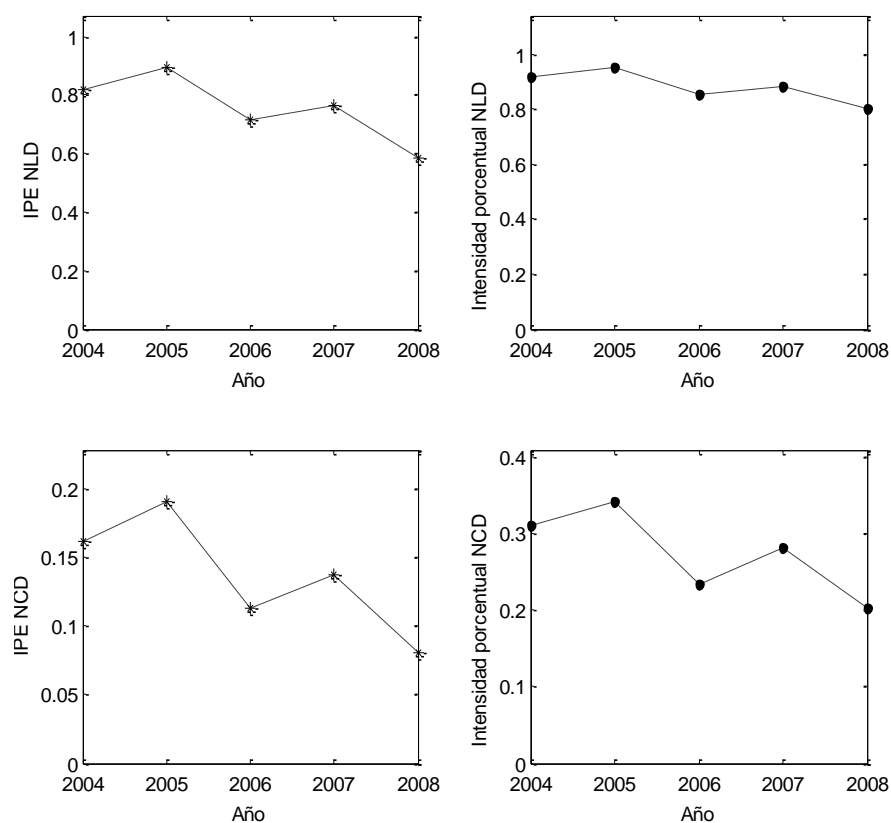
La Figura 5.6 muestra los resultados para el caso de la norma de corta duración durante 11 años de análisis (las dos gráficas hacen referencia al mismo resultado haciendo uso de escalas diferentes).



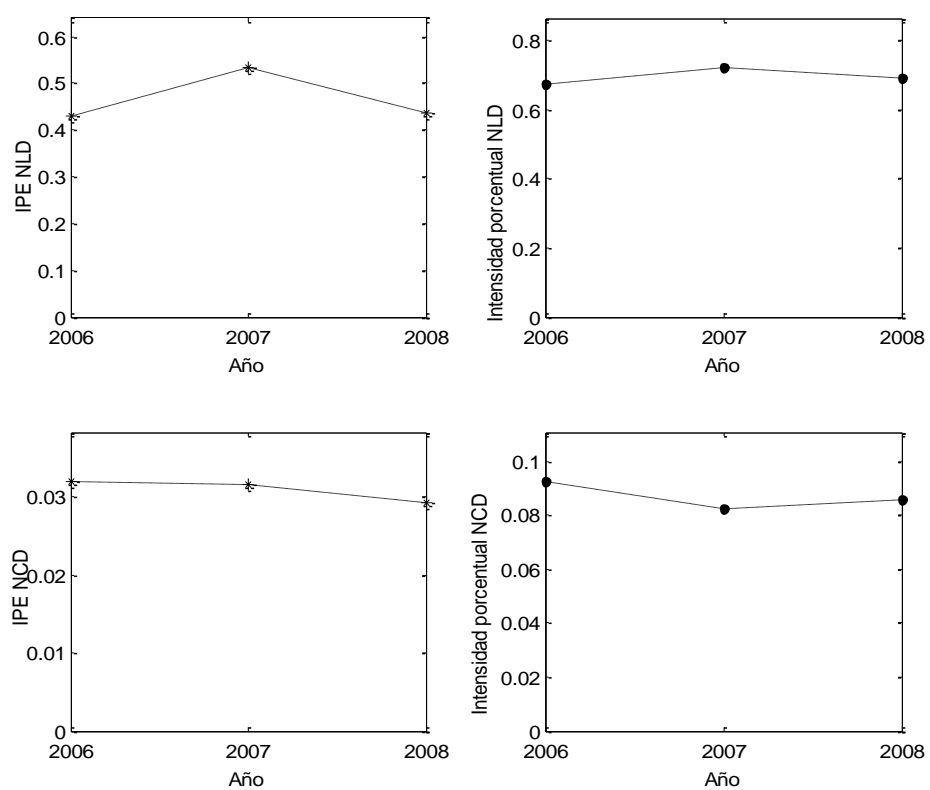
**Figura 5.7.** Indicador global de  $PM_{10}$  con respecto a la norma de corta duración.

### 6.1.2 Indicador Local

La Figura 5.8 muestra los resultados para el indicador local en la estación de Puente Aranda y la Figura 5.9 muestra lo mismo para el caso de la estación de Carrefour. Las gráficas de la derecha corresponden a la intensidad porcentual de la excedencia y las de la izquierda corresponden al IPE. Las gráficas superiores muestran el indicador en términos de la norma de larga duración (NLD) y las inferiores en términos de la norma de corta duración (NCD).



**Figura 5.8.** Evolución del indicador local - Estación Puente Aranda.



**Figura 5.9.** Evolución del indicador local - Estación Carrefour.



## 7. UTILIDAD DEL MÉTODO DE COMPONENTES PRINCIPALES

La metodología por PCA tiene el potencial de aportar información adicional que puede ser altamente útil en la toma de decisiones y en lo que se refiere al seguimiento del desempeño del PDDB. Este método también aportaría solidez y rigurosidad estadística para los procedimientos que se realizan a diario como parte de la operación de la RMCAB.

Adicionalmente, como parte del estudio aquí realizado, el análisis por PCA fue utilizado al momento de plantear y evaluar los diferentes proyectos que fueron incluidos en el PDDB. Esto se llevó a cabo como parte del modelo de optimización de proyectos así como durante la formulación de escenarios futuros al momento en que se requería convertir un cambio en el inventario de emisiones en un cambio en los niveles de contaminación del aire.

Para el cálculo en referencia se determinó la relación histórica entre contaminación promedio en la ciudad (determinada a través del PCA) y los niveles de emisión conocidos a partir de los inventarios de emisiones disponibles. En este sentido, se tuvo que considerar el hallazgo que indicó que la RMCAB presenta una alta redundancia y que por lo mismo al momento de calcular un promedio que se desee representativo para toda la ciudad se debe recurrir a una transformación por PCA o a una corrección de los pesos que se otorgan a las estaciones al momento de estimar un promedio ponderado de las mismas.

Para esto último también es posible hacer uso del PCA, en donde en lugar de modificar el espacio y las unidades de los datos (v.g., expresando la contaminación no en unidades de concentración sino en términos del  $T^2$ ) se otorgan pesos distintos a los datos de las estaciones que reflejen la redundancia, la representatividad y la significancia real de los datos. Dicho procedimiento fue precisamente el utilizado en este estudio y su uso se recomienda para futuros esfuerzos similares.

De ignorarse esta condición se corre el riesgo de interpretar de forma incorrecta los datos de la red de monitoreo, desperdiciando no solo la calidad e importancia de dicha información sino también el inmenso esfuerzo logístico y financiero que se requiere para su compilación.

Por ejemplo, la Tabla 5.6 muestra la participación porcentual de cada estación obtenida luego de aplicar PCA a los datos de  $PM_{10}$  del año 2008.

**Tabla 5.6.** Participación porcentual de las estaciones en la concentración de  $PM_{10}$  (2008).

Estación	Participación Porcentual
Sony	15%
Tunal	16%
IDRD	3%
Carrefour	9%
Escuela	1%
Kennedy	15%
Santo Tomas	15%
Corpas	3%
Puente Aranda	6%
Fontibón	16%

## 8. REFERENCIAS

Bower, J., Loader, A., Broughton, G., Stedman, J., Kent, A., Cook, A., Targa, J., Glynn, A., Willis, P. 2007. Air Pollution in the UK: 2006. Documento preparado para el Department for Environment, Food and Rural Affairs, the Welsh Assembly Government (Defra), para el gobierno escocés y para el Departamento de Ambiente de Irlanda del Norte.

Comisión Europea. 2001. Towards a Local Sustainability Profile. European Common Indicators. ISBN 92-894-1497-9.

Comisión Nacional del Medio Ambiente. 1997. Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana.

Department for Environment, Food and Rural Affairs in partnership with the Scottish Executive (DEFRA). 2007. The Air Quality Strategy for England, Scotland, Wales and Northern Ireland. Volumen 1 y 2. Welsh Assembly Government and Department of the Environment Northern Ireland.

Dockery, C.A., Pope III, C.A., Xu, X., Spengler, D.J., Ware, J.H., Fay, M.E., Ferris, B.G., Speitzer, F.E., 1997. An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. New England Journal of Medicine 329, 1753–3744.

European Topic Centre on Air and Climate Change. 2009. ETC/ACC Technical paper 2009/3. European exchange of monitoring information and state of the air quality in 2007.

Gramsch, E., Cereceda-Balic, F., Oyola, P., Baer, D., 2006. Examination of pollution trends in Santiago de Chile with cluster analysis of PM<sub>10</sub> and ozone data. Atmospheric Environment 40 (28), 5464–5475.

Koelemeijer, R.B.A., Hommman, C.D., Matthijsen, J. 2006. Comparison of spatial and temporal variation of aerosol optical thickness and particular matter over Europe. Atmospheric Environment 40 (27), 5304-5315.

Larssen, S., Otto-Hagen, L. 1996. Air Quality in Europe, 1993. A pilot report. European Environment Agency (EEA).

Motallebi, N., Flocchini, R. Myrup, L., Cahill, T. 1990. A principal component analysis of visibility and air pollution in six Californian cities. Atmosfera 3: 127-141.

Pires, J., Pereira, M., Alvinm-Ferraz, M., Martins, F. 2009. Identification of redundant air quality measurements through the use of principal component analysis. Atmospheric Environment, 43: 3837-3842.

Pires, J., Sousa, S., Pereira, M., Alvinm-Ferraz, M., Martins, F. 2008. Management of air quality monitoring using principal component and cluster analysis-Part I: SO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub>. Atmospheric Environment, 42: 1249-1260.

Pires, J., Sousa, S., Pereira, M., Alvinm-Ferraz, M., Martins, F. 2008. Management of air quality monitoring using principal component and cluster analysis-Part II: CO, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>. Atmospheric Environment 42: 1261-1274.

Pope, C., Renlund, D., Kfoury, A., May, H., Horne, B. 2008. Relation of heart failure hospitalization to exposure to fine particulate air pollution. The American Journal of Cardiology 102 (9), 1230-1234.

Qin, S.J. 2003. Statistical Process monitoring: basics and beyond. *Journal of Chemometrics* 17: 480-502.

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Secretaría de Salud. 1996. El Programa para mejorar la calidad del aire en el Valle de México. Departamento del Distrito Federal, Gobierno del Estado de México

Shlens, J. 2003. A tutorial on Principal Component Analysis. Derivation, discussion and singular value decomposition.

Shlens, J. 2009. A tutorial on Principal Component Analysis. New York University. New York.

Smith, L. 2002. A tutorial on Principal Component Analysis.

South Coast Air Quality Management District Governing Board (AQMD). 2007. 2007 Air Quality Management Plan.

Statheropoulos, M., Vassiliadis, N., Pappa, A. 1998. Principal component and canonical correlation analysis for examining air pollution and meteorological data. *Atmospheric environment* , 32 (6): 1087-1095.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2006. Guidelines for the Reporting of Daily Air Quality –the Air Quality Index (AQI). Office of Air Quality Planning and Standards.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2009. Air Quality Index. A Guide to Air Quality and your Health. Office of Air Quality Planning and Standards.

World Health Organization. 2006. Air Quality Guidelines Global Update 2005. ISBN 92 890 2192 6.