

# ELEMENTOS TÉCNICOS DEL PLAN DECENAL DE DESCONTAMINACIÓN DE BOGOTÁ



Parte 2: Inventario de Emisiones Provenientes de Fuentes Fijas y Móviles







**ELEMENTOS TÉCNICOS DEL  
PLAN DECENAL  
DE DESCONTAMINACIÓN  
DE BOGOTÁ**

© Alcaldía Mayor de Bogotá

Secretaría Distrital de Ambiente - SDA, 2009

ISBN No. 978-958-695-442-6

Primera edición

Julio de 2009

Secretaría Distrital de Ambiente, Bogotá D.C., Colombia

Impreso en Colombia - Printed in Colombia

Todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida total ni parcialmente, ni registrada en o transmitida por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni en ningún medio sea mecánico, fotoquímico, electrónico, magnético, electro-óptico, por fotocopia o cualquier otro, sin el permiso previo por escrito de la entidad.

**ELEMENTOS TÉCNICOS DEL  
PLAN DECENAL  
DE DESCONTAMINACIÓN  
DE BOGOTÁ**

Parte 2: Inventario de Emisiones Provenientes de Fuentes Fijas y Móviles

**ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ**  
Secretaría Distrital de Ambiente

**Samuel Moreno Rojas**  
Alcalde Mayor

**Juan Antonio Nieto Escalante**  
Secretario Distrital de Ambiente

**Samir José Abisambra Vesga**  
Subsecretario General y de Control Disciplinario

**Edgar Fernando Erazo Camacho**  
Director de Control Ambiental

**Edgar Vicente Gutiérrez Romero**  
Subdirector de calidad del aire, auditiva y visual

#### **EDITOR**

**Jesús Miguel Sepúlveda Escobar**  
Profesional especializado Subdirección de  
calidad del aire, auditiva y visual

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental  
Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental

**Eduardo Behrentz Valencia**  
Investigador principal

**Nancy Sánchez Morcote**  
Co-investigadora

**Investigadores colaboradores**  
Magdalena Fandiño del Río  
Paula Rodríguez Vargas

**Corrección de estilo**  
Oficina Asesora de Comunicaciones SDA

**Fotografía**  
Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental

**Diseño y diagramación**  
Diana Fernández Prieto

**Impresión**  
Contácto Gráfico Ltda.

## **Descargo de responsabilidad**

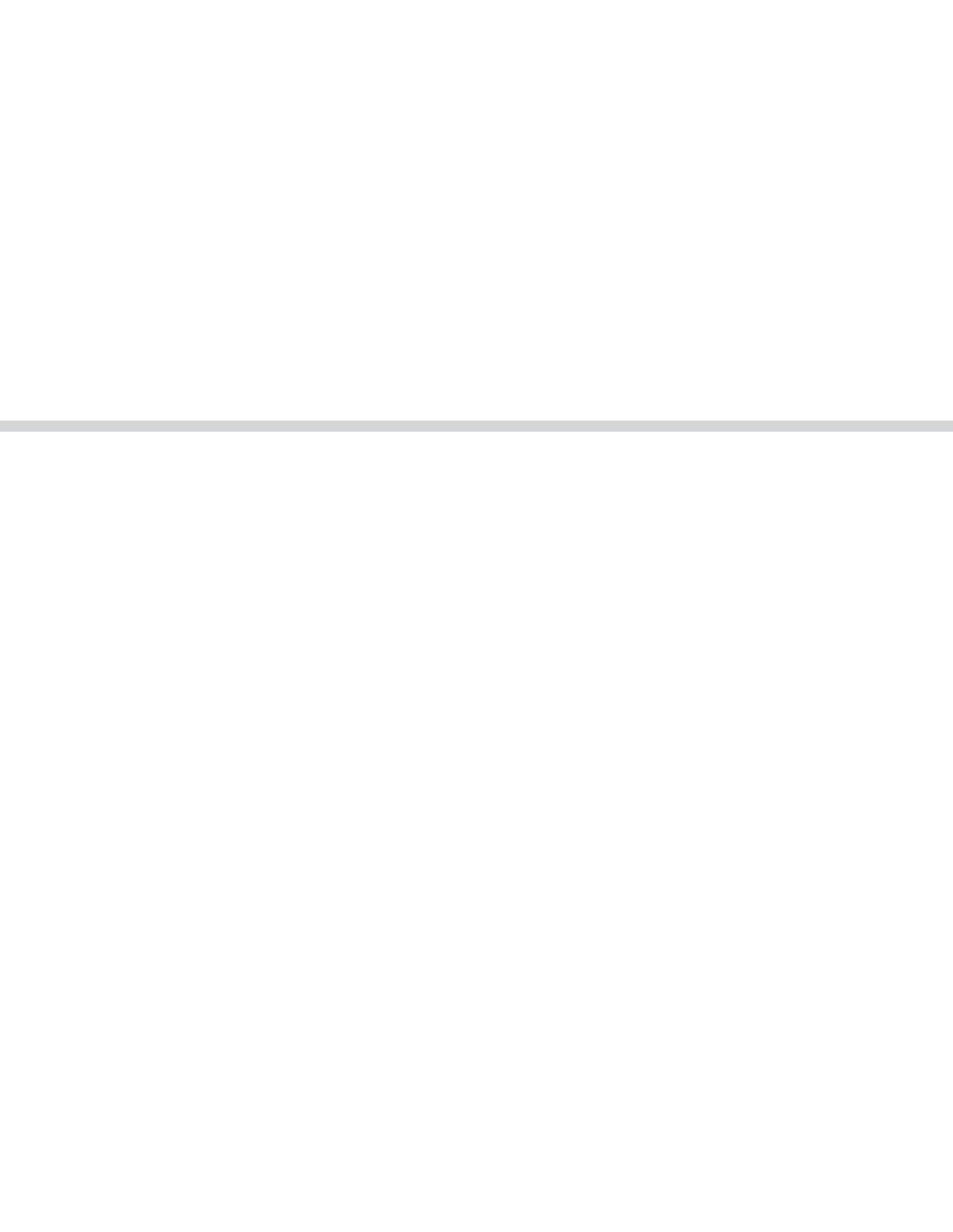
Las afirmaciones y conclusiones que se presentan en este documento son producto del trabajo y la reflexión del contratista y no necesariamente corresponden a la opinión de la entidad financiadora, Alcaldía Mayor de Bogotá - Secretaría Distrital de Ambiente. La mención o el uso de productos comerciales o de empresas que se utilizaron para tener acceso a los mismos no deben ser entendidos como un aval o una recomendación de uso por parte de la Universidad de los Andes.



# Parte A

---

Inventario de Emisiones  
Provenientes de Fuentes Fijas



# Agradecimientos

Las contribuciones de la Secretaría Distrital de Ambiente, en particular por parte de Jesús Miguel Sepúlveda, principal interventor de este proyecto y Edgar Erazo, Director de Control Ambiental; fueron altamente apreciadas. De forma similar se agradecen las contribuciones de Claudia Buitrago, Martha Liliana Perdomo, Aymer Maturana, Carolina Jarro, Eder Pedraza, Andrea Maldonado y Mónica Espinosa.

Agradecemos de forma especial la colaboración prestada por la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI), la Empresa de Gas Natural S.A., y el grupo empresarial de tintorerías Asotextil Capital.

Deseamos también destacar las valiosas contribuciones de Sandra Bravo y Robinsson Rodriguez así como de Edgar A. Virgüez, Mauricio Gaitán, Marcela Gonzáles, Andrey Giraldo, Juan C. Cárdenas, Diego A. Jacinto, Gabriel Hernández, Jose L. Camargo, Hingela A. Beltrán, Diana C. Osorio, Diana M. Martínez, Natalia Muñoz, José A. Zamudio, Juan P. Quijano, Diego A. Guzmán, Juan S. Guevara, Camilo Gómez, Gustavo A. Gutiérrez, Juan C. Olaya, Jorge I. Tabares y Juan D. Castaño. Agradecemos los aportes realizados por Oscar Ducuara, Edna Delgado, Gloria Barriga, Patricia Vargas, y Nancy Henao.

Se destaca también la colaboración prestada por la Universidad Nacional de Colombia, Ingeniería Ambiental de Colombia, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, la Cámara de Comercio de Bogotá, Frigorífico Guadalupe S.A., Industrias Losada Vargas, Cosmetic France Ltda., Schering Plough, Cauchos Eterna S.A., Gaseosas Colombianas S.A. Sur, Gaseosas Lux S.A., Merck S.A., Boehringer Ingelheim S.A., Nacional de Chocolates S.A., Inversiones Flores Lamprea, Compañía Manufacturera del Pan Comapan, Comestibles Ricos S.A., Gutemberto S.A., General Motors Colmotores S.A., Compañía Colombiana Automotriz, CyR Texco Ltda, Wash Service, Permoda S.A., Tintorería Gamatex Ltda., Rosalba Fuentes – Tintex, Termijeans, Procesos y Acabados Ltda., Ladrillera Yomasa S.A., Ladrillera Helios S.A., Ladrillera Santa Fe y Giovanni Albarracín.

Finalmente, destacamos y agradecemos de manera especial el soporte provisto para esta investigación por parte de la Alcaldía Mayor de Bogotá, a través de la Secretaría Distrital de Ambiente así como por parte del Inter-American Institute for Global Change Research (fondos CRN II 2017 a través del soporte de la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos - Grant GEO-0452325). Este reporte fue remitido en cumplimiento parcial del Contrato de Ciencia y Tecnología 347 de 2006 entre la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá y la Universidad de los Andes, cuyo objeto fue elaborar estudios y planes para contribuir a los procesos de monitoreo y mejoramiento de la calidad del aire en el distrito capital de Bogotá así como diseñar las políticas necesarias para controlar los factores que generan contaminación atmosférica. Este trabajo fue culminado en el mes de Octubre de 2008.



# Resumen ejecutivo

Durante el desarrollo de este proyecto se llevó a cabo el inventario de emisiones provenientes de fuentes industriales para la ciudad de Bogotá haciendo uso de metodologías y procedimientos que corresponden al estado del arte en estos temas.

Como parte de dicho esfuerzo se realizó una campaña masiva de campo sin precedentes en la historia reciente de la ciudad en la que se caracterizaron decenas de chimeneas industriales mediante mediciones de tipo isocinético. Adicionalmente, se realizó un empadronamiento del sector industrial de la ciudad en el que se visitaron cerca de 3,000 industrias con el fin de recolectar información primaria relacionada con el consumo de combustible y el tipo de proceso industrial utilizado. Durante la fase de campo del estudio se llevó a cabo un análisis de fotografías aéreas de alta resolución a partir del cual se determinó el inventario de chimeneas industriales de la ciudad. Con base en los resultados obtenidos en estas etapas se estimaron las emisiones de contaminantes generadas por la industria.

Las fuentes industriales en Bogotá emiten anualmente a la atmósfera 1,400 toneladas de material particulado; 2,600 toneladas de óxidos de nitrógeno; y 2,200 toneladas de óxidos de azufre. Estas cantidades representan uno de los principales aportes al problema de contaminación del aire en la ciudad. Según los registros oficiales disponibles en la Cámara de Comercio de Bogotá, en la ciudad hay más de 45,000 industrias manufactureras. De esta cantidad, sin embargo, menos de 1,000 (pertenecientes al sector formal) se encuentran asociadas con emisiones de contaminantes a la atmósfera. Como parte de estas empresas, la ciudad cuenta con cerca de 2,000 chimeneas industriales.

Los resultados de este trabajo confirman que la localidad de Puente Aranda es la zona de Bogotá en donde se concentra el mayor número de empresas asociadas con emisiones atmosféricas así como el mayor número de chimeneas de tipo industrial. Al mismo tiempo, esto no significa que no existan otras localidades que merecen igual o mayor atención a propósito de las emisiones generadas en éstas.

Al interior de los sectores analizados en este estudio se logró documentar que la producción no tecnificada de ladrillo (seguida por las calderas que utilizan carbón como combustible) es la más importante fuente de contaminación por material particulado en la ciudad.

La industria bogotana ha migrado de forma muy importante hacia el uso de gas natural como combustible para sus procesos productivos. Hoy en día dos de cada tres empresas pertenecientes al sector formal hacen uso de dicho combustible. Esta situación es altamente conveniente desde el punto de vista de las emisiones de material particulado y óxidos de azufre y por lo mismo se deben continuar y fortalecer los instrumentos que pretenden incentivar el uso del gas natural en la industria. Los beneficios ambientales asociados con el uso del gas natural industrial podrían ser incluso mayores si se contara con una oferta de combustible robusta que permitiese el uso de calderas y hornos dedicados a gas en lugar de los elementos duales que son el común denominador en la industria bogotana.

La presencia de sectores informales al interior de la industria bogotana debería ser un tema de estudio por parte de las diferentes autoridades de orden distrital. Si bien es supremamente difícil cuantificar el grado de informalidad del sector industrial, los resultados de este estudio sugieren que esta es una situación de consideración, debido en gran parte a la tendencia a la utilización de combustibles de menor calidad y de procesos de combustión menos tecnificados cuando se trata de industrias informales.

Durante el desarrollo de este trabajo se logró documentar que existen inconvenientes y limitaciones importantes en el desarrollo de las mediciones isocinéticas en chimeneas en la ciudad. Esto es algo que ocurre a pesar de las auditorías realizadas por la SDA y a las que son sometidas las empresas consultoras que se dedican a estas actividades. Esto significa que se deben hacer esfuerzos importantes para fortalecer este tipo de controles.



# Tabla de contenido

1. Aspectos generales	1
2. Antecedentes	2
2.1. Estudios previos de carácter internacional	2
2.1.1. Estudios realizados en América Latina	3
2.2. Experiencias en Colombia	4
2.3. Experiencias en Bogotá	4
2.4. Inventarios de fuentes	5
3. Metodología	7
3.1. Actividades preliminares a la campaña de campo	8
3.1.1. Selección de categorías industriales	8
3.1.2. Identificación de fuentes a caracterizar	12
3.1.3. Preparación y capacitación para el personal de campo	12
3.2. Campaña de campo	13
3.2.1. Instrumentación	15
3.2.2. Ensayos isocinéticos	16
3.2.3. Controles de calidad	17
3.3. Ensayos de laboratorio	17
3.3.1. Determinaciones de NO <sub>x</sub>	17
3.3.2. Determinaciones de SO <sub>x</sub>	18
3.3.3. Determinaciones de material particulado	19
3.4. Determinación del inventario de fuentes	20
3.4.1. Actividades preliminares y preparatorias	20
3.4.2. Recorridos en campo y visitas a industrias	21
3.4.3. Análisis de fotografía aérea	23
3.5. Estimación del inventario de emisiones industriales	24
3.5.1. Extrapolación de emisiones	24
4. Resultados	26
4.1. Inventario de fuentes – la industria de Bogotá	26
4.2. Inventario de chimeneas industriales	30
4.3. Balance energético y consumo de combustible	32
4.4. Factores de emisión	33
4.5. Inventario de emisiones	34
5. Análisis de incertidumbre	38
6. Conclusiones	39
7. Referencias	41



# 1. Aspectos generales

---

El presente documento representa la segunda de cuatro partes en las que se encuentra dividido el reporte final de resultados del estudio elaborado por el Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA) de la Universidad de los Andes y contratado por la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (SDA) como parte del convenio de ciencia y tecnología número 347 de 2006.

El objeto de dicho convenio fue elaborar estudios y planes para contribuir a los procesos de monitoreo y mejoramiento de la calidad del aire en el distrito capital de Bogotá así como diseñar las políticas necesarias para controlar los factores que generan contaminación atmosférica.

Esta segunda parte del reporte final se centra en los resultados obtenidos para el inventario de fuentes y de emisiones de contaminantes asociados con el sector industrial de Bogotá

## 2. Antecedentes

Un inventario de emisiones, definido como la contabilidad de todas las emisiones causadas por las diferentes fuentes de contaminación atmosférica, es un instrumento y una herramienta de vital importancia para la elaboración de las estrategias encaminadas al control y la mitigación de los fenómenos de polución del aire. Adicionalmente, la información generada en un inventario de este tipo permite determinar la eficacia de los programas y políticas que ya han sido implementados y que pretenden disminuir el impacto de las fuentes contaminantes.

De manera general se ha establecido que las denominadas “fuentes fijas”, las cuales incluyen fuentes tan variadas como las chimeneas industriales, las refinerías de petróleo, los rellenos sanitarios y las plantas de generación térmica de energía eléctrica, son las principales causantes de la presencia en el aire de contaminantes tales como el material particulado (PM) y los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) (Elbir et al., 2004; Gurjar et al., 2004; Bhanarkar et al., 2005).

### 2.1. Estudios previos de carácter internacional

Elbir et al. (2004) llevó a cabo un inventario de emisiones para la ciudad de Izmir en Turquía, en donde se caracterizaron fuentes puntuales, lineales y de área que representaban emisiones industriales, vehiculares y domésticas, respectivamente. De acuerdo con los resultados de este estudio, para los diferentes sectores que fueron considerados en los análisis, se logró determinar que el principal contribuyente al inventario de emisiones de PM fue el sector de explotación minera. Para el desarrollo de este inventario de emisiones, los autores recolectaron información primaria y de forma directa en las diferentes industrias. Dicha información tenía que ver con el tipo de materia prima utilizada, los procesos de producción, el consumo de combustible y las condiciones de las chimeneas presentes en las industrias.

Según los resultados de este trabajo, las altas emisiones de SO<sub>x</sub> se encuentran relacionadas con el alto contenido de azufre en los combustibles utilizados por la industria. Para este mismo contaminante, se encontró que el sector industrial aporta cerca del 90% de las emisiones, en donde las refinerías de petróleo y las petroquímicas son responsables a su vez del 72% de las emisiones producidas por dicho sector.

En un inventario de emisiones realizado recientemente en Mumbai, India (Bhanarkar et al., 2005), se recopiló información relacionada con el consumo de combustible por parte del sector industrial así como con los factores de emisión específicos para las condiciones de la ciudad. En este estudio se encontró que el consumo de carbón y de combustible tipo *fuel oil* residual es mayoritario en la ciudad en referencia. Asimismo, a partir de los análisis realizados, se logró determinar que las emisiones de PM provienen fundamentalmente del sector industrial (60%). Para el mismo contaminante y al interior del sector antes mencionado, se logró determinar que las plantas de generación de energía eléctrica emiten cerca del 20% de las emisiones mientras que la maquinaria tipo *stone crushers*<sup>1</sup> son responsables de cerca del 40% de las emisiones.

Respecto a la contaminación asociada con la presencia de SO<sub>x</sub> en el aire, se encontró que la industria química y petroquímica aporta cerca del 50% de las emisiones mientras que las plantas de generación de energía eléctrica aportan algo menos del 30% de las emisiones totales. Al interior de la industria química y petroquímica, los sectores más contaminantes son las refinerías de aceite así como las que tienen que ver con productos químicos y fertilizantes. Al interior del conjunto de combustibles industriales disponibles se determinó que el *fuel oil* es el más contaminante de todos generando cerca del 60% de las emisiones de SO<sub>2</sub> así como el 37% de las emisiones de material particulado.

En un inventario realizado para la ciudad de Delhi (Gurjar et al., 2004) se obtuvo que las plantas térmicas son responsables del 68% y 80% de las emisiones de SO<sub>x</sub> y material particulado, respectivamente. Este mismo estudio permitió concluir que para reducir los niveles de material particulado es más eficiente implementar medidas enfocadas a las plantas generadoras de energía eléctrica que hacia cualquier otro sector. Por otro lado, los resultados de esta investigación mostraron que el sector transporte es el principal responsable de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) con una contribución al inventario de emisiones que supera el 80%. Los resultados de este trabajo también permitieron concluir que la agricultura es la principal fuente de amonio mientras que la disposición final de residuos residenciales es la principal fuente de metano.

<sup>1</sup>Stone Crushers: Maquinaria industrial dedicada a la trituración de diversos materiales. Este tipo de tecnología es común y ampliamente utilizada en diversos países de mundo.

Nansai et al. (2003) realizó el inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos y de consumo de energía en Japón. En este trabajo se utilizó una matriz de 519 filas y 403 columnas en la cual se clasificaron los diferentes sectores productivos en categorías respecto al tipo de combustible utilizado (carbón, petróleo y gas natural). Dado el consumo de energía para cada tipo de combustible y haciendo uso de factores de emisión propuestos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés), se calcularon las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, y PM.

Los resultados de la investigación referenciada anteriormente demostraron, tal y como era de esperarse, que el sector de generación de energía eléctrica domina las estadísticas de consumo de combustible (representando cerca del 35% del consumo total del país). Estas mismas industrias son también las mayores generadoras de CO<sub>2</sub>, con una contribución del 30% de las emisiones totales de dicha especie química. A pesar de esto, la contribución del sector industrial no resulta ser significativa para contaminantes tales como SO<sub>x</sub> y material particulado, ya que la mayoría de las industrias cuentan con sofisticadas tecnologías de control de emisiones. Respecto a las emisiones de NO<sub>x</sub>, el sector más importante fue el transporte aportando el 61% del total de emisiones, seguido por el sector de generación de energía eléctrica con el 8%. En el caso de SO<sub>x</sub>, el sector transporte aporta el 52% de las emisiones. En el caso de material particulado, las mayores emisiones provienen del sector transporte, el cual representa el 45% de las emisiones totales.

Además de inventarios realizados para ciudades analizadas de forma individual, también es posible encontrar referencias a estudios que incluyen múltiples ciudades en diversos países. Por ejemplo, Veldt (1991) realizó un inventario de emisiones para países miembros de la Comunidad Europea mientras que Kato y Akimoto (1992) realizaron un inventario, basado en estadísticas de consumo de combustible, que incluyó 25 países.

En el inventario realizado por Kato y Akimoto se encontró que las emisiones de SO<sub>2</sub> en Asia presentaron un incremento del 60% entre 1975 y 1987. De los países considerados en dicho estudio, el mayor responsable de estas emisiones es China con una contribución cercana al 70% de las emisiones totales para el año de 1987. En segundo lugar se ubica India (10%) seguido por Corea (4%), Japón (3%), Tailandia (2%) y Taiwán (2%). Este conjunto de países aporta el 80% de las emisiones totales de SO<sub>2</sub>. Según los resultados de la investigación en referencia, el 70% de las emisiones de China son generadas por procesos asociados con el uso de carbón con alto contenido de azufre.

En cuanto a emisiones de NO<sub>x</sub> en Asia, el estudio antes citado muestra un incremento del 70% ente 1975 y 1985. Para este caso China vuelve a ser el mayor contribuyente siendo el responsable del 47% de las emisiones totales. India se ubica en el segundo lugar (16%) seguida por Japón (12%), Indonesia (4%), Corea del sur (3%), Corea del norte (3%), Tailandia (2%) y Taiwán (2%). La contribución de estos países representa el 92% de las emisiones totales de NO<sub>x</sub>.

Shukla et al. (2001) desarrolló un inventario para los 466 distritos de India con una metodología similar a la implementada por Kato y Akimoto (1992). Los resultados de dicho inventario muestran un incremento del 30% entre 1990 y 1995 en las emisiones de ese país. Adicionalmente, a través de este estudio se logró demostrar que el sector energético domina el inventario de emisiones de SO<sub>x</sub> con un aporte superior al 45%. Con respecto a NO<sub>x</sub>, se cuantificó que tanto el sector energético como el sector transporte generan un aporte del 30% (cada uno) a las emisiones totales de esta especie química.

### 2.1.1. Estudios realizados en América Latina

En el caso de países latinoamericanos, resultados de investigaciones recientes demuestran que las fuentes industriales siguen teniendo un aporte significativo al inventario total de emisiones para contaminantes tales como PM y SO<sub>x</sub> (Dirección General de Salud Ambiental de Lima, 2005). Por ejemplo, según reportes de la Dirección General de Salud Ambiental de Lima (Perú), durante el año 2005 las fuentes puntuales aportaron más del 90% de las emisiones totales de PM producidas en la ciudad. Valores similares fueron encontrados para SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>.

En un inventario realizado en Ciudad de México en el año 1999 (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 1999) se recolectó información referente a estudios previamente desarrollados y encaminados a la cuantificación de las emisiones generadas en chimeneas industriales. Según los resultados de este ejercicio, el sector industrial de esta ciudad produce 1,600 toneladas de NO<sub>x</sub> al año, 2,700 toneladas de SO<sub>2</sub> al año, 1,200 toneladas de CO en el mismo período de tiempo así como 1,050 toneladas de PM<sub>10</sub> y 200 de PM<sub>2.5</sub>.

Según el estudio en referencia, las emisiones de especies tales como NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub> provienen principalmente de plantas generadoras de electricidad, las cuales aportan el 57% y el 61% de las emisiones totales, respectivamente. Para el caso del CO, las principales fuentes de emisión son las refinerías, las plantas de extracción de petróleo y gas, las centrales eléctricas y la industria de alimentos. Las plantas eléctricas son las fuentes de contaminación más importantes en lo que se refiere a PM, seguidas por la industria de productos minerales no metálicos.

En Río de Janeiro (Brasil) se realizó un inventario de emisiones provenientes de fuentes fijas y móviles en el año 2004 usando métodos de mediciones directas (Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente, 2004). Los resultados obtenidos en este estudio mostraron que las fuentes fijas generan los mayores aportes en lo que se refiere a PM y SO<sub>x</sub>, siendo responsables del 60% y el 88% de las emisiones totales, respectivamente. Al interior de las fuentes industriales, el sector petroquímico y de generación de energía eléctrica son los principales responsables de las emisiones de SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>. Para el caso de SO<sub>x</sub>, el 50% y cerca del 40% de las emisiones provienen del sector petroquímico y del sector de generación de energía, respectivamente. Para el caso de PM, las plantas de generación de energía eléctrica son responsables del 50% de las emisiones.

## 2.2. Experiencias en Colombia

Jaramillo et. al., (2004) realizó un inventario de emisiones de contaminantes del aire en la zona Cali-Yumbo (Colombia) en donde se utilizaron factores de emisión teóricos en conjunto con estimaciones de consumo de combustible. Según los resultados de este esfuerzo, las fuentes puntuales son responsables del 52% (16,000 toneladas por año) de las emisiones de SO<sub>x</sub>. Para el caso de especies tales como NO<sub>x</sub> y CO, las fuentes móviles contribuyen con el 73% (19,000 toneladas por año) así como con más del 90% (318,000 toneladas por año) de las emisiones totales, respectivamente.

En lo que tiene que ver con PM, el estudio antes mencionado permitió concluir que las fuentes puntuales aportan más del 32% (11,500 toneladas por año) de las emisiones totales. Al interior de dichas fuentes, los sectores con una mayor contribución incluyen a la industria de papel y las artes gráficas así como a la industria química.

Según un inventario reciente desarrollado por la Universidad Pontificia Bolivariana y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2005) para la región del Valle de Aburrá (Antioquia, Colombia) a partir de resultados de mediciones isocinéticas, en dicha región de Colombia se generan 30,000 toneladas al año de PM y 20,000 toneladas al año de SO<sub>x</sub>.

## 2.3. Experiencias en Bogotá

En la capital del país se han desarrollado varios esfuerzos encaminados a determinar el inventario de emisiones contaminantes que se generan al interior del perímetro urbano. Uno de los primeros de dichos esfuerzos, tiene que ver con el estudio adelantado por la Agencia Internacional de Cooperación Japonesa (JICA) en el año 1991. Por medio de este trabajo se logró determinar que, por ejemplo, las fuentes industriales tenían una contribución del 80% en lo que se refiere a emisiones de SO<sub>x</sub>.

De forma más reciente, la autoridad ambiental distrital (en ese entonces conocida como Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente - DAMA), como parte del denominado Plan de Gestión de Calidad del Aire, logró documentar que el 86% de las emisiones de SO<sub>x</sub> y el 67% de las emisiones de PM en la región capital provenían del sector de fuentes fijas (DAMA, 2001). Un estudio desarrollado dos años después por la Universidad de los Andes y financiado por la misma autoridad ambiental demostró que para SO<sub>x</sub> y PM la contribución de fuentes fijas al inventario de emisiones totales era superior al 65%.

Asimismo, durante el año 2001, el entonces denominado DAMA, actual SDA, y la firma de consultoría INAMCO realizaron un inventario de fuentes fijas en la ciudad de Bogotá en el cual se llevaron a cabo cerca de 4,500 visitas a establecimientos industriales con el fin de recopilar información primaria relacionada con el consumo de combustible y el tipo de tecnología utilizada para los procesos de generación de energía. A partir de estos datos y haciendo uso de factores de emisión compilados en la metodología AP-42 de la EPA (EPA, 1995) se calcularon las emisiones del sector industrial de Bogotá.

Según los resultados de este estudio, la localidad de Puente Aranda (en donde se concentra gran parte de la actividad industrial de la ciudad) aporta más del 25% de las emisiones totales de PM<sub>10</sub>. Estas emisiones provienen principalmente de procesos de generación de vapor, calentamiento de agua y aceite así como de procesos de inyección, extrusión, peletizado, y termoformado. Para el caso de SO<sub>x</sub>, la localidad con mayores aportes al inventario de emisiones es Kennedy debido a procesos de ahumado, cocción, y asado.

Finalmente, según los resultados de un estudio realizado en el año 2002 por la Universidad de los Andes, en donde se utilizó el modelo europeo AIREMIS como herramienta de cálculo de los factores de emisión así como la información recolectada en el inventario de fuentes adelantado por INAMCO, el 80% del PM producido en la ciudad así como el 40% del CO provienen de fuentes industriales.

## 2.4. Inventarios de fuentes

El desarrollo de un “inventario de emisiones” de contaminantes del aire incluye no sólo la determinación de los factores de emisión y el manejo de estadísticas referentes al consumo de combustible sino también el conocimiento del “inventario de fuentes”. Este último hace referencia a la cantidad y ubicación de las fuentes de contaminación presentes en la ciudad o zona bajo estudio así como a las características de operación y consumo de combustible y de las mismas.

El objetivo principal de un inventario de fuentes es entonces recopilar información a nivel industrial acerca de, entre otras cosas, el tipo de actividad desarrollada, la ubicación geográfica de dicha actividad, el tipo y la calidad de los combustibles utilizados, la frecuencia de operación, la cantidad de fuentes presentes en la industria, y las características referentes a vida útil y tecnología utilizada en los dispositivos empleados (Mitra et. al., 2002). De esta forma, la metodología para la realización de un inventario de fuentes depende principalmente de la disponibilidad de información.

Cole et. al. (2007) llevó a cabo una evaluación de los patrones de contaminación a nivel industrial en China clasificando las industrias a partir de información reportada por entidades del gobierno y de acuerdo a parámetros tales como el crecimiento de los diferentes sectores productivos, el nivel de consumo energético, el capital humano requerido, el tamaño de las industrias, la eficiencia, y el grado de innovación tecnológica.

Para la construcción del inventario de fuentes en la ciudad brasileña de Río de Janeiro (Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente, 2004), se llevó a cabo un análisis de la información recopilada en registros institucionales y referente a más de 10,000 establecimientos industriales. De este conjunto se seleccionaron 1,800 industrias cuyas actividades eran potencialmente contaminantes. Finalmente, se generó un nuevo subconjunto de 500 empresas que fueron consideradas como las de mayor impacto y que por lo mismo fueron objeto de visitas por parte de personal técnico.

En la región del Sur de California (Estados Unidos) se llevan a cabo actualizaciones permanentes de su inventario de fuentes de especies tóxicas para lo cual se hace uso de la información compilada en los registros oficiales de la autoridad ambiental (el South Coast Air Quality Management District). Esta información es generada en el momento de adelantar los trámites de las licencias y permisos de funcionamiento que se requieren para las actividades económicas que producen las emisiones en referencia. Como parte de este esfuerzo se cuenta con información procedente de más de 3,200 fuentes industriales.

Bhanarkar et. al., 2004, compiló y analizó información referente a las industrias ubicadas en el área del Gran Mumbai (India) y procedente de los registros disponibles en la agencia local de control de la contaminación (Maharashtra State Pollution Control Board). En dichos registros se cuenta con datos de 183 industrias de diversa índole y tamaño, clasificadas en las siguientes categorías: energía, química y petroquímica, textil e impresión, alimentos y bebidas, entre otras. Como parte de la información analizada se cuenta con estadísticas de consumo de combustible y de la eventual formación de “clusters” relacionados con una misma actividad económica.

La autoridad ambiental de la ciudad mexicana de Mexicali (Radian International, 2000) realizó un esfuerzo para actualizar su inventario de fuentes de contaminación en el que se logró compilar información para 112 de las más de 1,000 industrias ubicadas en su área metropolitana. Esto se logró a través del proceso de aplicación para la obtención del Certificado de Operación Anual por parte de las industrias, en donde se incluyó un cuestionario cuyas preguntas hacían referencia a las fuentes de combustión utilizadas en las empresas así como a los procesos productivos en donde se hacía uso de las mismas.

Durante el desarrollo del inventario de fuentes puntuales localizadas en la zona Cali-Yumbo en el Departamento del Valle del Cauca (Jaramillo et al, 2004) se utilizó información consignada en las declaraciones entregadas a las autoridades ambientales por parte de 108 empresas que ejecutan sus actividades en dicha zona. Como parte de este ejercicio se analizaron datos referentes a procesos productivos, niveles de consumo de materias primas y consumo de combustible.

Un esfuerzo similar se llevó a cabo en el Valle de Aburrá en Antioquia (UPB y AMVA, 2005) en donde se compiló la información consignada en expedientes de industrias que se encuentran obligadas a reportar sus emisiones a la autoridad ambiental. Esta información fue verificada a través de visitas en donde se georreferenciación las fuentes bajo estudio. Adicionalmente, se realizó un empadronamiento de industrias que no estaban incluidas en los registros oficiales pero que realizaban actividades contaminantes. En total se compiló información para de 427 industrias asentadas en el Valle de Aburrá. De estos resultados se determinó, entre otras cosas, que el 48% de los procesos contaminantes se deben a la producción de vapor en calderas.

# 3. Metodología

Durante el desarrollo de este proyecto, el inventario de emisiones provenientes de fuentes industriales fue realizado en cuatro etapas, de acuerdo a lo ilustrado en la Figura 3.1. 1) En primer lugar, se llevó a cabo una masiva campaña de campo sin precedentes en la ciudad en la que se realizaron decenas de mediciones de tipo isocinético en chimeneas industriales localizadas en el interior del perímetro urbano de Bogotá. 2) En segundo lugar, se realizó un empadronamiento del sector industrial de la ciudad en el que se visitaron cerca de 3,000 industrias con el fin de recolectar información primaria y relacionada con el nivel de consumo de combustible y el tipo de tecnología utilizada en los procesos productivos. 3) De forma paralela, se llevó a cabo un cuidadoso análisis basado en fotografías aéreas de alta resolución con el fin de determinar el número de chimeneas existentes en la ciudad. 4) Posteriormente, se combinaron los resultados obtenidos en las actividades antes mencionadas con el fin de obtener el inventario de emisiones de la ciudad, en términos de toneladas de contaminantes emitidas por año. Estos resultados fueron validados y ajustados haciendo uso de un balance energético a nivel de toda la ciudad.

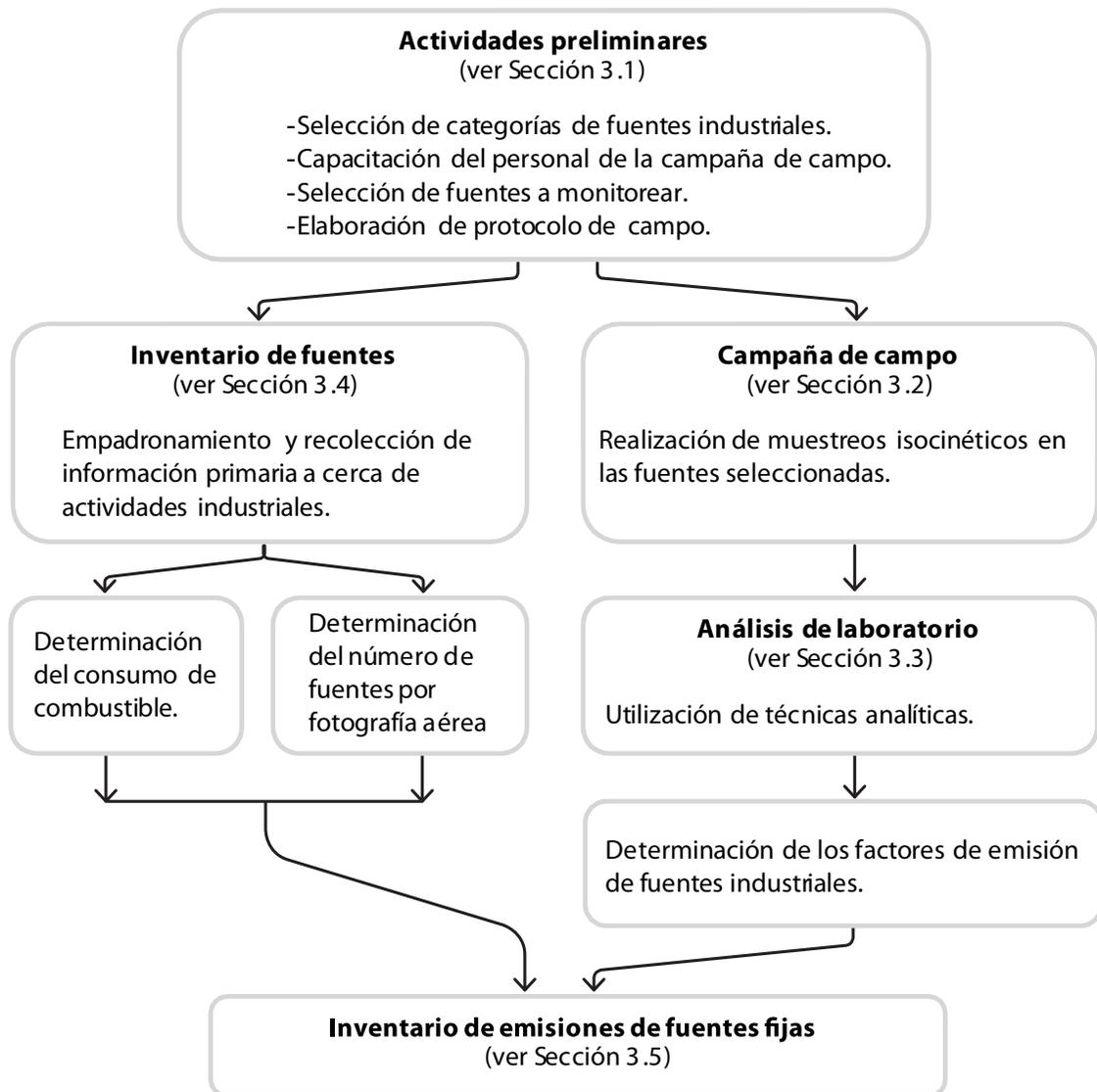


Figura 3.1. Representación esquemática de la metodología utilizada para la realización del inventario de emisiones de fuentes industriales.

### 3.1. Actividades preliminares a la campaña de campo

De forma previa al desarrollo de la campaña de campo en la que fueron utilizadas técnicas de medición directa de emisiones en chimeneas industriales fue necesario completar una serie de actividades para garantizar el éxito y la representatividad de los resultados obtenidos en dicha campaña.

La primera de estas actividades tuvo que ver con la selección del tipo de fuentes que serían objeto de la caracterización de emisiones mediante la metodología de medición isocinética. En segundo lugar, a partir de esta selección, se identificaron las fuentes (chimeneas) específicas en donde se adelantarían las mediciones. Por último, se realizó un cuidadoso programa de entrenamiento y capacitación para todo el personal de campo. Dicho entrenamiento incluyó no solo detalles acerca de los principios y las técnicas utilizadas sino también acerca de la operación de los elementos de seguridad pertinentes y los procedimientos de manejo de equipos a alturas elevadas.

#### 3.1.1. Selección de categorías industriales

Tal y como es el caso de cualquier inventario de emisiones y debido a razones de viabilidad logística y presupuestal, las mediciones isocinéticas en las chimeneas no se realizaron en el 100% de las fuentes existentes en la ciudad sino en una muestra seleccionada de tal forma que fuese representativa de las mismas. En la selección de dichas fuentes se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: ubicación geográfica (localidad), tipo de fuente de combustión (v.g., hornos y calderas), tipo de proceso industrial (v.g., hornos de alimentos o de fundición), capacidad (tamaño) y consumo de combustible de la fuente, y tipo y calidad de combustible utilizado.

Respecto a la ubicación de las fuentes industriales a ser caracterizadas, se tuvo en cuenta que la actividad industrial de la ciudad se encuentra focalizada en zonas específicas (ver Figura 3.2). De esta forma, la mayoría de las fuentes que fueron seleccionadas en este trabajo y que fueron objeto de mediciones directas de emisiones se encuentran ubicadas en dichas zonas, a saber, las localidades de Puente Aranda, Fontibón y Kennedy.

De forma similar, la muestra de fuentes que fueron caracterizadas no incluyó todo el rango de opciones en lo que tiene que ver con el tipo de proceso de combustión. En este caso, la gran mayoría de las mediciones se llevaron a cabo en hornos (ver Tabla 3.1) y calderas<sup>2</sup> dado que estos procesos de combustión dominan el tipo de tecnología que es utilizada en la industria de la ciudad de Bogotá (ver Figura 3.3).

En este sentido es importante resaltar que la decisión final de incluir una fuente en particular se encontraba supeditada a los resultados de las pre-visitas (ver Sección 3.1.2) en las que se determinaba si la fuente en referencia cumplía con los requisitos mínimos para hacer posible una medición de tipo isocinético. Asimismo, la decisión final de incluir una fuente en particular fue función de la disposición a permitir el monitoreo por parte del propietario de la misma.

Al mismo tiempo, sin embargo, durante el proceso de selección y distribución de fuentes a caracterizar se hizo el mejor esfuerzo por incluir industrias que fuesen representativas del universo presente en Bogotá.

<sup>2</sup> Las calderas suelen estar constituidas por una envolvente cilíndrica cuya función principal es la generación de vapor. Los hornos, por otro lado, son elementos más versátiles que cuentan con múltiples y diversas funciones de acuerdo al proceso requerido por la industria.

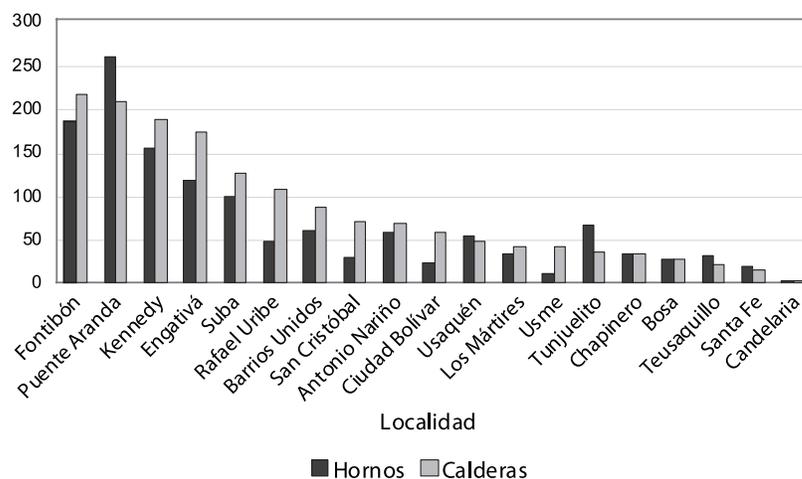


Figura 3.2. Distribución del número de hornos y calderas en Bogotá (fuente: Inamco, 2001).

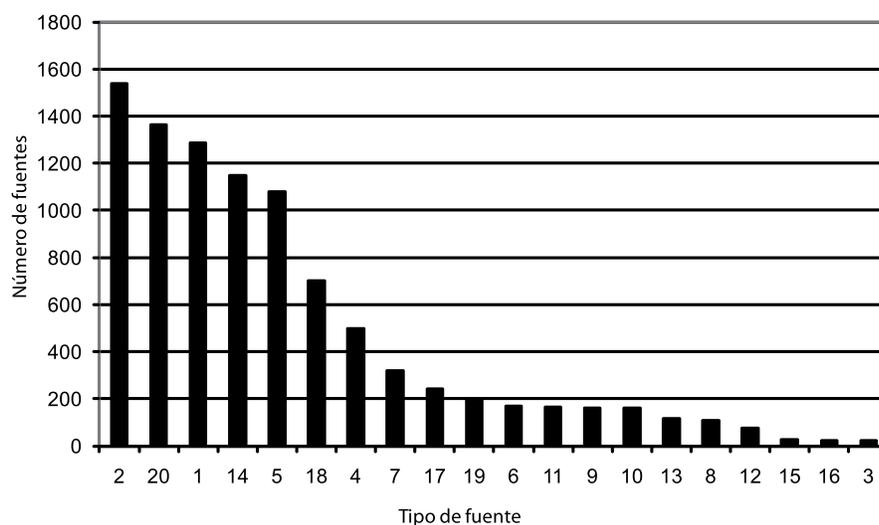


Figura 3.3. Tipos de fuentes fijas en Bogotá (fuente: Inamco, 2001).

(1) Calderas; (2) Hornos; (3) Incinerador; (4) Extrusora inyectora, termoformadora y peletizadora; (5) Soldadura; (6) Extractor; (7) Emisiones fugitivas: proceso de fugas de partículas y vapores producidos por las pinturas y disolventes; (8) Molino y trituración; (9) Planta eléctrica; (10) Mezclador; (11) Quemador; (12) Tanque de galvanizado, cubas; (13) Cabina y torres de atomización para pintura; (14) Estufas, cocina, asador, tostador (trilladoras de café); (15) Silos; (16) Cardadora; (17) Vulcanizadoras, prensas hidráulicas; (18) Sierra, trompo, lijadora, planeadora y otros similares en cuanto a procesos de fabricación de muebles de madera; (19) Bombo (Curtiembre Tunjuelito); (20) Otros: compresor, pantógrafo, flexografía, calentador, razadora, pigmentadora, marmita para destilación y generar vapor, reactores utilizados en laboratorios farmacéuticos.

Tabla 3.1. Procesos industriales en lo que son utilizados los hornos en Bogotá (fuente: Inamco, 2001). Todos los valores se encuentran expresados en términos porcentuales.

Localidad	Fundición	Alimentos	Horneado	Secado	Calentamiento	Curado	Otros*
Kennedy	60	28	5.5	-	-	5.5	
Fontibón	7	60	10	20	2.5	-	
Puente Aranda	20	5	10	10	5	2	50
<b>Totales</b>	<b>22</b>	<b>30</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	

\*Otros: Encauche, forjado, fusión, galvanización, pintura, tostado, precalentamiento y tratamiento térmico.

A pesar de no representar un elevado número de fuentes en Bogotá, en la muestra de industrias que fueron objeto de mediciones directas se incluyeron hornos utilizados para la producción de ladrillo. Esto se debe a que se cuenta con evidencia específica para el caso de Bogotá que demuestra que dichas fuentes tienen un impacto significativo en el inventario de emisiones de contaminantes de la ciudad. Esto se debe, entre otras cosas, a que dichos hornos suelen ser operados con combustibles de baja calidad y haciendo uso de procesos poco tecnificados (Inamco, 2001).

Respecto al tipo de combustible utilizado<sup>3</sup>, en la muestra de industrias seleccionadas para las mediciones, se incluyeron fuentes que utilizan gas natural y carbón, los que a su vez, según será discutido más adelante, representan el mayor porcentaje del consumo industrial del sector formal de la ciudad.

Esto significa que la muestra analizada en este estudio no incluyó fuentes de emisión alimentadas con combustibles líquidos tales como crudos y ACPM de grado industrial. Esto se debe a que durante la campaña de campo y a pesar de los esfuerzos y gestiones adelantadas tanto por funcionarios del CIIA como de la SDA, no fue posible encontrar industrias que usaran estas fuentes y que se encontraran dispuestas a permitir las mediciones de tipo isocinético. Al mismo tiempo, sin embargo, dichas fuentes fueron consideradas al momento de estimar el inventario total de emisiones de la ciudad al hacer uso de la técnica de extrapolación explicada en la Sección 3.5.1.

En lo que tiene que ver con el tamaño de la fuente de combustión, las calderas que fueron incluidas en la muestra de industrias a caracterizar se dividieron en dos categorías de acuerdo a su capacidad de generación de vapor: mayores a 100 BHP y menores o iguales a 100 BHP (1 BHP equivale a 33,470 BTU/h; cada BHP hace referencia a la capacidad de evaporar 15.6 kilogramos de agua a 100 grados centígrados en un espacio de una hora). Este punto de corte (100 BHP) fue definido de acuerdo a la distribución de las capacidades de las calderas que se utilizan en Bogotá (ver Figura 3.4).

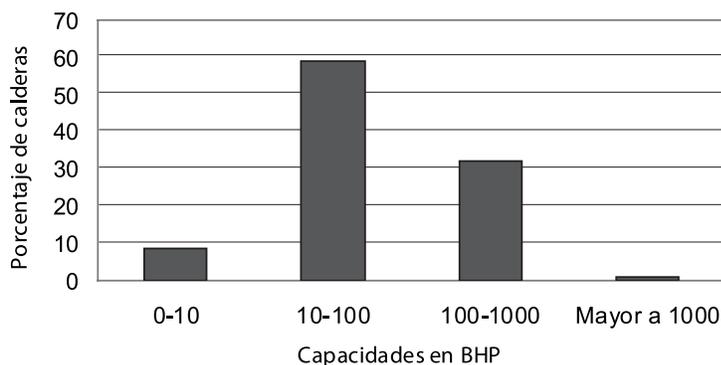
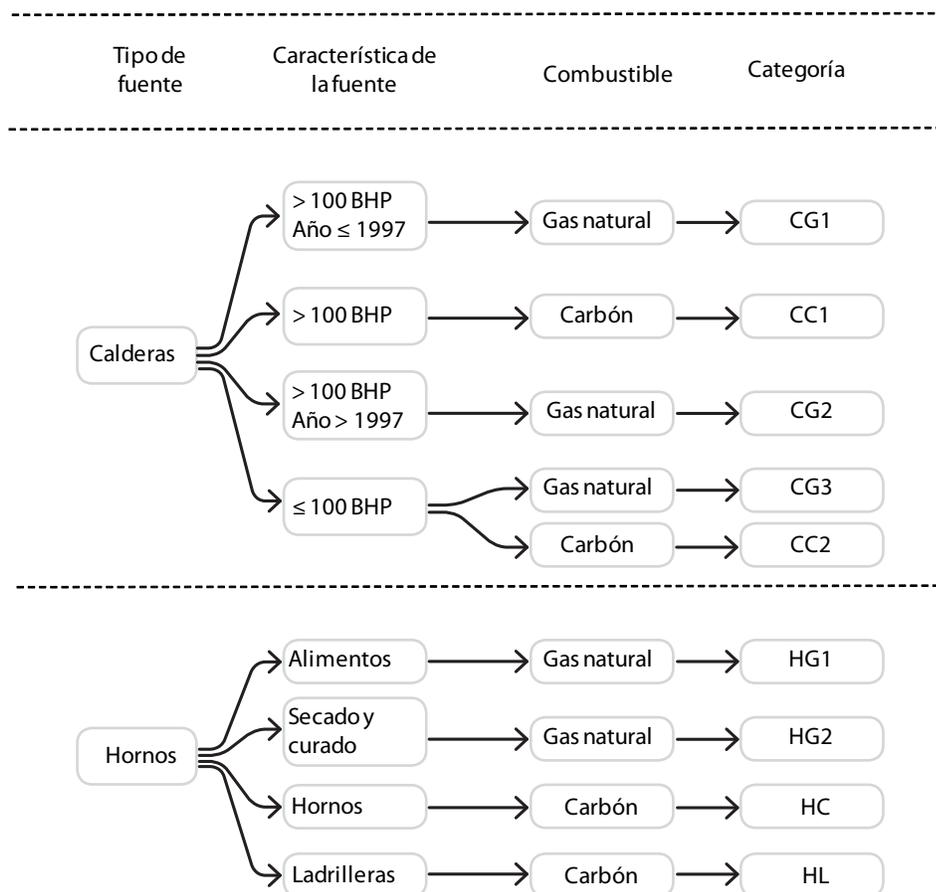


Figura 3.4. Distribución acumulada de frecuencia para los datos de las capacidades de las calderas que se utilizan en Bogotá (fuente: Inamco, 2001).

<sup>3</sup> La clasificación más sencilla de combustibles es aquella que los divide en sólidos, líquidos y gaseosos. Entre los combustibles sólidos se incluyen la madera, el bagazo, el lignito, carbón bituminoso y subbituminoso y el carbón de antracita. Su clasificación depende principalmente de alteraciones progresivas del medio en la que se transforma de lignito a antracita. Entre los combustibles líquidos se encuentran los llamados fuel oil. Estos combustibles se clasifican en dos grandes grupos, los destilados y los residuales. Los destilados incluyen fuel oil 1 (keroseno), fuel oil 2 (diésel) y fuel oil 4; los fuel oil residuales (5 y 6) tienen las características de un crudo denso, ya que son producidos a partir de los residuos de la producción de combustibles livianos como la gasolina, y los fuel oil destilados. En cuanto a los combustibles gaseosos, se tienen en cuenta el gas natural y el gas licuado de petróleo (GLP). El primero, es ampliamente usado en aplicaciones comerciales e industriales. El GLP incluye el gas propano y el butano.

A partir de las consideraciones antes descritas se definieron las siguientes categorías industriales para ser consideradas durante las mediciones realizadas en la campaña de campo (ver Figura 3.5). Dichas categorías fueron al mismo tiempo la base para determinar el inventario de emisiones provenientes de fuentes industriales en la ciudad de Bogotá (ver Sección 3.5).

- Caldera > 100 BHP; gas natural; año de fabricación previo o igual a 1997<sup>4</sup> (CG1).
- Caldera > 100 BHP; gas natural; año de fabricación posterior a 1997 (CG2).
- Caldera ≤ 100 BHP; gas natural (CG3).
- Caldera > 100 BHP; carbón (CC1).
- Caldera ≤ 100 BHP; carbón (CC2).
- Horno de alimentos; gas natural (HG1).
- Horno de secado y curado; gas natural (HG2).
- Horno ladrillero; carbón (HL).
- Horno; carbón (HC).



**Figura 3.5.** Diagrama esquemático de las categorías industriales utilizadas para la determinación del inventario de emisiones.

<sup>4</sup> La consideración del año de fabricación de la caldera fue incluida después de conocer los resultados de los experimentos de emisiones. En éstos, dicha variable demostró tener un impacto significativo en el nivel de contaminación producido por las fuentes.

### 3.1.2. Identificación de fuentes a caracterizar

Una vez seleccionadas las categorías industriales que serían consideradas tanto en la campaña de campo como en el momento de estimar el inventario de emisiones, se procedió a realizar las actividades de consecución de industrias que pertenecieran a dichas categorías y que estuvieran dispuestas a permitir la entrada del personal de la Universidad a sus instalaciones. Para estas gestiones se contó con la colaboración de la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI) y de instituciones tales como la empresa Gas Natural S.A. ESP y el grupo empresarial de tintorerías Asotextil Capital.

Las industrias que manifestaron interés en participar de forma voluntaria (y gratuita) en el proyecto fueron contactadas por personal de la Universidad para afinar los detalles de su participación. El primer paso en este sentido consistió en el diligenciamiento de un formato de recolección de información primaria que fue utilizado para verificar que la fuente en referencia fuese apta para el desarrollo de la pre-visita.

Durante la pre-visita se determinaba si la empresa en cuestión era apta para las mediciones y si las instalaciones de la chimenea permitían adelantar un monitoreo de tipo isocinético. En este sentido el CIIA cuenta con un manual detallado de la forma como se deben realizar estas actividades. Este manual también sirve como herramienta de capacitación para las empresas, a propósito de la configuración requerida en las chimeneas si se desean adelantar este tipo de mediciones.

En el manual en referencia se presentan los puntos principales a considerar en la adecuación de instalaciones y preparación de ductos para la realización de muestreos en chimenea y se describen las especificaciones que deben cumplir los puertos de muestreo (niples) ubicados en los ductos en los cuales se planea realizar un monitoreo isocinético, de acuerdo a los requerimientos de los métodos 1 y 1A de la EPA. Este manual incluye algunos requerimientos que resultan relevantes en cuanto a suministro de energía, área para el muestreo y estructuras necesarias para la realización del mismo.

Durante esta fase del proyecto se contactaron 85 industrias, de las cuales 47 diligenciaron el formato de recolección de información primaria. De estas últimas, 35 fueron visitadas (correspondientes a un total de 42 calderas y 36 hornos).

### 3.1.3. Preparación y capacitación para el personal de campo

Los monitoreos en las chimeneas fueron realizados por dos grupos de trabajo conformados por tres personas cada uno. En estos grupos se contaba con un ingeniero, un técnico y un auxiliar. Además de estas personas, el grupo de trabajo incluye un supervisor encargado de la logística y la coordinación y un auxiliar adicional encargado del ensamblaje de andamios y otros temas varios.

En la etapa de capacitación el personal de campo fue entrenado rigurosamente en los conceptos y detalles técnicos de los métodos 1 al 5, 7 y 8 de la EPA. De esta forma se garantiza que el protocolo de campo no sea visto como un simple procedimiento compuesto por una infinidad de tareas que no tienen relación entre ellas, sino como el resultado de un proceso de diseño en el que cada componente tiene plena justificación.

Adicionalmente, los integrantes del grupo de monitoreo realizaron un curso de manejo de alturas en el cual fueron instruidos en el uso adecuado de elementos de seguridad tales como arneses, cuerdas, nudos de seguridad y sistemas de seguridad. En la Figura 3.6 se pueden observar los accesorios y elementos de seguridad utilizados por todos los miembros de los equipos de campo.



**Figura 3.6.** Integrante del personal de muestreos isocinéticos durante la realización del curso de manejo de implementos para trabajo en alturas.

### 3.2. Campaña de campo

La parte central de esta etapa del proyecto estuvo compuesta por una campaña de campo en la que, entre los meses de octubre de 2007 y febrero de 2008, se realizaron 63 mediciones isocinéticas en chimeneas que fueron utilizadas para la determinación de los factores de emisión de 35 fuentes distintas (incluyendo cuatro fuentes piloto). Estas fuentes incluyeron calderas de gas natural y de carbón, hornos de alimentos, hornos de secado y curado, y hornos para la fabricación de ladrillo. Para el 80% de las fuentes monitoreadas se cuenta con mediciones por duplicado. Ocho de las 20 calderas evaluadas estaban provistas de sistemas de control de emisiones.

Para todos los monitoreos isocinéticos en chimenea se determinaron las concentraciones en el gas efluente de PM, SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>. La Tabla 3.2 resume las principales características de las fuentes que fueron evaluadas mientras que la Tabla 3.3 ilustra la matriz experimental utilizada durante la campaña de campo.

A partir de los datos de concentración de contaminantes en el gas efluente (expresados en términos de mg/dscm<sup>5</sup>), de las condiciones de flujo establecidas durante la medición isocinética, y de las estadísticas de consumo de combustible para la fuente evaluada se determinaron los factores de emisión de los contaminantes bajo estudio (expresados en términos de gramos de contaminante producido por cada tonelada de combustible que es quemada).

<sup>5</sup> mg/dscm = miligramos de contaminante por metro cúbico estándar seco.

Tabla 3.2. Descripción de las fuentes evaluadas en este estudio.

No.	Tipo de fuente	Característica de la fuente	Combustible	Actividad económica de la industria	Categoría	Localidad	Año de fabricación *	Sistema de control de emisiones
1	Horno	Incineración de residuos	Gas Natural	Incineración	Piloto	Teusaquillo	1999	no
2	Caldera	100 BHP	Gas Natural	Fabricación de productos alimenticios	Piloto	Ciudad Bolívar	ND	no
3	Horno	Cocción	Carbón	Elaboración de aceites y grasas	Piloto	Tunjuelito	ND	no
4	Caldera	30 BHP	Diésel	Fabricación de jabones y detergentes	Piloto	Puente Aranda	ND	no
5	Caldera	150 BHP	Gas Natural	Fabricación de productos farmacéuticos	CG1	Puente Aranda	1995	no
9	Caldera	200 BHP	Gas Natural	Fabricación de productos de caucho	CG1	Puente Aranda	1981	no
10	Caldera	500 BHP	Gas Natural	Elaboración de bebidas no alcohólicas	CG1	Kennedy	1997	no
11	Caldera	400 BHP	Gas Natural	Elaboración de bebidas no alcohólicas	CG1	Kennedy	1978	no
6	Caldera	700 BHP	Gas Natural	Elaboración de bebidas no alcohólicas	CG2	Puente Aranda	1998	no
7	Caldera	700 BHP	Gas Natural	Elaboración de bebidas no alcohólicas	CG2	Puente Aranda	1998	no
8	Caldera	150 BHP	Gas Natural	Fabricación de productos farmacéuticos	CG2	Puente Aranda	1999	no
12	Caldera	100 BHP	Gas Natural	Fabricación de productos farmacéuticos	CG3	Puente Aranda	1979	no
13	Caldera	100 BHP	Gas Natural	Fabricación de productos de caucho	CG3	Puente Aranda	1981	no
14	Caldera	100 BHP	Gas Natural	Fabricación de productos alimenticios	CG3	Puente Aranda	1977	no
15	Caldera	50 BHP	Gas Natural	Fabricación de productos alimenticios	CG3	Puente Aranda	1976	no
16	Caldera	40 BHP	Gas Natural	Fabricación de productos alimenticios	CG3	Puente Aranda	1990	no
17	Horno	Cocción	Gas Natural	Fabricación de productos alimenticios	HG1	Puente Aranda	1997	no
18	Horno	Cocción	Gas Natural	Fabricación de productos alimenticios	HG1	Puente Aranda	1995	no
19	Horno	Cocción	Gas Natural	Fabricación de productos alimenticios	HG1	Fontibón	1986	no
20	Horno	Secado o curado	Gas Natural	Fabricación de productos elaborados de metal	HG2	Puente Aranda	2006	no
21	Horno	Secado o curado	Gas Natural	Fabricación de vehículos automotores	HG2	Tunjuelito	ND	no
22	Horno	Secado o curado	Gas Natural	Fabricación de vehículos automotores	HG2	Tunjuelito	ND	no
23	Horno	Secado o curado	Gas Natural	Fabricación de vehículos automotores	HG2	Puente Aranda	1972	no
24	Caldera	120 BHP	Carbón	Fabricación de productos textiles	CC1	Kennedy	ND	Lavador y ciclón
25	Caldera	250 BHP	Carbón	Fabricación de productos textiles	CC1	Puente Aranda	ND	Lavador y ciclón
26	Caldera	200 BHP	Carbón	Fabricación de productos textiles	CC1	Fontibón	2002	Lavador y ciclón
27	Caldera	150 BHP	Carbón	Fabricación de productos textiles	CC1	Antonio Nariño	2004	Lavador y ciclón
28	Caldera	100 BHP	Carbón	Fabricación de productos textiles	CC2	Rafaer Uribe	2004	Lavador y ciclón
29	Caldera	80 BHP	Carbón	Fabricación de productos textiles	CC2	Fontibón	2004	Lavador y ciclón
30	Caldera	80 BHP	Carbón	Fabricación de productos textiles	CC2	Kennedy	1981	Ciclón
31	Caldera	40 BHP	Carbón	Fabricación de productos textiles	CC2	Kennedy	1998	Ciclón
32	Horno	Cocción de ladrillos	Carbón	Ladrillera	HL	Usme	ND	Filtro de malla
33	Horno	Cocción de ladrillos	Carbón	Ladrillera	HL	Usme	1974	Filtro de malla
34	Horno	Cocción de ladrillos	Carbón	Ladrillera	HL	Usme	1970	Filtro de malla
35	Horno	Cocción de ladrillos	Carbón	Ladrillera	HL	Usme	1960	no

ND = Dato no disponible. CG1 = Calderas a gas natural con capacidades mayores a 100 BHP y año de fabricación previo o igual a 1997; CG2 = Calderas a gas natural con capacidades mayores a 100 BHP y año de fabricación posterior a 1997; CG3 = Calderas a gas natural con capacidades inferiores a 100 BHP; HG1 = Hornos de alimentos a gas natural; HG2 = Hornos de secado y curado alimentados con gas natural; CC1 = Calderas a carbón con capacidades mayores a 100 BHP; CC2 = Calderas a carbón con capacidades menores o iguales a 100 BHP; HL = Hornos ladrilleros alimentados con carbón.

NOTA: Para cada una de las categorías industriales consideradas en este estudio se estableció un solo factor de emisión para los contaminantes de interés. Dicho factor de emisión corresponde al valor medio de los factores de emisión encontrados para cada una de las distintas fuentes que fueron evaluadas y que hacían parte de la categoría industrial en referencia (ver Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Matriz experimental utilizada en la campaña de campo.

Combustible	Tipo de fuente	Característica de la fuente	Categoría	No de fuentes muestreadas	No de muestreos realizados
Gas Natural	Caldera	Capacidades mayores a 100 BHP años previos o iguales 1997	CG1	4	6
		Capacidades mayores a 100 BHP años posteriores a 1997	CG2	3	4
		Capacidades menores a 100 BHP	CG3	5	9
	Horno	Secado y curado	HG1	3	6
Cocción		HG2	4	8	
Carbón	Caldera	Capacidades mayores a 100 BHP	CC1	4	9
		Capacidades menores a 100 BHP	CC2	4	8
	Horno	Ladrilleras	HL	4	7
Gas Natural	Horno	Incineración	Piloto	1	3
Gas Natural	Caldera	100 BHP	Piloto	1	1
Carbón	Horno	Cocción	Piloto	1	1
ACPM	Caldera	30 BHP	Piloto	1	1
Total				35	63

NOTA: En cinco de las fuentes no se realizaron análisis por duplicado. En una de las fuentes se llevaron a cabo análisis por triplicado.

### 3.2.1. Instrumentación

Los muestreos isocinéticos se llevaron a cabo con equipos de monitoreo APEX modelo 522. Estos equipos están constituidos por una consola de mando (ver Figura 3.7), un cordón umbilical (ver Figura 3.8) de conexión y el complejo de las cajas fría y caliente (ver Figura 3.9), en donde se lleva a cabo la recolección de las muestras. En la caja fría se encuentran los impactadores que capturan la muestra de SO<sub>x</sub> mientras que en la caja caliente se encuentra el portafiltros (ver Figura 3.10) en donde se recolecta el material particulado. La caja fría y la caja caliente están conectadas con la sonda del equipo, a través de la cual se toma la muestra de gas directamente de la chimenea (ver Figura 3.11).

Adicionalmente, durante los muestreos isocinéticos, se hizo uso de un analizador de combustión (marca Bacharach modelo 300; ver Figura 3.12) para la determinación de las concentraciones de CO y oxígeno así como de balones de captura de NO<sub>x</sub> provistos de solución absorbente para dicho contaminante (ver Figura 3.13).



Figura 3.7. Consola principal del equipo muestreador isocinético Apex 522.



Figura 3.8. Cordón umbilical del equipo Apex 522.



Figura 3.9. Caja fría (izquierda) y caja caliente (derecha) del equipo Apex 522.



Figura 3.10. Portafiltros del equipo Apex 522.



Figura 3.11. Tubo pitot y boquilla de la sonda de captura de muestra.



Figura 3.12. Analizador de combustión Bacharach 300-NSX.



Figura 3.13. Balón de captura de NO<sub>x</sub>.

### 3.2.2. Ensayos isocinéticos

La realización de los muestreos isocinéticos consiste en tomar la muestra de gas directamente del ducto de salida (ver Figura 3.14) y a través de los nipples de muestreo garantizando que la velocidad de succión del equipo es idéntica a la velocidad de salida de los gases de la chimenea.

De acuerdo con el tipo de ducto por el cual son evacuados los gases de la combustión, se determina el número de puntos que se requieren para una documentación apropiada de las condiciones de las emisiones de la fuente. Esto depende de la altura, la localización de los nipples y el diámetro de la chimenea. Antes de llevar a cabo el procedimiento de toma de muestra se calibran diversos componentes del equipo y se verifica que no se presenten fugas en el montaje.

NOTA: Es altamente deseable contar con un largo cordón umbilical de tal forma que la consola de mando y los componentes electrónicos del equipo no requieran estar en la parte alta de los andamios (ver Figura 3.15).

Para el desarrollo de las actividades de campo se contaba con protocolos extensos y detallados que fueron diseñados y preparados por el CIIA y que describen paso a paso las actividades que se deben desarrollar para recolectar las muestras de gases y material particulado que son objeto de un muestreo isocinético. Estos documentos incluyen, entre otros, 1) Protocolo de adecuación de instalaciones y preparación de ductos; 2) Metodología para la determinación de material particulado en fuentes estacionarias de emisión; 3) Protocolo para determinación de óxidos de nitrógeno en emisiones de chimenea; 4) Protocolo para la determinación de dióxido de azufre en fuentes estacionarias de emisión.

El protocolo para determinación de óxidos de nitrógeno en fuentes estacionarias de emisión permite la determinación de las concentraciones en el rango entre 2 y 400 mg/m<sup>3</sup> (base seca). La muestra es extraída de acuerdo a lo establecido en el método 7 de la EPA. El método se basa en una determinación colorimétrica usando el procedimiento del ácido fenildisulfónico.

El protocolo para la determinación de dióxido de azufre en fuentes estacionarias de emisión permite determinar la concentración de dicho contaminante en los gases emitidos por una chimenea. La muestra es extraída isocinéticamente de acuerdo a lo establecido en el método 8 de la EPA. La determinación de la concentración de dióxido de azufre se realiza mediante el empleo de una solución de peróxido de hidrógeno que permite oxidar el SO<sub>2</sub> a SO<sub>4</sub> para que éste sea determinado mediante titulación empleando el método del bario-torina (Método 6 de la EPA).



Figura 3.14. Montaje de las caja fría y caliente durante un monitoreo en chimenea.

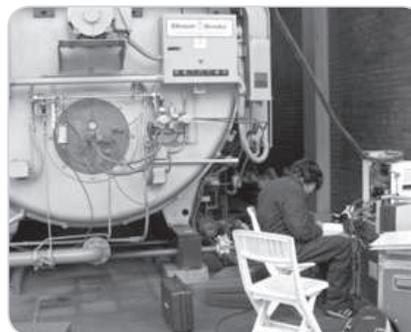


Figura 3.15. Consola del mando durante un muestreo isocinético.

### 3.2.3. Controles de calidad

Con una frecuencia diaria se realizaron controles para asegurar el buen funcionamiento de los diferentes elementos del equipo isocinético. Como parte de dichos controles se verifican los flujos generados por el muestreador y la presencia de fugas en los montajes utilizados con el fin de asegurar el buen funcionamiento del sistema de medición de volumen. Del mismo modo, con una frecuencia semanal se verificó el desempeño del equipo de campo haciendo uso de los denominados orificios de calibración (ver Figura 3.16).



Figura 3.16. Orificios de calibración del equipo Apex 522.

## 3.3. Ensayos de laboratorio

Una vez recolectadas las muestras mediante la metodología antes descrita, fueron transportadas al laboratorio para ser sometidas a procesos analíticos a través de los cuales se determinan las concentraciones de las especies de interés.

### 3.3.1. Determinaciones de NO<sub>x</sub>

Para el caso de los NO<sub>x</sub>, el método del laboratorio se basa en una determinación colorimétrica usando el procedimiento del ácido fenildisulfónico. En éste, mediante el empleo de una solución absorbente se recolecta muestra del gas de chimenea, el cual inevitablemente contendrá dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y óxido nítrico (NO). Después de transcurridas 16 horas contadas a partir del momento en el que termina el muestreo en la chimenea, es posible suponer que todo el óxido nítrico ha sido oxidado y se ha convertido en dióxido de nitrógeno.

El NO<sub>2</sub> se disuelve entonces en la solución absorbente generando iones nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) y nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Los iones nitrito son oxidados a iones nitrato mediante el empleo de ácido sulfúrico. La cuantificación de los iones nitrato se efectúa mediante la formación de un nitroderivado con el ácido fenildisulfónico, el cual en medio alcalino desarrolla una coloración amarilla y presenta absorbancia a los 410 nm. De esta forma se hace posible su determinación mediante espectroscopia UV/Vis.

El control de calidad para las muestras de NO<sub>x</sub> incluye las componentes de seguimiento, análisis de blancos, comparación con soluciones patrón de concentración conocida y determinación del límite de detección de la técnica analítica.

El seguimiento de las muestras de NO<sub>x</sub> se lleva a cabo realizando mediciones de presión y temperatura en el momento de la toma de muestra en campo y antes de ser analizada en el laboratorio. En este sentido se verifica que el recipiente con la muestra cuente con algo de presión negativa al momento de abrir el sello. Esto se debe a que al momento de la toma de la muestra en campo los gases se encuentran calientes (proviene de una chimenea) y de esta forma se espera una reducción en la presión interna del envase asociada con la reducción en la temperatura de la solución durante el período de reposo de la misma. Si el vacío en referencia no es detectable al momento de abrir el sello, muy probablemente se presentaron fugas durante el transporte o el período de reposo de la muestra.

El análisis de blancos para las muestras de NO<sub>x</sub> se realizó para verificar la conveniencia y estabilidad de las curvas de calibración. Estas verificaciones se realizaron en condiciones en las que el analista conoce cual debe ser el resultado así como bajo condiciones de desconocimiento de esta información por parte del analista. La verificación se considera satisfactoria si se presenta una variación igual o inferior al 7%.

De forma similar, se llevan a cabo verificaciones con muestras estándar de concentración conocida en donde el objetivo es verificar la correspondencia entre el procedimiento implementado y la curva de calibración asignada al analista. La verificación se considera satisfactoria si se presenta una variación igual o inferior al 7%.

El límite de detección indica el valor en el cual las concentraciones del contaminante pueden ser detectadas de acuerdo con el método utilizado. Este límite obedece a la precisión de los equipos o instrumentos utilizados en el procedimiento. Para el caso de los óxidos de nitrógeno, el límite de detección se encuentra ligado a la lectura del equipo de espectrofotometría.

### 3.3.2. Determinaciones de SO<sub>x</sub>

La determinación de la concentración de dióxido de azufre se realiza mediante el empleo de una solución de peróxido de hidrógeno sobre la cual se recolectan los gases emitidos en la chimenea. Esta solución permite oxidar el dióxido de azufre presente a sulfato (SO<sub>4</sub><sup>=</sup>), el cual es determinado mediante titulación empleando el método del bario-torina (ver Figura 3.17). Este indicador otorga a la muestra un color anaranjado fuerte, que luego de la titulación y al presentarse un exceso de bario cambia a tonalidad rosada.

Al igual que en el caso de los NO<sub>x</sub>, las muestras de óxidos de azufre deben someterse a permanentes controles y verificaciones para evitar e identificar problemas que pueden presentarse durante el transporte y almacenamiento de las mismas. En este sentido, las muestras recolectadas se almacenan en un frasco ámbar en el cual se identifica el nivel de solución absorbente para ser verificado al llegar al laboratorio. Si a través de este sistema es posible detectar una pérdida de muestra, ésta es descartada para análisis posteriores.



Figura 3.17. Titulación para determinación de dióxido de azufre.

El control de blancos para muestras de  $SO_x$  se realizó con una frecuencia semanal. Esta verificación se hizo sin que el analista conociera los resultados esperados y de tal forma que el tratamiento dado a los blancos fuese idéntico al tratamiento de una muestra convencional. Los blancos fueron preparados con agua destilada y desionizada en un recipiente igual a los utilizados en campo. Además del control de blancos se llevaron a cabo verificaciones referentes a la exactitud de la metodología a partir de determinaciones de soluciones con concentraciones conocidas. Finalmente, se llevaron a cabo las pruebas específicas para determinar el límite de detección de la técnica analítica utilizada. En este caso, dicho límite fue función del analista, la bureta para la titulación y la celeridad para determinar el cambio de color del indicador.

### 3.3.3. Determinaciones de material particulado

El método analítico de material particulado se basa en una determinación gravimétrica de los filtros utilizados en campo. En este caso se analiza la muestra tomada por medio de un filtro de fibra de vidrio y un lavado realizado en la sonda con la cual se toma la muestra. La masa de material particulado se determina luego de un acondicionamiento que consiste en someter la muestra a condiciones ambientales controladas. El acondicionamiento se realiza en el filtro antes y después de ser tomada la muestra. Adicionalmente, se lleva a cabo el acondicionamiento de los recipientes en los cuales se realiza el secado de la muestra de material particulado proveniente del lavado de la sonda con la que se toma la muestra.

Durante la campaña de recolección de muestras se utilizaron filtros de fibra de vidrio (Marca Whatman) para garantizar la no reactividad del material allí atrapado. Estos filtros son de 4 pulgadas de diámetro y de un tamaño de poro de 0.6 micrómetros (ver figuras 3.18 y 3.19). Todos los análisis de gravimetría se llevaron a cabo haciendo uso de una balanza de cuatro dígitos de precisión.



Figura 3.18. Filtros utilizados para la recolección del material particulado.

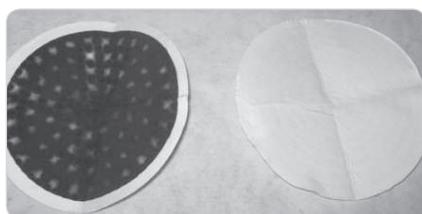


Figura 3.19. Filtros usados en monitoreos isocinéticos en chimeneas.

A la izquierda un filtro proveniente de una fuente que utiliza carbón y a la derecha un filtro proveniente de una fuente que utiliza gas natural.

Los controles de calidad para las muestras de material particulado tienen que ver con el aseguramiento de las condiciones en que las muestras son pesadas. Del mismo modo existen controles para que el proceso de acondicionamiento tanto de los recipientes y los filtros sea apropiado y garantice sus propios objetivos. En este sentido, el peso obtenido de los filtros después de un proceso de acondicionamiento por período de 24 horas es comparado con el peso obtenido para los mismos filtros después de ser sometidos a procesos de acondicionamiento más extensos.

Durante la campaña de campo, los controles para estos análisis fueron realizados con una frecuencia mensual y en todos los casos se obtuvieron resultados satisfactorios. Del mismo modo, la balanza utilizada en los análisis fue sometida a permanentes comparaciones (frecuencia semanal) con una pesa de verificación. En este caso, el 100% de las verificaciones fueron satisfactorias.

### 3.4. Determinación del inventario de fuentes

La metodología utilizada para la construcción del inventario de fuentes estuvo compuesta por tres etapas: **1)** En primer lugar se llevaron a cabo una serie de actividades preliminares y preparatorias para el complejo ejercicio de recopilar la información en campo a través de encuestas y recorridos en las localidades de interés; **2)** La parte central de esta parte del proyecto tuvo que ver con un proceso de empadronamiento en el que se visitaron cerca de 3,000 industrias a las cuales se les solicitó diligenciar un formulario con preguntas referentes a los procesos de combustión utilizados como parte de su actividad económica; **3)** Gracias a la colaboración del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) se realizó un detallado análisis de fotografías aéreas de Bogotá a partir de las cuales se determinó el número de chimeneas industriales presentes en las localidades de interés.

#### 3.4.1. Actividades preliminares y preparatorias

La primera actividad desarrollada en esta parte del proyecto tuvo que ver con la consecución de la base de datos actualizada de la industria manufacturera de Bogotá compilada por la Cámara de Comercio de Bogotá (CCB). Esta fuente de información se construye a partir de la auto-clasificación por actividad económica que los afiliados a dicha entidad realizan haciendo uso del código del Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU).

La base de datos utilizada en este estudio hace referencia a aquellas empresas cuya matrícula hubiese sido renovada en los años 2006, 2007 y 2008 e incluye información referente a: Nit, matrícula, tipo de sociedad, razón social, representante legal, dirección, teléfono, fax, tamaño, barrio, localidad, actividad económica, código CIIU, fecha de matrícula, fecha de última renovación, fecha de constitución, cantidad de establecimientos, personal y categoría.

Esta información fue complementada con información disponible en la SDA dado que no todas las industrias en Bogotá se encuentran registradas en la CCB. Esto hace referencia a organizaciones informales que de todas formas han sido objeto de seguimiento por parte de la autoridad ambiental. Para este proceso fue necesario que en algunos casos se revisara la información consignada en expedientes existentes en la SDA.

Otra actividad preliminar fue el diseño del formato de captura de datos que sería utilizado durante el proceso de recolección de información en las visitas a las industrias. Este diseño tuvo en cuenta no sólo los requerimientos de información sino también el nivel técnico de quienes estarían a cargo de su diligenciamiento. De esta forma se buscó capturar la información necesaria de manera eficaz y lo más sencilla posible para los actores involucrados. Este formato fue revisado y avalado por personal de la SDA.

El formato de captura de datos incluye no sólo información básica de la industria, tal como la razón social y la información de contacto del representante legal, sino también estadísticas referentes a los procesos de combustión y a la actividad económica de la misma. En dicho formato se solicitan los siguientes elementos: georreferenciación, razón social, actividad productiva, código CIIU, Nit, tamaño de la industria, dirección, teléfono, localidad, tipo de fuente, descripción del proceso de combustión, capacidad del equipo de combustión utilizado, tipo de combustible, consumo de combustible, año de fabricación y marca del equipo de combustión, tiempo de operación, estacionalidad en la operación, tipo de sistema de control de emisiones, presencia de nipples para un muestro isocinético.

No todas las empresas presentes en la base de datos de industria manufacturera fueron objeto de las visitas de campo. Esto se debe no sólo a la dificultad logística de visitar decenas de miles de empresas sino también a que no todos los procesos productivos generan descargas de contaminantes a la atmósfera. De esta forma, antes de iniciar el proceso de empadronamiento (ver Sección 3.4.2.1), se llevó a cabo una selección de las industrias y fuentes que serían parte del mismo.

#### 3.4.1.1. Selección y capacitación de empadronadores

Para la realización del trabajo de campo en lo que se refiere a visitas a industrias y el diligenciamiento de los formatos respectivos se contó con un equipo de 15 personas conformado por ingenieros y técnicos que fueron específicamente entrenados para estas labores.

En las capacitaciones al equipo de empadronadores (ver Figura 3.20), las cuales tuvieron una duración aproximada de cuatro horas, se hizo especial énfasis en dotar a estas personas del criterio requerido para que estuvieran en la capacidad de juzgar la veracidad de la información reportada por las industrias. Con esto se pretendía obtener calidad, eficiencia y uniformidad de criterios durante la recopilación de los datos de campo.



Figura 3.20. Capacitación al equipo de empadronadores.

Para lograr un diligenciamiento adecuado de los formatos de captura de datos las capacitaciones cubrieron los siguientes temas: aspectos generales sobre la construcción de un inventario de fuentes; importancia del ejercicio y metodologías típicas; criterios de selección de fuentes a inventariar; tipos de fuentes a inventariar; necesidades y tipo de información a recopilar; técnicas de aproximación al industrial; aspectos generales de ubicación en campo y manejo del material de campaña.

Del mismo modo, durante las capacitaciones en referencia se hizo gran énfasis en las estrategias para lograr un diligenciamiento apropiado de los formatos y por lo mismo se dedicó una buena parte del tiempo a explicaciones detalladas referentes a la estructura de la encuesta, el significado de cada campo, su importancia, y las condiciones para que las entradas fueran consideradas válidas.

Finalmente, todos los empadronadores fueron provistos de material distintivo de la Universidad así como de un carné que certificaba su participación en un proyecto financiado por la SDA. Del mismo modo, todas las personas portaban una comunicación oficial explicando los alcances y objetivos generales del estudio.

### 3.4.2. Recorridos en campo y visitas a industrias

Las visitas a las industrias que fueron parte de esta etapa del proyecto fueron planeadas haciendo uso de la información consignada en las bases de datos provistas por la CCB y la SDA. En todos los casos, de forma previa a la visita se dieron comunicaciones previas (telefónicas y por escrito) con algún funcionario de la empresa. Tal y como fue mencionado anteriormente, el empadronamiento y las visitas para recolección de información técnica no fueron llevadas a cabo para la totalidad de las organizaciones y empresas que hacen parte de las bases de datos utilizadas en este trabajo.

Para el caso de la base de datos suministrada por la SDA, la cual contaba con cerca de 1,500 registros (un registro para cada industria), se llevó a cabo un cuidadoso y complejo proceso de depuración de la información de tal forma que fueron seleccionados 323 registros como industrias que calificaban para ser objeto de una visita técnica. En dicho proceso de depuración se eliminaron fuentes que no correspondieran a hornos y calderas así como aquellas consideradas de bajo impacto, tales como pequeños restaurantes y asaderos.

Algo similar ocurrió con la base de datos provista por la CCB, la cual contaba originalmente con más de 45,000 registros (un registro para cada industria) de los cuales, después del proceso de depuración y validación, fueron seleccionados 4,500 registros. En este caso el proceso de depuración consistió en verificar registros repetidos e industrias incorrectamente clasificadas así como en la selección de aquellas empresas de tamaño considerable y en donde se presentarían procesos de combustión como parte de su actividad económica. Adicionalmente, se verificó que aquellas industrias que hacían parte de la base de datos de la SDA no fueran incluidas nuevamente en el conjunto de empresas aptas para las visitas técnicas.

Todas las 323 industrias seleccionadas a partir de la base de datos suministrada por la SDA fueron visitadas por funcionarios del CIIA durante esta etapa del proyecto. Este no fue el caso para las industrias seleccionadas a partir de la base de datos suministrada por la CCB, en donde fue posible visitar 2,412 de las 4,500 industrias seleccionadas inicialmente.

Esta sub-selección fue llevada a cabo de acuerdo a la distribución geográfica de las fuentes de emisión en Bogotá, en donde según registros del Departamento Nacional de Estadísticas (DANE) las localidades de Puente Aranda, Fontibón, Kennedy y Engativá concentran (en ese orden) la mayor actividad industrial manufacturera de la ciudad (en estas cuatro localidades se genera el 78% de la producción de la ciudad).

De esta forma, durante el proceso de empadronamiento se agotaron primero todos los registros que hacían referencia a estas localidades para luego dar paso a industrias localizadas en Los Mártires, Barrios Unidos, Antonio Nariño, Tunjuelito, Suba y Bosa. Finalmente, se incluyeron clínicas, hospitales, incineradores y hornos crematorios localizados en diversas localidades de la ciudad.

#### **3.4.2.1. Recolección de información en las fuentes seleccionadas**

La principal actividad desarrollada en esta parte del proyecto consistió en la realización de una campaña de campo entre los meses de junio y julio de 2008 en la que se llevaron a cabo visitas técnicas a 2,735 establecimientos, incluyendo 2,687 industrias manufactureras, 43 hospitales y clínicas y 5 salas de cremación. De estos establecimientos se logró recopilar información útil para 2,250 de ellos (correspondiente a un porcentaje de éxito superior al 80% durante la recolección de datos).

Durante estas visitas los empadronadores no sólo solicitaban el diligenciamiento del formato de captura de datos sino que llevaban a cabo una verificación in-situ de la información allí suministrada. Adicionalmente, todo visitador fue provisto de un equipo GPS (sistema de posicionamiento global por sus siglas en inglés) y una cámara fotográfica digital para documentar la ubicación georreferenciada de la industria visitada y las condiciones generales de las fuentes de combustión. Para efectos de control de calidad de la información, todo visitador debía diligenciar un formato de cadena de custodia que incluía una lista de chequeo de actividades a desarrollar en cada visita.

Durante las visitas se hacía el mayor esfuerzo para que la persona más idónea disponible en ese momento en la empresa fuera la encargada de suministrar la información para diligenciar el formato de captura de datos. En los casos en los que era posible, se solicitaba acceso a documentos de soporte de la información consignada en dicho formato, tales como reportes para la autoridad ambiental y resultados de estudios isocinéticos previos.

En numerosas oportunidades, el trabajo de ubicación de industrias y de verificación de información básica de las mismas fue una de las tareas más arduas. Esto se debe no sólo a problemas e inconsistencias presentes en las base de datos consultadas sino también a las grandes limitaciones que aun persisten en la asignación de direcciones en predios de Bogotá. Por ejemplo, la Figura 3.21 ilustra un caso en el que un mismo establecimiento contaba con tres direcciones distintas.



Figura 3.21. Imagen de uno de los locales industriales visitados.

### 3.4.3. Análisis de fotografía aérea

Como parte de la información recopilada para la construcción del inventario de fuentes y convirtiéndose a la vez en uno de los principales insumos para la determinación del inventario de emisiones para fuentes industriales en Bogotá, en esta parte del proyecto se hizo uso de una novedosa metodología en la que el número de chimeneas fue estimado a partir de un análisis de fotografías aéreas.

Para hacer esto posible se contó con la colaboración del IGAC, entidad que proporcionó copias digitales de fotografías aéreas tomadas recientemente (diciembre de 2007) a baja altura y de alta resolución. Estas imágenes fueron asociadas con un mapa georreferenciado de Bogotá haciendo uso de un sistema de información geográfico.

Tal y como ha sido mencionado en otras partes de este documento, si bien es posible encontrar algún tipo de actividad industrial en todas las localidades de Bogotá, es igualmente cierto que dicha actividad se encuentra focalizada en las localidades de Puente Aranda, Fontibón, Kennedy y Engativá. Por esta razón, durante el análisis de fotografías aéreas encaminado al conteo de chimeneas industriales en la ciudad se hizo énfasis en dichas localidades.

Durante estos análisis, funcionarios del CIIA llevaron a cabo un detallado y minucioso proceso de inspección visual de las imágenes digitales, en las cuales se marcaba la posición de cada chimenea para la cual se lograba una identificación positiva (ver Figura 3.22).

Como parte de este proceso se logró una clasificación de las chimeneas de acuerdo a la incertidumbre asociada con su identificación: a) Ductos plenamente identificables por medio de las fotos aéreas; b) Posibles ductos. Estas dos cantidades fueron consideradas al momento de calcular el inventario de chimeneas de la ciudad.



Figura 3.22. Fotografía aérea usada para la determinación del inventario de chimeneas.

### 3.5. Estimación del inventario de emisiones industriales

El cálculo de emisiones totales producidas por el sector industrial se llevó a cabo utilizando la siguiente ecuación:

$$E = \sum Fe_{i,j} \cdot A_j \cdot Nf_j$$

En donde  $Fe_{i,j}$  ( $g \text{ ton}^{-1}$ ) corresponde al factor de emisión<sup>6</sup> para el contaminante  $i$  (PM,  $SO_x$ ,  $NO_x$ ) para la categoría industrial  $j$ <sup>7</sup> (CG1, CG2, CG3, CC1, CC2, HG1, HG2, HL, HC);  $A_j$  es el nivel de actividad ( $\text{ton dia}^{-1}$ ) o de consumo de combustible para la fuente correspondiente a la categoría industrial  $j$ ;  $Nf_j$  es el número de fuentes que pertenecen a la categoría  $j$ .

Los factores de emisión para cada contaminante y para cada categoría industrial se obtuvieron de acuerdo a la metodología presentada en las secciones anteriores, a partir de los ensayos isocinéticos en las chimeneas evaluadas en las campañas de campo. En este sentido se supone que los valores encontrados en dichas mediciones son representativos para todas las industrias localizadas en la ciudad de Bogotá. Del mismo modo, esta metodología supone que las categorías industriales utilizadas (ver Sección 3.1.1) son representativas de todo el parque industrial de la ciudad.

El nivel de actividad o de consumo de combustible se obtuvo de los registros logrados durante el inventario de fuentes (ver Sección 3.4) a partir de las encuestas y las visitas técnicas a las industrias. Estos valores fueron comparados y ajustados de acuerdo al balance energético de la ciudad (consumos de combustibles líquidos, sólidos y gaseosos) suministrado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) del Ministerio de Minas y Energía.

Al igual que el nivel de actividad, el número de fuentes de cada categoría industrial se obtuvo del inventario de fuentes realizado a través de las visitas técnicas y el empadronamiento. Sin embargo, al momento de estimar el inventario total de emisiones en la ciudad, estos valores fueron ajustados de acuerdo al inventario de chimeneas que fue generado a partir del análisis de fotografía aérea (ver Sección 3.4.3).

Dadas las limitaciones asociadas a cualquier esfuerzo encaminado a la construcción de un inventario de emisiones, es común que durante la etapa de recolección de información en campo no se logre documentar la totalidad de las categorías industriales presentes en la ciudad o zona bajo estudio. Este proyecto no fue la excepción a esta regla y durante la etapa de campo del mismo no se consideraron los siguientes tipos de fuentes de combustión: a) hornos crematorios o de incineración; b) hornos de fundición operados con gas natural; c) fuentes operadas con combustibles líquidos; d) fuentes operadas con gas licuado de petróleo (GLP).

En la mayoría de los casos esta limitación estuvo asociada a la imposibilidad de encontrar empresas que hicieran uso de estos combustibles y que se encontraran dispuestas a participar en el estudio.

#### 3.5.1. Extrapolación de emisiones

La ecuación mostrada en la sección anterior fue aplicada caso a caso para cada una de las chimeneas para las cuales se contaba con información obtenida de forma primaria y como parte de este estudio. El inventario de emisiones para toda la ciudad fue calculado en primera instancia suponiendo que dichas chimeneas constituían el 100% de las fuentes de la ciudad.

Posteriormente, este inventario de emisiones fue extrapolado para todas las fuentes de la ciudad utilizando los siguientes criterios: 1) En primer lugar, se extrapolaron los resultados de emisiones haciendo uso del censo de chimeneas generado a partir de los análisis con fotografías aéreas, de tal forma que se lograra considerar aquellas fuentes que no fueron visitadas durante la etapa de empadronamiento. 2) Adicionalmente, los resultados fueron ajustados teniendo en cuenta que las categorías industriales utilizadas para la determinación del inventario de emisiones no lograron cubrir todas las categorías industriales que existen en la ciudad.

<sup>6</sup> El factor de emisión para combustibles gaseosos fue expresado en unidades de  $g \text{ m}^{-3}$ . Para estos mismos combustibles, el factor de actividad se expresó en  $\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$ .

<sup>7</sup> Ver Sección 3.1.1.

Durante la aplicación de estos dos criterios de extrapolación se supuso que la distribución y contribución relativa a las emisiones totales de contaminantes por parte de las fuentes que no fueron estudiadas de manera directa en este proyecto, son equivalentes y uniformes a su distribución y contribución relativa al inventario de fuentes y al balance energético de la ciudad<sup>8</sup>.

Es claro que este procedimiento representa una fuente significativa de incertidumbre para los resultados finales (ver Sección 5). Sin embargo, los valores generados haciendo uso de esta metodología son de todas formas bastante más confiables y acertados que los que se pueden generar a partir de procedimientos teóricos basados en factores de emisión que han sido determinados para condiciones distintas a las que se presentan en la ciudad.

---

<sup>8</sup> La extrapolación para el caso del inventario de chimeneas corresponde a un ajuste al alza del 53% (ver Sección 4.2). Para el caso de las fuentes no consideradas durante el levantamiento de información para la determinación de los factores de emisión, el ajuste al alza es del 26% (ver Figura 4.5).

# 4. Resultados

En este capítulo se presentan los principales resultados de esta etapa del proyecto. En primer lugar se muestran los resultados asociados con el inventario de fuentes industriales en Bogotá, especificando su distribución por tipo de fuente y tipo de proceso productivo. A continuación se ilustran los resultados obtenidos para los factores de emisión de la industria de la ciudad así como los referentes a estadísticas de consumo de combustible. Finalmente, se presentan los resultados del inventario actualizado de emisiones de gases contaminantes y material particulado.

## 4.1. Inventario de fuentes – la industria de Bogotá

La Tabla 4.1 y la Figura 4.1 presentan un resumen de la información obtenida en el inventario de fuentes en el que fueron visitados un total de 2,735 establecimientos industriales. Estos resultados indican que menos del 30% de las industrias catalogadas como manufactureras cuentan en realidad con procesos que generan descargas a la atmósfera.

Al mismo tiempo, estos resultados confirman lo documentado en diversos estudios previos, al demostrar que Puente Aranda es al mismo tiempo la localidad con el mayor número de empresas que cuentan con fuentes de emisión así como la localidad con el mayor número de chimeneas (ver Figura 4.2). En cuanto al número de calderas, Puente Aranda concentra el mayor número de las mismas, seguido por Fontibón y Kennedy. Para el caso de los hornos, Fontibón presenta el mayor número seguido por Puente Aranda y Kennedy.

Tabla 4.1. Resumen de la información recopilada en las visitas de campo.

Características del establecimiento visitado	Número
Sin fuente de emisión por combustión	1,246
Con fuente de emisión por combustión	795
Sin información	485
Con información pero se presentó algunos de estos inconvenientes:	
Es una bodega, comercializa o no corresponde a industria manufacturera	129
La planta de producción queda fuera de Bogotá o en otra localidad	57
Empresa cerrada o en proceso de liquidación	21
Empresa en proceso de reestructuración	2
<b>TOTAL ESTABLECIMIENTOS</b>	<b>2,735</b>

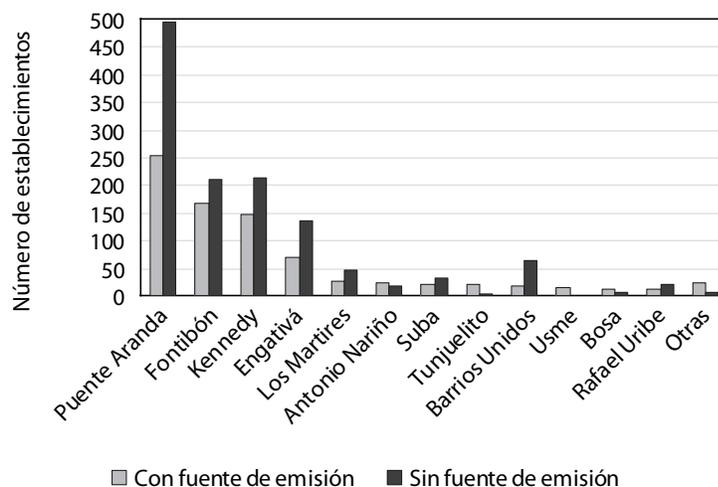


Figura 4.1. Número de establecimientos encuestados distribuidos por localidad.

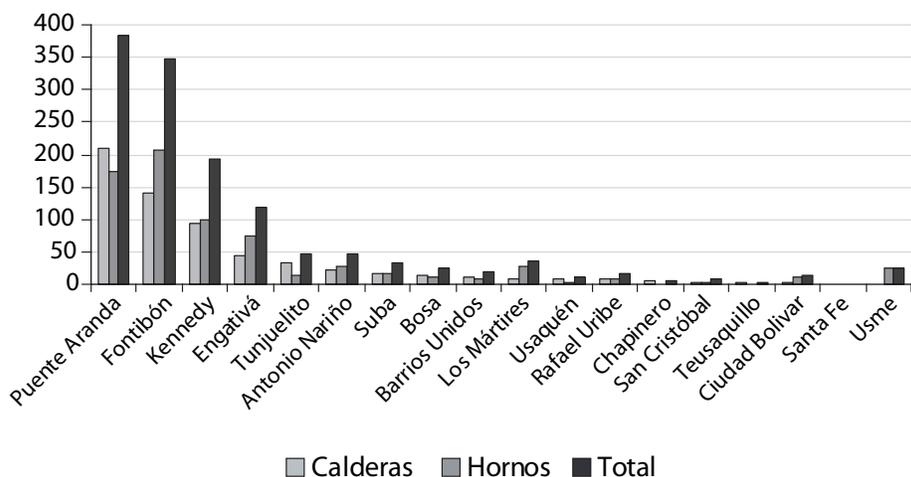


Figura 4.2. Distribución de las fuentes existentes según el proceso de combustión.

Las industrias encuestadas pertenecen a diferentes sectores productivos (ver Figura 4.3) dentro de los cuales se destacan los de alimentos y bebidas, químico, fabricación de productos elaborados en metal, fabricación de maquinaria y equipo, textiles, fabricación de productos de cauchos y ensamble de vehículos y fabricación de autopartes. Estos sectores representan el 65% de las encuestas realizadas.

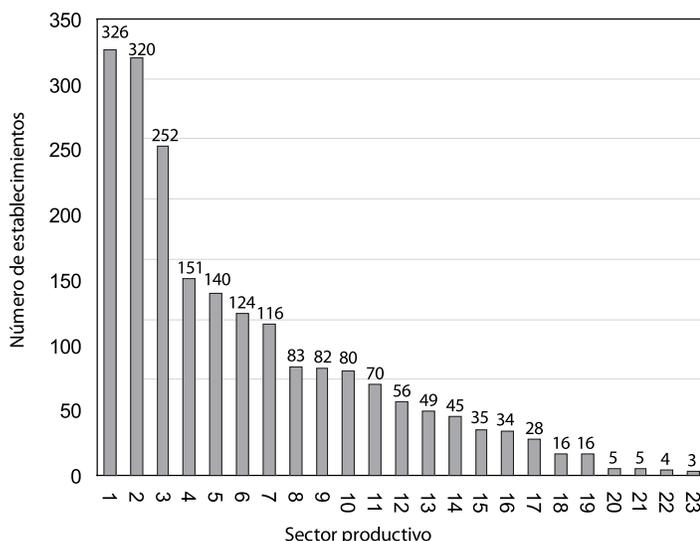
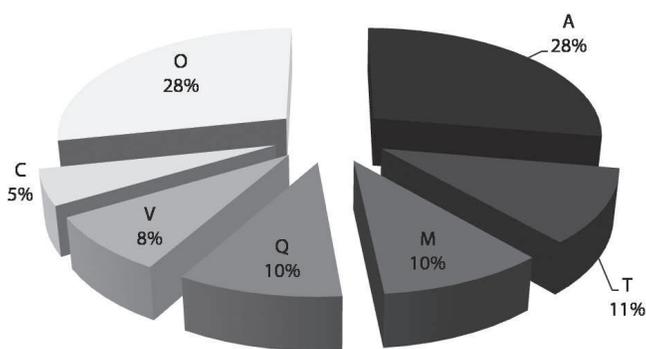


Figura 4.3. Clasificación de establecimientos encuestados por sector productivo.

1: Elaboración de productos alimenticios y bebidas; 2: Fabricación de sustancias y productos químicos; 3: Fabricación de productos elaborados de metal, excepto maquinaria y equipo; 4: Fabricación y acabado de productos textiles; 5: Fabricación de maquinaria y equipo (incluye médico, óptico, de oficina, y eléctrico); 6: Fabricación de productos de caucho; 7: Fabricación de vehículos automotores, carrocerías y autopartes; 8: Fabricación de productos de plástico; 9: Confección de prendas y artículos con materiales textiles; 10: Fabricación de muebles y otras industrias manufactureras; 11: Fabricación de productos metalúrgicos básicos; 12: Fabricación de papel, cartón y productos de papel y cartón; 13: Otras no manufactureras; 14: Hospitales y clínicas; 15: Transformación de la madera y fabricación de productos de madera y de corcho; 16: Actividades de edición e impresión y de reproducción de grabaciones; 17: Fabricación de otros productos minerales no metálicos; 18: Curtido y preparado de cueros, fabricación de calzado, fabricación de artículos de viaje; 19: Coquización, fabricación de productos de la refinación del petróleo y combustible nuclear; 20: ND; 21: Funerarias y salas de cremación; 22: Reciclaje; 23: Otros servicios sociales y de salud.

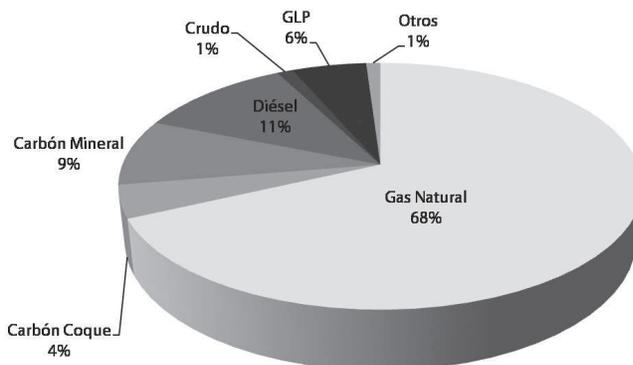
La Figura 4.4 muestra la distribución del número de fuentes (chimeneas) asociadas con los diferentes sectores industriales de la ciudad. En este caso, los sectores de fabricación de productos alimenticios y bebidas, de fabricación y acabado de productos textiles, y de fabricación de productos de metal corresponden al 50% de las fuentes existentes en la ciudad.

La Figura 4.5 muestra la importancia del gas natural como combustible en la industria bogotana en donde 2 de cada 3 empresas hacen uso del mismo. En este punto, sin embargo, es necesario aclarar que esto no significa que estas industrias hagan uso exclusivo de este combustible. Por el contrario, debido a la relativa inestabilidad en el suministro de gas natural a la industria, la gran mayoría de hornos y calderas que se alimentan de este combustible son de tipo dual, es decir, corresponden a sistemas de combustión que pueden operar tanto con gas natural como con ACPM o carbón.



**Figura 4.4.** Participación por sector productivo al número de chimeneas en Bogotá.

A: Elaboración de productos alimenticios y bebidas; T: Fabricación y acabado de productos textiles; M: Fabricación de productos elaborados de metal, excepto maquinaria y equipo; Q: Fabricación de sustancias y productos químicos; V: Fabricación de vehículos automotores, carrocerías y autopartes; C: Fabricación de productos de caucho; O: Otras.



**Figura 4.5.** Distribución de industrias de acuerdo al combustible utilizado (sector formal)

Nota: estos valores no corresponden a niveles de consumo de combustible. Otros = aceite usado, carbón vegetal, fuel oil 3, gasolina, carbón bituminoso.

NOTA: Los resultados mostrados en la Figura 4.5 fueron utilizados durante el proceso de extrapolación del inventario de emisiones (ver Sección 3.5.1), al momento de considerar en dicho inventario las fuentes que no fueron cubiertas por las categorías industriales utilizadas en este estudio y que corresponden a hornos y calderas que operan con diésel, crudo y GLP. Según esta figura, dichas fuentes corresponden a cerca del 20% de la industria de la ciudad.

Las tablas 4.2. y 4.3 describen de forma detallada la distribución de hornos y calderas en la ciudad de Bogotá, respecto a los parámetros de combustible utilizado, capacidad del sistema de combustión y proceso productivo en el que es empleado dicho sistema.

**Tabla 4.2.** Distribución de las calderas en Bogotá según tamaño y tipo de combustible.

Categoría	Tipo de combustible	Número	
Calderas de capacidad menor a 100 BHP	Gas Natural	322	437
	Combustible Diésel	70	
	Carbón Mineral	29	
	Crudo	4	
	GLP	4	
	Carbón Coque <sup>a</sup>	3	
	Carbón Vegetal	2	
	Carbón Bituminoso	1	
	Fuel Oil	1	
Carbón Mineral y Carbón Vegetal	1		
Calderas de capacidad mayor a 100 BHP	Gas Natural	137	183
	Carbón Mineral	32	
	Crudo	9	
	Carbón Coque <sup>a</sup>	2	
	Aceite Usado	1	
	Carbón Bituminoso	1	
Diésel	1		
Sin capacidad determinada			1
TOTAL			621

<sup>a</sup>Durante la campaña de campo se consideró atípico que las calderas evaluadas hicieran uso de carbón coque. Esta información, sin embargo, corresponde a lo reportado por las empresas que fueron objeto de los monitoreos isocinéticos.

NOTA: En el número de fuentes no se incluyen calderas que se encontraran "Stand By" o fuera de servicio.

Durante el trabajo de campo de este proyecto se hicieron varios hallazgos que vale la pena mencionar en esta parte del documento. Uno de ellos tiene que ver con que algunas ladrilleras ubicadas al interior del perímetro urbano han empezado a utilizar hornos duales de gas natural y carbón. Esto representa un avance muy importante pues, tal y como será discutido más adelante, el uso del gas natural por parte de las industrias es una excelente estrategia para la reducción de los niveles de contaminación por material particulado.

Un segundo hallazgo interesante tiene que ver con la masiva utilización de energía eléctrica por parte de sector industrial en sus procesos productivos. Este hecho fue sorprendente dados los altos costos que deberían estar asociados con dichas prácticas, en comparación con el uso de calderas y hornos de tipo industrial.

**Tabla 4.3.** Distribución de los hornos en Bogotá según proceso y tipo de combustible.

Proceso Productivo	Tipo de Combustible	Número	
Cocción, tostado, fritura y horneado de alimentos	Gas Natural	147	161
	Combustible Diésel	7	
	GLP	7	
Secado de material	Gas Natural	128	155
	GLP	17	
	Carbón Coque	5	
	Carbón Vegetal	2	
	Combustible Diésel	2	
	Fuel Oil	1	
Fundición de metales	Gas Natural	78	136
	Carbón Coque	32	
	Combustible Diésel	10	
	GLP	10	
	Carbón Mineral	3	
	Aceite Usado	1	
	Crudo	1	
	Gasolina	1	
Curado	Gas Natural	67	72
	GLP	4	
	Combustible Diésel	1	
Calentamiento y tratamiento térmico de materiales	Gas Natural	48	56
	Combustible Diésel	5	
	GLP	2	
	Carbón Mineral	1	
Cocción de productos cerámicos y de arcilla (incluye ladrilleras)	Carbón Mineral	33	38
	Carbón Coque	4	
	Carbón Mineral y Gas Natural	1	
Cocción de materiales	Gas Natural	26	33
	GLP	5	
	Combustible Diésel	2	
Templado y tratamiento térmico de materiales	Gas Natural	24	25
	Diésel	1	
Secado de alimentos	Gas Natural	13	14
	GLP	1	
Otros	Gas Natural	10	11
	GLP	1	
Creación	Gas Natural	9	9
		TOTAL	710

NOTA: En el número de fuentes no se incluyen hornos que se encontraran "Stand By" o fuera de servicio.

## 4.2. Inventario de chimeneas industriales

La Tabla 4.4 muestra los resultados del inventario de chimeneas realizado a partir del análisis de fotografía aérea de la ciudad (ver Figura 4.6). Según estos datos, la ciudad (en las localidades de Puente Aranda, Fontibón, Kennedy y Engativá) cuenta con más de 1,300 chimeneas de tipo industrial. Esta cifra, dada la incertidumbre de la metodología utilizada, podría alcanzar a ser superior a 1,900 chimeneas. De esta forma, para los cálculos realizados en las fases posteriores de este proyecto se supuso que la ciudad cuenta con  $1,600 \pm 300$  chimeneas.

Tabla 4.4. Número de chimeneas industriales en Bogotá.

Localidad	Número de ductos identificados	
	Plena identificación	Ducto posible
Puente Aranda	402	131
Fontibón	342	158
Kennedy	318	185
Engativá	255	142
Total	1,317	616

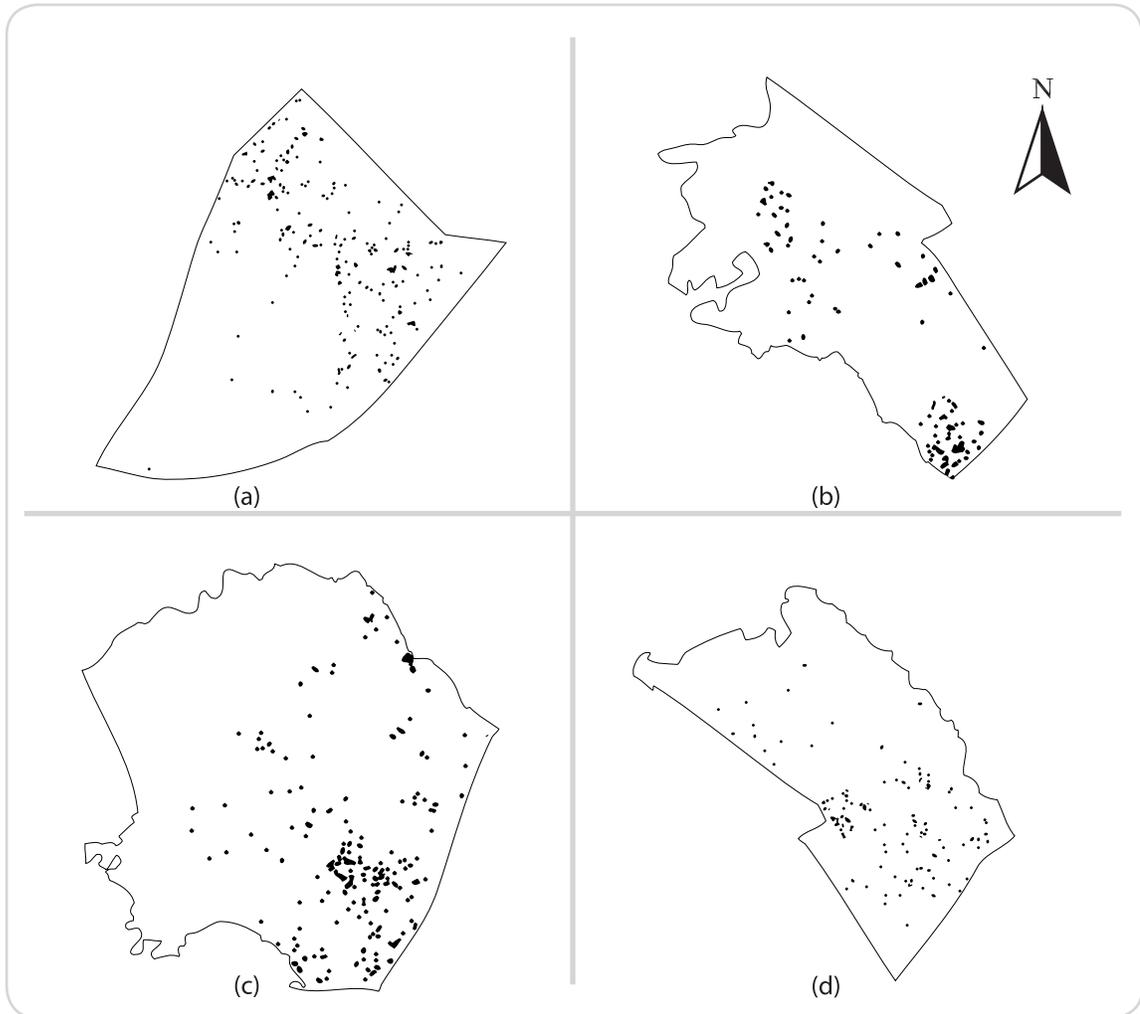
Durante el inventario de fuentes realizado a partir del empadronamiento y las visitas a industrias se logró recolectar información primaria para 1,043 chimeneas localizadas en las localidades de Puente Aranda, Fontibón, Kennedy y Engativá. De esta forma, dados los resultados mencionados anteriormente, se supuso que el cubrimiento logrado durante dichas visitas fue del 65% (la razón entre 1,043 y 1,600). Esto significa que el inventario de emisiones de la ciudad fue calculado para las 1,043 fuentes documentadas de forma directa y luego fue extrapolado para 1,600 fuentes. En este paso se supuso que el aporte al inventario total de emisiones de la ciudad por parte de las fuentes documentadas y no documentadas fue proporcional al número de las mismas (ver Sección 3.5.1).

Otra de las implicaciones relacionadas con el cubrimiento logrado durante las visitas a industrias tiene que ver con que éstas fueron programadas y ejecutadas con base en información reportada en una base de datos de la CCB. Esto significa que dichas industrias operan de forma legal y legítima. Un caso distinto es el relacionado con el inventario de chimeneas desarrollado a partir de las imágenes de fotografía aérea, en donde éstas son identificadas sin conocer los detalles operacionales de las fuentes asociadas con las mismas.

Esto significa que el cubrimiento del 65% en el inventario de chimeneas puede ser considerado como una medida del nivel de legalidad de las industrias que generan descargas de contaminación al aire<sup>9</sup>. Dicho de otra forma, estos datos sugieren que el 35% de las fuentes contaminantes en Bogotá obedecen a empresas que operan informalmente.

Esta última cifra representa una estimación de primer orden y no debe ser entendida como una cuantificación precisa del problema de informalidad en el sector industrial de la ciudad. Esto se debe, entre otras cosas, a que el método de conteo de chimeneas por medio de la fotografía aérea no permite determinar si una fuente en particular se encuentra o no en operación. De esta forma, si bien no se espera que esto sea algo mayoritario, es posible que el conteo de fuentes sobreestime el número real de chimeneas que se encuentran generando descargas de contaminantes a la atmósfera.

<sup>9</sup> Esta afirmación puede hacerse dado que en las localidades para las cuales se realizaron los análisis de fotografía aérea (Puente Aranda, Kennedy, Fontibón y Engativá) se logró un cubrimiento del 100% durante el proceso de visitas técnicas y empadronamiento, el cual a su vez estuvo basado en registros de la base de datos de la CCB (industria formal).



**Figura 4.6.** Ubicación de las chimeneas identificadas en las localidades de Puente Aranda (a), Fontibón (b), Kennedy (c) y Engativá (d).

De la distribución espacial de los ductos de emisión identificados, se puede observar que en Puente Aranda las chimeneas industriales se concentran al norte de esta localidad, principalmente en las UPZ de Puente Aranda, Zona Industrial y San Rafael. Para la localidad de Fontibón se observa una mayor densidad de chimeneas en los límites de esta localidad con Puente Aranda así como en las zonas aledañas al Aeropuerto Internacional El Dorado.

En la localidad de Kennedy, la mayor parte de las chimeneas se ubican en la zona sur oriental de dicha localidad y cerca de los límites de la misma con Puente Aranda. En el conjunto de estas cuatro zonas de la ciudad, la localidad de Engativá es la que cuenta con la menor concentración de chimeneas industriales.

### 4.3. Balance energético y consumo de combustible

La Figura 4.7 muestra la evolución del balance energético de la industria de la ciudad de Bogotá para los últimos años, en donde es evidente el incremento de consumo de gas hacia finales de la década de los años 90. A pesar de que este crecimiento parece neutralizarse después del año 2001, es claro que a través del tiempo se ha presentado un cambio importante en la industria bogotana, en donde se ha migrado de un uso mayoritario de combustibles tales como ACPM y *fuel oil* hacia el uso masivo de gas natural.

En esta misma figura se observa cómo el consumo de ACPM industrial y GLP se ha mantenido relativamente constante durante todo el período de análisis. Finalmente, es interesante notar que el patrón de consumo del *fuel oil* durante los últimos años es similar (aunque en cuantías diferentes) a la tendencia observada para el gas natural.

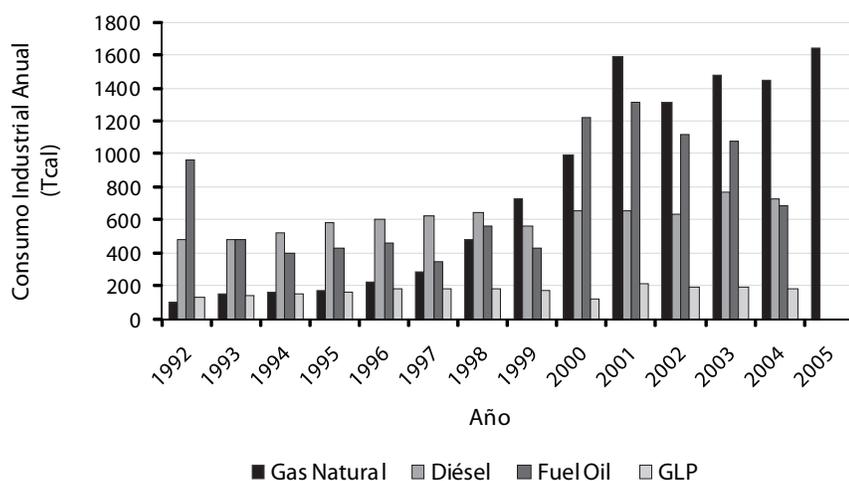


Figura 4.7. Balance energético de la industria de Bogotá (fuente: UPME).

La Tabla 4.5 muestra los resultados del balance de consumo de combustible estimado a partir de la información recolectada durante el proceso de empadronamiento y de visitas técnicas a industrias. Tal y como fue mencionado en la sección de metodología, estos valores fueron comparados con las estadísticas proveídas por la UPME con el fin de comprobar y validar la información que sería utilizada para el cálculo del inventario de emisiones.

Teniendo en cuenta las incertidumbres y limitaciones propias de todo ejercicio de estimación de emisiones industriales, la comparación en referencia fue exitosa para algunos combustibles aportando confiabilidad a los resultados de este estudio. Por ejemplo, para el caso del gas natural, la cifra de balance de energía para el año 2005 (ver Figura 4.7 y Tabla 4.5) corresponde a unos 200 millones de metros cúbicos al año, es decir, un 20% menos que la cifra estimada durante esta investigación (utilizando una metodología completamente diferente) como consumo para el año 2008.

Esto, sin embargo, no fue el caso para todos los combustibles. En la misma Tabla 4.5 se puede apreciar la gran diferencia entre el consumo estimado a partir de las visitas realizadas en este estudio con el consumo estimado por la UPME para combustibles tales como crudo, diésel y aceite usado. Estas diferencias pueden representar una evidencia importante de que dichos combustibles son mayoritariamente utilizados por el sector informal de la industria de la ciudad.

**Tabla 4.5.** Consumo de combustible por parte del sector industrial de Bogotá.

Tipo de combustible	Consumo	Balance energético UPME	Unidades
Gas Natural	250,000,000	198,813,280	m <sup>3</sup> /año
Carbón Mineral	45,000,000	ND	kg/año
GLP	5,000,000	7,915,420	gal/año
Carbón Coque	4,000,000	ND	kg/año
Carbón Vegetal	1,800,000	ND	kg/año
Carbón Bituminoso	1,300,000	ND	kg/año
Crudo	1,000,000	19,334,760	gal/año
Diésel	550,000	22,016,220	gal/año
Aceite usado	15,000	2,000,000*	gal/año

\*(Uribe, 2006).

#### 4.4. Factores de emisión

La Tabla 4.6 muestra los factores de emisión determinados a partir de los monitoreos isocinéticos realizados en este estudio. Dichos factores, utilizados para el cálculo del inventario de emisiones de fuentes industriales de la ciudad, son en varios casos notablemente diferentes a los valores que han sido reportados por la EPA para fuentes similares (ver Tabla 4.7). Estas diferencias pueden obedecer, entre otras cosas, a la tecnología y los protocolos de mantenimiento utilizados por la industria bogotana.

Algunas de las diferencias más notables entre los factores de emisión encontrados en este estudio con los reportados por la EPA tienen que ver con las fuentes que utilizan gas natural. En particular, para el caso de la industria bogotana, las emisiones de PM provenientes de calderas que operan con gas tienden a ser mayores hasta en un orden de magnitud que aquellas reportadas por la EPA.

Esto muy seguramente tiene que ver con la condición dual de las calderas y hornos que se usan en Bogotá en donde en virtualmente el 100% de los casos las fuentes que usan gas natural no corresponden a equipos “dedicados” y por lo mismo no se logran obtener todos los beneficios de tipo ambiental asociados con este combustible. Esta realidad, sin embargo, no evita que el uso de gas natural industrial represente una excelente opción tal y como será discutido más adelante.

Las diferencias entre los factores de emisión disponibles en la literatura y los encontrados a partir de mediciones directas en la industria son una demostración de la importancia de llevar a cabo este tipo de estudios si se desea contar con inventarios que sean precisos y confiables y que permitan el desarrollo de una política pública apropiada y articulada con la realidad de nuestras condiciones.

Tabla 4.6. Factores de emisión para las fuentes industriales de Bogotá.

Categoría Industrial	PM		NO <sub>x</sub>		SO <sub>x</sub>	
CG1 (mg m <sup>-3</sup> )	600	± 500	6,500	± 5,000	20	± 15
CG2 (mg m <sup>-3</sup> )	250	± 200	800	± 600	0.5	± 0.4
CG3 (mg m <sup>-3</sup> )	50	± 20	1,000	± 900	5	± 5
HG1 (mg m <sup>-3</sup> )	200	± 190	1,200	± 1,000	0	-
HG2 (mg m <sup>-3</sup> )	200	± 190	1,200	± 1,000	70	± 70
CC1 (g kg <sup>-1</sup> )	6	± 4	8	± 5	22	± 18
CC2 (g kg <sup>-1</sup> )	10	± 8	5	± 2	12	± 4
HC y HL (g kg <sup>-1</sup> )	12	± 8	5	± 3	12	± 10

NOTA: Para el cálculo de los factores de emisión al interior de cada categoría industrial no se tuvieron en cuenta aquellos resultados provenientes de los muestreos isocinéticos que representaran una desviación estándar superior al 40%. NOTA2: Los factores de emisión para fuentes de gas natural se encuentran expresados en términos de los miligramos de contaminantes producidos por cada metro cúbico de gas que es quemado. Para el caso de fuentes que utilizan carbón, los factores de emisión están expresados en términos de los gramos de contaminantes producidos por cada kilogramo de combustible quemado. CG1 = Calderas a gas natural con capacidades mayores a 100 BHP y año de fabricación previo o igual a 1997; CG2 = Calderas a gas natural con capacidades mayores a 100 BHP y año de fabricación posterior a 1997; CG3 = Calderas a gas natural con capacidades inferiores a 100 BHP; HG1 = Hornos de alimentos a gas natural; HG2 = Hornos de secado y curado alimentados con gas natural; CC1 = Calderas a carbón con capacidades mayores a 100 BHP; CC2 = Calderas a carbón con capacidades menores o iguales a 100 BHP; HL = Hornos ladrilleros alimentados con carbón; HC = Hornos a carbón (para esta categoría industrial se supuso que los factores de emisión eran los mismos que para el caso de los hornos de producción de ladrillo).

Tabla 4.7. Selección de factores de emisión sugeridos por la EPA.

Fuente y tipo de combustible	PM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>
Gas natural en calderas industriales (mg m <sup>-3</sup> )	30	2,200	9
Gas natural en calderas comerciales y domésticas (mg m <sup>-3</sup> )	30	1,600	9
Hornos a gas no provistos de sistemas de control (mg m <sup>-3</sup> )	30	1,500	9
Calderas <i>stoker</i> dispersas alimentadas con carbón subbituminoso (g kg <sup>-1</sup> )	33	4.5	24
Calderas <i>stoker</i> alimentadas con carbón antracítico (g kg <sup>-1</sup> )	2.5	4.5	28
Calderas manuales alimentadas con carbón antracítico (g kg <sup>-1</sup> )	5	1.5	28

NOTA: Para estos factores de emisión se supuso un contenido de cenizas y de azufre en el combustible de 6.3% y 1.5%, respectivamente (Jaramillo, 2001).

## 4.5. Inventario de emisiones

La Tabla 4.8 presenta las emisiones para las categorías industriales consideradas en este estudio. A partir de dichos valores y utilizando la técnica de extrapolación descrita en la Sección 3.5.1, se determinó el inventario de emisiones provenientes de fuentes industriales para la ciudad de Bogotá actualizado para el año 2008 (ver Tabla 4.9). En la Tabla 4.10 se muestra una comparación de dicho inventario con ejercicios similares desarrollados para Bogotá y otras ciudades del continente americano.

**Tabla 4.8.** Emisiones asociadas con las diferentes categorías industriales (ton año<sup>-1</sup>).

Categoría	PM			NO <sub>x</sub>			SO <sub>x</sub>		
CG1	80	±	10	800	±	120	3	±	0.5
CG2	10	±	10	40	±	10	0.02	±	0.01
CG3	1.6	±	0.2	40	±	10	0.2	±	0.05
HG	10	±	1	50	±	10	2	±	0.5
CC1	200	±	40	250	±	50	700	±	180
CC2	50	±	20	20	±	5	60	±	10
HC	20	±	4	7	±	2	20	±	5
HL	350	±	60	130	±	30	350	±	70

CG1 = Calderas a gas natural con capacidades mayores a 100 BHP y año de fabricación previo o igual a 1997; CG2 = Calderas a gas natural con capacidades mayores a 100 BHP y año de fabricación posterior a 1997; CG3 = Calderas a gas natural con capacidades inferiores a 100 BHP; HG = Hornos de gas natural (incluye industria de alimentos y hornos de secado y curado); CC1 = Calderas a carbón con capacidades mayores a 100 BHP; CC2 = Calderas a carbón con capacidades menores o iguales a 100 BHP; HL = Hornos ladrilleros alimentados con carbón; HC = Hornos a carbón.

**Tabla 4.9.** Emisiones totales generadas por el sector industrial de Bogotá (ton año<sup>-1</sup>).

PM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>
1,400 ± 150	2,600 ± 250	2,200 ± 400

NOTA: Las emisiones totales corresponden a los valores que han sido extrapolados para incluir las fuentes no cubiertas durante el empadronamiento así como los tipos de fuente que no fueron parte de los monitoreos isocinéticos (ver Sección 3.5.1).

Estos resultados representan un gran avance para la ciudad pues no sólo son el resultado de un ejercicio de gran complejidad y con muy pocos antecedentes previos sino también por el grado de confiabilidad de los mismos. Adicionalmente, estas cifras permiten la identificación de los principales sectores responsables de las emisiones y por lo mismo son una herramienta de diseño de políticas de control de contaminación del aire.

Por ejemplo, tal y como se muestra en la Figura 4.8, los hornos ladrilleros son el sector más contaminante en lo que se refiere a emisiones de material particulado, seguido de cerca por las calderas de gran capacidad alimentadas con carbón. Este es el caso a pesar de que, según lo documentado en la Sección 4.1, dichos sectores representan un relativamente bajo número de chimeneas al interior del inventario de fuentes de la ciudad. Lo que esto significa es que la aplicación de medidas de control de emisiones para este tipo de fuentes sería altamente eficiente y efectiva, dado que ejerciendo dichos controles sobre un número pequeño de industrias se lograrían reducciones significativas en el inventario de emisiones de la ciudad.

Algo similar ocurre para los NO<sub>x</sub>, en donde el inventario de emisiones de este contaminante se encuentra dominado por las calderas de gas natural de gran capacidad. En este sentido es claro que el uso industrial de gas natural trae grandes beneficios en términos de una reducción de emisiones de material particulado pero que al mismo tiempo conlleva a las externalidades negativas asociadas con mayores emisiones de NO<sub>x</sub>.

Para el caso de SO<sub>x</sub>, los resultados encontrados confirman lo reportado en estudios previos, en donde la inmensa mayoría de las emisiones (más del 90%) provienen de hornos ladrilleros y calderas operadas con carbón.

Tabla 4.10. Inventario de emisiones para varias ciudades del continente americano (toneladas por año).

	PM <sub>10</sub>	PM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>
Los Ángeles (1)		1,600	12,050	1,860
Lima - Callao (2)	8,500	86,700	7,400	40,000
Río de Janeiro (3)	10,600	-	30,300	55,800
Ciudad de México (4)	3,920	-	19,740	3,280
Santiago de Chile (5)	305	-	3,142	2,504
Valle de Aburra (6)	2,130	31,490	3,370	21,360
Cali - Yumbo (7)	11,460	-	3,780	16,380
Bogotá (2002) (8)	2,940	-	1,400	5,110
Bogotá (2001) (9)	-	670	1,330	4,880
<b>Este estudio</b>	-	<b>1,400 ± 150</b>	<b>2,600 ± 250</b>	<b>2,200 ± 400</b>

1. Emisiones del condado de Los Ángeles (ARB, 2006); 2. Inventario de emisiones realizado por la Dirección General de Salud Ambiental de Lima, 2005; 3. Departamento de Planeación Ambiental de Río de Janeiro, 2004; 4. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México D.F., 2004; 5. Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2000; 6. Universidad Pontificia Bolivariana, 2005; 7. Universidad de Antioquia, 2004; 8. Inventario realizado con el modelo de de emisiones AIREMIS, 2002; 9. Inventario realizado por Ingeniería Ambiental de Colombia, 2001.

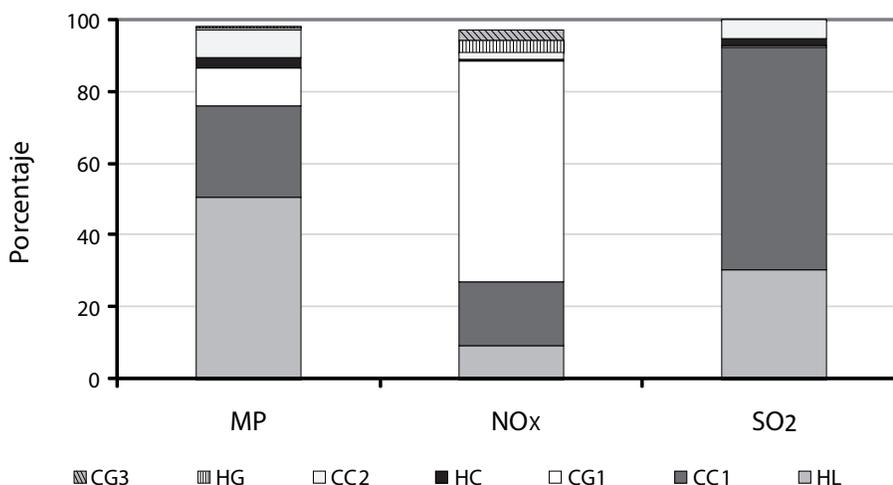


Figura 4.8. Contribución relativa de las diferentes categorías industriales al inventario de emisiones de PM, NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>.

CG1 = Calderas a gas natural con capacidades mayores a 100 BHP y años modelo previos o iguales a 1997; CG2 = Calderas a gas natural con capacidades mayores a 100 BHP y años modelo posteriores a 1997; CG3 = Calderas a gas natural con capacidades menores o iguales a 100 BHP; HG = Hornos a gas natural; CC1 = Calderas a carbón con capacidades mayores a 100 BHP; CC2 = Calderas a carbón con capacidades menores o iguales a 100 BHP; HC = Hornos a carbón; HL = Hornos ladrilleros.

Los resultados presentados en la Tabla 4.10 también merecen varios comentarios dada la gran variabilidad observada en los inventarios de emisiones desarrollados en otras ciudades de Colombia y del mundo. En particular, es interesante notar los muy altos valores de emisiones reportados para el Valle de Aburrá para el caso de PM, en donde dichos valores superan por más de un orden de magnitud los estimados para este estudio así como los que han sido

documentados para la ciudad de Los Ángeles en California. Algo similar ocurre para el caso de Rio de Janeiro en donde para casi todos los contaminantes se reportan cifras muy superiores que aquellas encontradas para las demás ciudades.

Estas diferencias pueden obedecer a condiciones específicas presentes en cada ciudad pero también pueden estar relacionadas con errores experimentales o con limitaciones al momento de realizar las estimaciones de emisiones debidas, por ejemplo, al uso de factores de emisión que no corresponden a las fuentes reales presentes en las ciudades.

En la misma Tabla 4.10, al comparar los resultados de los dos estudios desarrollados por la Universidad de los Andes<sup>10</sup>, se puede apreciar una tendencia a la baja en las emisiones de material particulado y óxidos de azufre (reducciones del orden del 45% en ambos casos) al mismo tiempo que se presenta una tendencia al alza en las emisiones de óxidos de nitrógeno. Estos resultados son consistentes con las tendencias observadas para el mismo período de tiempo en los consumos de gas natural y otros combustibles tales como el *fuel oil* por parte de la industria bogotana (ver Sección 4.3). Esto significa que, tal y como fue discutido anteriormente, la migración hacia el uso del gas natural ha estado asociada con reducciones de emisiones de PM y SO<sub>x</sub> pero al mismo tiempo ha conllevado a mayores emisiones de NO<sub>x</sub>.

Finalmente, las figuras 4.9 y 4.10 muestran la distribución de las emisiones en la ciudad de Bogotá para PM y NO<sub>x</sub>, respectivamente. De estos resultados se puede apreciar que las localidades de Usme y Puente Aranda dominan el inventario de emisiones de estos contaminantes. Esto se debe a que son precisamente estas localidades en donde se encuentran localizadas las fuentes de emisión que generan los mayores aportes de contaminación para estas especies químicas.

Estos resultados también sirven para demostrar la importancia de las fuentes localizadas en Fontibón, las cuales generan un aporte significativo tanto para el caso de PM como para el caso de NO<sub>x</sub>. Otro caso interesante tiene que ver con la localidad de Bosa en donde se presenta un gran aporte al inventario de emisiones de NO<sub>x</sub> pero no así para el caso de PM.

De esta forma, se puede concluir que al analizar la localización de las actividades industriales responsables del problema de contaminación en la ciudad se deben llevar a cabo evaluaciones no sólo en la de Puente Aranda sino en muchas otras zonas que, según estos resultados, pueden incluso ser más relevantes y prioritarias.

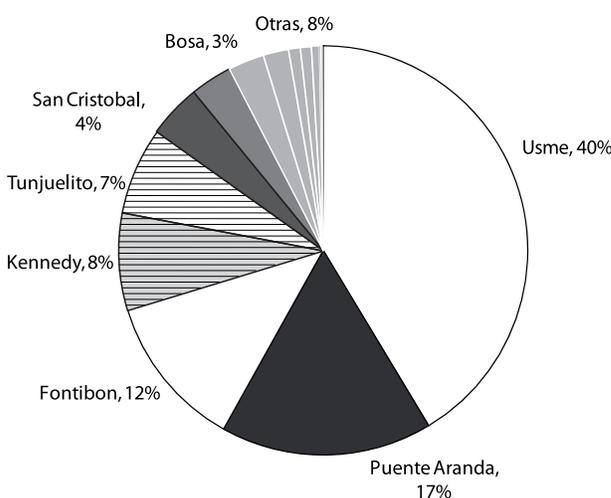


Figura 4.9. Aporte porcentual a las emisiones de PM de cada localidad de Bogotá.

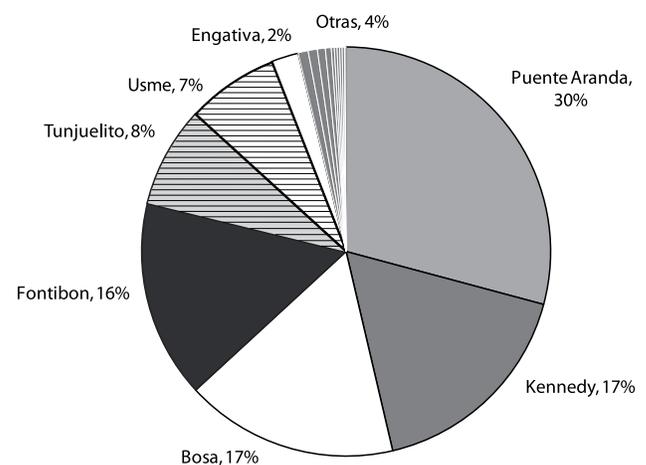


Figura 4.10. Aporte porcentual a las emisiones de NO<sub>x</sub> de cada localidad de Bogotá.

<sup>10</sup> El primer estudio desarrollado por la Universidad de los Andes corresponde a emisiones del año 2002 mientras que el segundo de dichos estudios corresponde a los resultados presentados en este informe.

## 5. Análisis de incertidumbre

Los autores de este trabajo consideran que los resultados relacionados tanto con factores de emisión como con los inventarios finales corresponden a valores confiables y que representan la realidad actual de la ciudad en una forma que no puede ser replicada haciendo uso de resultados obtenidos en ejercicios anteriores. Esto significa que los inventarios aquí reportados pueden ser utilizados por la ciudad para la toma de decisiones en lo que se refiere a su política de control de la contaminación del aire.

Al mismo tiempo, sin embargo, esto no quiere decir que la metodología utilizada en este estudio (así como en cualquier trabajo de esta naturaleza) no cuente con limitaciones que generan un cierto grado de incertidumbre en los resultados. Dicha incertidumbre se encuentra cuantificada y documentada de forma explícita en las tablas que conforman al capítulo de resultados (ver Sección 4) y fue, en términos generales, del orden del 15 al 20%.

El valor de incertidumbre global, determinado al propagar la incertidumbre para cada uno de los pasos de la metodología haciendo uso del método de los mínimos cuadrados, puede parecer alto en primera instancia pero en realidad corresponde a la magnitud típica del error que se encuentra asociado con este tipo de ejercicios.

Las principales fuentes de error en nuestros resultados se encuentran relacionadas con los siguientes aspectos: **1)** Los factores de emisión asignados a las categorías industriales corresponden a experimentos realizados en una muestra y no en el universo posible de fuentes de emisión; **2)** No todos los sectores industriales de Bogotá lograron ser considerados en dichas categorías; **3)** El número de chimeneas para las cuales se logró contar con información primaria acerca del tipo de tecnología utilizada y el tipo y calidad de combustible empleado es menor al número total de chimeneas industriales presentes en Bogotá; **4)** El balance energético obtenido a partir de las encuestas y visitas a establecimientos industriales no correspondió en todos los casos a los valores reportados por la UPME; **5)** No se logró generar factores de emisión para fuentes industriales que hagan uso de combustibles líquidos ni mezclas con aceites usados.

Estos aspectos a su vez se encuentran relacionados con limitaciones y situaciones que no era posible resolver durante el desarrollo de la campaña de campo e incluyen temas tales como los costos asociados con los monitoreos isocinéticos en chimeneas, el nivel de informalidad de la industria de la ciudad, la calidad de la información registrada en las bases de datos de la CCB y SDA y la disposición a permitir los monitoreos por parte de los propietarios de los establecimientos industriales.

Al mismo tiempo, sin embargo, dado el esfuerzo realizado y el avance logrado en la confiabilidad de los factores de emisión obtenidos de forma rigurosa y para las condiciones específicas y reales de la ciudad, es ahora posible realizar proyectos focalizados a resolver las limitaciones específicas antes enumeradas. De esta forma, se abre la puerta para que las actualizaciones y mejoras al inventario de emisiones aquí presentado no requieran de estudios de esta envergadura y complejidad en términos del tiempo y los recursos financieros necesarios para su ejecución.

## 6. Conclusiones

Las fuentes industriales en Bogotá emiten anualmente a la atmósfera 1,400 toneladas de material particulado; 2,600 toneladas de óxidos de nitrógeno; y 2,200 toneladas de óxidos de azufre. Estas cantidades, si bien no son excesivamente elevadas al compararlas con otras ciudades de América Latina, representan uno de los principales aportes al problema de contaminación del aire en la ciudad.

Según los registros oficiales disponibles en la Cámara de Comercio de Bogotá, en la ciudad hay más de 45,000 industrias manufactureras. De esta cantidad, sin embargo, menos de 1,000 (pertenecientes al sector formal) se encuentran asociadas con emisiones de contaminantes a la atmósfera. Como parte de estas industrias, la ciudad cuenta con un número de chimeneas inferior a 2,000.

El conocimiento de estas cifras es de gran importancia pues de dichas cantidades depende la estrategia que se puede implementar para hacerle control a las fuentes de emisión. En este caso, el relativamente bajo número de chimeneas y empresas generadoras de emisiones significa que debería ser posible ejercer estrategias de comando y control para un alto porcentaje de éstas.

Los resultados de este trabajo confirman que la localidad de Puente Aranda es la zona de Bogotá en donde se concentra el mayor número de empresas asociadas con emisiones atmosféricas así como el mayor número de chimeneas de tipo industrial. Sin embargo, esto no significa que no existan otras localidades que merecen igual o mayor atención, a propósito de las emisiones generadas. En particular, debido a la actividad de producción no tecnificada de ladrillo, la localidad de Usme es, al interior del perímetro urbano, el lugar en donde más emisiones de material particulado se producen.

Del mismo modo, para algunos de los contaminantes evaluados, las localidades de Bosa, Fontibón, Kennedy y Engativá representan aportes muy significativos al inventario de emisiones de la ciudad. De esta forma, si bien es clara la importancia de Puente Aranda, no es una buena práctica concentrarse de forma tan enfática en esta localidad.

La industria bogotana ha migrado de forma muy importante hacia el uso del gas natural como combustible para sus procesos productivos. Hoy en día dos de cada tres empresas pertenecientes al sector formal hacen uso de dicho combustible en la ciudad. Esta situación es altamente conveniente desde el punto de vista de las emisiones de material particulado y óxidos de azufre y por lo mismo se deben continuar y fortalecer los instrumentos que pretenden incentivar el uso del gas natural en la industria.

Las dinámicas de uso del gas natural por parte de la industria bogotana son de tal importancia que a pesar del constante incremento del producto interno bruto de la ciudad durante los últimos años se ha visto una reducción en las emisiones de óxidos de azufre y material particulado en el sector formal de dicha industria.

Más aún, estos beneficios se logran incluso en ausencia de sistemas de control de emisiones. Esto se demuestra por las características de las industrias que fueron objeto de mediciones en este estudio, en donde todas las fuentes que utilizaban carbón estaban provistas de sistemas de control de emisiones mientras que ninguna de las fuentes que usaban gas natural contaba con sistemas de ésta índole. A pesar de estas diferencias, las emisiones por parte de las fuentes a gas natural fueron muy inferiores a aquellas relacionadas con las fuentes de carbón.

En este mismo sentido, los beneficios ambientales asociados con el uso del gas natural industrial podrían ser incluso mayores si se contara con una oferta de combustible robusta que permitiese el uso de calderas y hornos dedicados a gas en lugar de los elementos duales que son el común de la industria bogotana y que comprometen parcialmente el desempeño ambiental de los sistemas de combustión.

Al mismo tiempo, no deben olvidarse algunas de las externalidades negativas asociadas con el uso del gas natural, tales como las mayores emisiones de óxidos de nitrógeno. Este contaminante, si bien es menos peligroso y menos significativo para el caso de la contaminación del aire de Bogotá, sigue siendo un parámetro importante dados sus efectos nocivos sobre la salud del hombre así como su característica de ser promotor tanto de smog fotoquímico como de material particulado de origen secundario.

Esto significa que se debe seguir promoviendo el uso del gas natural en la industria, especialmente para el caso de calderas y hornos dedicados, pero generando los controles que sean del caso para las emisiones de óxidos de nitrógeno.

Tal y como fue mencionado anteriormente, al interior de los sectores analizados en este estudio, se logró documentar que la producción no tecnificada de ladrillo es la más importante fuente de contaminación por material particulado en la ciudad a pesar de que no se cuenta con numerosos establecimientos de este tipo.

De esta forma, el control de emisiones a este sector debe ser considerado como una de las principales prioridades para la autoridad ambiental, no sólo por la importancia del mismo sino por la efectividad que tendrían las medidas de control teniendo en cuenta el relativamente bajo número de fuentes. En este mismo sentido, una segunda prioridad debe estar asociada con las calderas que hacen uso de carbón como combustible.

La presencia de sectores informales al interior de la industria bogotana puede convertirse en uno de los grandes desafíos para la ciudad y su institucionalidad ambiental. Esto se debe no sólo al relativamente alto porcentaje de fuentes contaminantes que se encuentran asociadas con dichos sectores sino por las características de los combustibles utilizados por los mismos. Según los resultados de este estudio, el sector formal favorece de gran forma el uso del gas natural mientras que todo lo contrario es cierto para el caso del sector informal en donde prima el uso de crudos pesados y otros combustibles con características menos deseables.

Dada la concepción y diseño experimental de este estudio y a pesar de las metodologías utilizadas para lograr una extrapolación de emisiones de tal forma que éstas fueran representativas para toda la ciudad, los resultados de las estimaciones de emisiones se encuentran enfocados hacia la industria formal. Esto significa que futuros esfuerzos similares de caracterización de emisiones en Bogotá podrían hacer énfasis en la difícil tarea de estimar de mejor manera las emisiones producidas por la industria informal, la cual de todas formas debería ser objeto de mayores controles y debería tender a su desaparición con el transcurso del tiempo.

Un ejemplo de esto tiene que ver con el estudio actualmente en desarrollo por parte del CIIA y el Ministerio de Ambiente, Vivienda, y Desarrollo Territorial; a partir del cual se pretende documentar las emisiones de material particulado y otros contaminantes del aire provenientes de sistemas de combustión que operan con mezclas de aceites usados.

En términos de la metodología utilizada, los resultados obtenidos en este trabajo afianzan una vez más la importancia de llevar a cabo estudios in-situ que reflejen las condiciones reales de operación de los sistemas de combustión. Es claro que una metodología teórica, tal como la sugerida por la EPA, es un excelente punto de partida pero esto no significa que a medida que crezca el conocimiento técnico a nivel local así como la cantidad de recursos disponibles para estos temas no se deban llevar a cabo esfuerzos más rigurosos para entender y conocer de mejor forma los inventarios de emisiones de contaminantes del aire. Sin información veraz y adecuada, las políticas y estrategias de control de la contaminación del aire no lograrán ser acertadas en su diagnóstico, ni eficientes en el cumplimiento de sus objetivos.

Finalmente, si bien se trata de un tema que no fue incluido en el cuerpo de este documento, durante el desarrollo de esta investigación se logró documentar que existen inconvenientes y limitaciones importantes en el desarrollo de las mediciones isocinéticas en chimeneas en la ciudad. Esto es algo que ocurre pese al esfuerzo realizado por la SDA a través de las auditorías a las que son sometidas las empresas consultoras que se dedican a estas actividades.

En pocas palabras, es claro que se presenta un desconocimiento y falta de rigurosidad por parte de quienes ofrecen estos servicios en lo que se refiere a los protocolos de campo y de laboratorio que se deben realizar antes, durante y después de un monitoreo en una chimenea industrial.

Esto se debe, en parte, a la gran complejidad de estos métodos y por lo mismo es altamente recomendable que se amplíen y fortalezcan los controles y auditorías a las que deben someterse quienes prestan estos servicios. Esto debe hacerse incluso teniendo en cuenta los procesos de certificación y acreditación que se encuentran actualmente en desarrollo por parte del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

## 7. Referencias

- Bhanarkar, Rao, Gajghate & Nema, 2005. Inventory of SO<sub>2</sub>, PM and toxic metals emissions from industrial sources in Greater Mumbai, India. *Atmospheric Environment*, **39**: 3851-3864.
- B.R. Gurijar, 2004. Emission estimates and trends (1990-2000) for megacity Delhi and implications. *Atmospheric Environment*, **38**: 5663-5681.
- California Environmental Protection Agency (2006). Estimated Annual Average Emissions. [En línea] USA.
- Cámara de Comercio de Bogotá (2007). Perfil económico y empresarial localidad Engativá. Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá. [En línea]
- Cámara de Comercio de Bogotá (2007). Perfil económico y empresarial localidad Fontibón. Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá. [En línea]
- Cámara de Comercio de Bogotá (2007). Perfil económico y empresarial localidad Kennedy. Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá. [En línea]
- Cámara de Comercio de Bogotá (2007). Perfil económico y empresarial localidad Puente Aranda. Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá. [En línea]
- Cole, M. A.; Elliott, R. and Wu, S., 2008. Industrial activity and the environment in China: An industry-level analysis. *China Economic Review* **19** (3); 393-408.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente. 2000. Emisiones en fuentes estacionarias. [En línea] Santiago, Chile.
- Comité Directivo Nacional ICER (Abril, 2005). Informe de Coyuntura Económica Regional Bogotá – Cundinamarca segundo semestre de 2004. [En línea]
- C. Veldt, 1991. Emissions of SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, VOC and CO from East European Countries. *Atmospheric Environment*, **25A**: 2683-2700.
- Departamento Administrativo de Estadística (DANE). 2006. Consulta dinámica de la encuesta anual manufacturera. [En línea]
- Departamento Administrativo del Medio Ambiente – DAMA. 2001. Plan de Gestión del Aire para el DAMA 2000-2009. Bogotá, Colombia.
- Dirección General de Salud Ambiental de Lima (Abril, 2005). Resultados del inventario de emisiones de fuentes fijas -cuenca atmosférica de la ciudad de lima-callao.
- Environmental Protection Agency of the United States - EPA, (1995) Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Quinta Edición.
- Environmental Protection Agency of the United States - EPA (2008). Method 1 Sample and Velocity Traverses for Stationary Sources. Emissions Measurement Center.
- Environmental Protection Agency of the United States - EPA (2008). Method 2 Determination of Stack Gas Velocity and Volumetric Flow Rate (Type S Pitot Tube). Emissions Measurement Center.
- Environmental Protection Agency of the United States - EPA (2008). Method 3 Gas Analysis for Carbon Dioxide, Oxygen, Excess Air, and Dry Molecular Weight. Emissions Measurement Center.
- Environmental Protection Agency of the United States - EPA (2008). Method 4 Determination of Moisture Content in Stack Gas. Emissions from Stationary Sources.

Environmental Protection Agency of the United States - EPA (2008). Method 5 Determination of Particulate Matter. Emissions from Stationary Sources.

Environmental Protection Agency of the United States - EPA (2008). Method 7 Determination of Nitrogen Oxide Emissions from Stationary Sources. Emissions Measurement Center.

Environmental Protection Agency of the United States - EPA (2008). Method 8 Determination of Sulfuric Acid Mist and Sulfur Dioxide Emissions from Stationary Sources. Emissions Measurement Center.

Fernando Jaramillo Espinoza (2001). Bases para la investigación de la contaminación atmosférica en el Valle de Sogamoso: El caso del material particulado generado en la fabricación artesanal de ladrillo y cal. Lausana (Suiza).

Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente - Departamento de Planejamento Ambiental Divisão de Qualidade do Ar - FEEMA (Mayo, 2004). Inventário de fontes emisoras de poluentes atmosféricos da região metropolitana do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

Garg, A. Shukla, P.R., Bhattacharya, S., Dadhwal, V.K. 2001. Sub region /district and sector level of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions for India: assessment of inventories and mitigation flexibility. *Atmospheric Environment*, **35**: 703-713.

Ingeniería Ambiental de Colombia Ltda. (INAMCO) y Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). 2001. Elaboración del inventario de fuentes fijas de emisión de contaminantes a la atmósfera en la ciudad de Bogotá D.C.

Jaramillo, M.; Núñez, M. E.; Ocampo, W.; Pérez, D. y Portilla, G., 2004. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos convencionales en la zona de Cali – Yumbo. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, **31**: 38-48.

Kato & Akimoto, 1992. Anthropogenic emissions of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> in Asia. *Atmospheric Environment*, **26A**: 2997-3017.

Ministerio de Minas y Energía. 2007. Balances energéticos 1975 – 2006. Bogotá: República de Colombia Ministerio de Minas y Energía. [En línea]

Mitra, A. P.; Morawska, L.; Sharma, C. and Zhang, J., 2002. Chapter two: methodologies for characterization of combustion sources and for quantification of their emissions. *Chemosphere*, **49**: 903–922.

Nansai, Moriguchi, & Tohno. 2003. Compilation and application of Japanese inventories for energy consumption and air pollutant emissions using input-output tables. *Environmental Science and Technology*, **37**: 2005-2015.

Radian International. 2000. Mexico Emissions Inventory Program. Lessons Learned from the Application of the Mexico Emissions Inventory Methodology in the City of Mexicali, Baja California. México: Western Governors' Association – Binational Advisory Committee.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - SEMARNAT (2004). [En línea] México, D.F

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales - Instituto Nacional de Ecología. 1999. Inventario nacional de emisiones de México. Primera edición. [En línea]

Secretaría Distrital de Planeación. 2008. Síntesis de coyuntura: dirección de políticas sectoriales. [En línea]

South Coast Air Quality Management District – SCAQMD. 2007. Development of the toxics emissions inventory. [En línea]

Tolga Elbir & Aysen Muezzinoglu, 2004. Estimation strengths of primary air pollutants in the city of Izmir, Turkey. *Atmospheric Environment*, **38**: 1851-1857.

Unidad de Planeación Minero Energética – UPME (1992-2005). Balance energético para Bogotá.

Unidad de Planeación Minero Energética. 2006. Mercado nacional e internacional del carbón colombiano. Bogotá: República de Colombia Ministerio de Minas y Energía. [En línea]

Unidad de Planeación Minero Energética. 2007. Balances Energéticos 1975 – 2006. Bogotá: República de Colombia Ministerio de Minas y Energía. [En línea]

Unidad de Planeación Minero Energética. 2007. Boletín estadístico de minas y energía 2002 – 2007. Bogotá: República de Colombia Ministerio de Minas y Energía. [En línea]

Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental. 2002. Diseño e implementación de un modelo de calidad de aire para Bogotá. Sexto informe semestral. Bogotá.

Universidad Pontificia Bolivariana y Área Metropolitana del Valle de Aburrá. 2005. Actualización del inventario de emisiones atmosféricas en el Valle de Aburrá. [En línea]

Uribe, Mónica. 2006. Conveniencia ambiental de la utilización de los aceites usados como combustibles. Tesis de Grado de Ingeniería Ambiental. Universidad de los Andes.



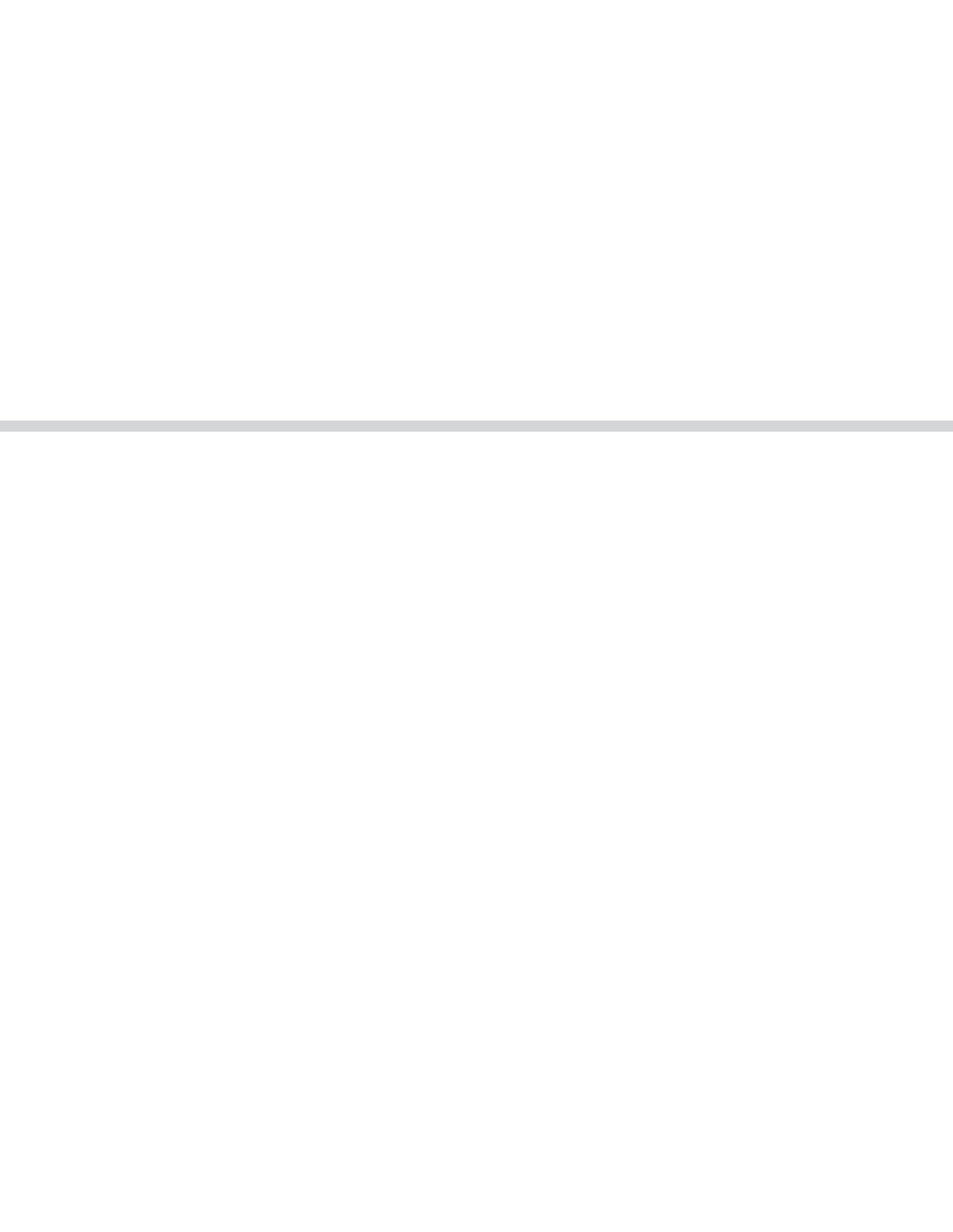




# Parte B

---

## Inventario de Emisiones Provenientes de Fuentes Móviles



# Agradecimientos

Las contribuciones de la Secretaría Distrital de Ambiente, en particular por parte de Jesús Miguel Sepúlveda, principal interventor de este proyecto y Edgar Erazo, Director de Control Ambiental; fueron altamente apreciadas. De forma similar se agradecen las contribuciones de Claudia Buitrago, Martha Liliana Perdomo, Aymer Maturana, Carolina Jarro, Eder Pedraza, Andrea Maldonado y Mónica Espinosa.

Agradecemos de forma especial la colaboración prestada por el International Sustainable Systems Research Center y la Universidad de Chile (a través del Dr. Mauricio Osses). Del mismo modo se agradece a Transmilenio S.A, Coca Cola, Gas Natural S.A, Secretaría de Movilidad, Gazel S.A, E-logistic, Senaltur S.A, Sidauto, y la Compañía Colombiana Automotriz.

Deseamos también destacar las valiosas contribuciones del equipo de campo del proyecto liderado por Robinsson A. Rodriguez y Sebastian Tolvett y compuesto por David Carrasco, Mauricio Gaitán, Orlando Venegas, Agustín Zamudio, Luis Miguel Castro, Juan Carlos Cárdenas, Andrey Giraldo, Diego Armando Jacinto, Alejandro Vargas, Víctor Monroy, y Ricardo Morales.

Agradecemos los aportes realizados por Alejandro Tobón, Natalia Muñoz, Gloria Esperanza Barriga, Nelson Lugo, Sandra Bravo, Juliana Rivera, Milena Ruiz, Faustino Moreno, Juan Pablo Bocarejo, Germán Ospina, Juan Felipe Franco, y Santiago Camacho.

Finalmente, destacamos y agradecemos de manera especial el soporte provisto para esta investigación por parte de la Alcaldía Mayor de Bogotá, a través de la Secretaría Distrital de Ambiente así como por parte del Inter-American Institute for Global Change Research (fondos CRN II 2017 a través del soporte de la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos - Grant GEO-0452325).

Este reporte fue remitido en cumplimiento parcial del Contrato de Ciencia y Tecnología 347 de 2006 suscrito entre la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogota y la Universidad de los Andes, cuyo objeto fue elaborar estudios y planes para contribuir a los procesos de monitoreo y mejoramiento de la calidad del aire en el distrito capital de Bogotá así como diseñar las políticas necesarias para controlar los factores que generan contaminación atmosférica. Este trabajo fue culminado en el mes de Octubre de 2008.



# Resumen ejecutivo

Durante el desarrollo de este proyecto se llevó a cabo el inventario de emisiones provenientes de fuentes vehiculares para la ciudad de Bogotá haciendo uso de metodologías y procedimientos que corresponden al estado del arte en estos temas.

Como parte de dicho esfuerzo se recopiló información existente referente al tamaño y distribución de la flota vehicular así como de sus niveles de actividad. Adicionalmente se realizó una masiva campaña de campo, sin precedentes en la historia de los centros urbanos del país, en la que se llevaron a cabo centenares de mediciones directas de emisiones, utilizando técnicas en tiempo real y bajo condiciones reales de operación de los vehículos.

Según los resultados de este estudio, las fuentes vehiculares en Bogotá emiten anualmente a la atmósfera más de 4,800,000 toneladas de dióxido de carbono; 450,000 toneladas de monóxido de carbono; 30,000 toneladas de óxidos de nitrógeno; 60,000 toneladas de hidrocarburos y 1,100 toneladas de material particulado fino. Estas cantidades son similares a las reportadas para otras ciudades comparables de América Latina. Según los registros oficiales disponibles en la Secretaría Distrital de Movilidad y en complemento con otras fuentes de información, por Bogotá circulan más de 1.2 millones de vehículos; incluyendo automotores de uso privado, motocicletas, taxis, vehículos de carga y vehículos de servicio de transporte público.

Los resultados de este trabajo indican que para reducir los niveles de emisiones de contaminantes por parte de la flota de carga liviana de la ciudad se deben implementar programas y medidas enfocadas hacia los siguientes temas: reducción del uso del vehículo privado y de vehículos de gran tamaño que se caractericen por elevados consumos de combustible, mejorar los patrones de conducción de tal forma que sean menos agresivos, promover la renovación del parque automotor de tal forma que los vehículos se encuentren provistos de tecnologías más avanzadas y más limpias, continuar y expandir las políticas existentes relacionadas con la exigencia de contar con tecnologías de control de emisiones, y diseñar programas para la renovación de convertidores catalíticos que ya hayan cumplido con su vida útil.

Adicionalmente, se debe continuar con los esfuerzos para lograr la distribución de ACPM de calidad internacional, de tal forma que se sigan logrando reducciones de emisiones en toda la flota que usa este combustible y se permita el uso de tecnologías de control de emisiones para motores diésel. En este mismo sentido también es necesario implementar programas de renovación y modernización del parque de vehículos de carga pesada, así como de mantenimiento preventivo y especializado de los mismos.

Se debe seguir promoviendo la iniciativa de un sistema de movilización integrado en el que TransMilenio y otras formas de transporte masivo sean cada vez más importantes y representen un mayor porcentaje de los viajes que se realizan en la ciudad. Este escenario debe estar asociado con la salida masiva de buses del sistema de transporte colectivo para lograr una reducción significativa en las emisiones de material particulado.

Según lo documentado en este estudio, la reconversión tecnológica a gas natural es positiva para algunas de las especies contaminantes que se encuentran reguladas en Colombia pero sólo para el caso de vehículos relativamente antiguos que correspondan a tecnologías sencillas en lo que se refiere a su proceso de combustión y alimentación de combustible. Para el caso de vehículos de modelos recientes con tecnologías más sofisticadas, la reconversión a gas natural tiene repercusiones negativas y causa un incremento en los niveles de emisiones de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno. Esto último es de particular importancia pues dichas especies son promotoras de smog fotoquímico y material particulado (secundario), los dos más grandes problemas de contaminación que enfrenta la ciudad de Bogotá.



# Tabla de contenido

1. Aspectos generales	55
2. Antecedentes	56
2.1. Experiencias internacionales	56
2.2. Experiencias previas en América Latina	58
2.3. Experiencias previas en Colombia	58
2.4. Experiencias previas en Bogotá	59
2.5. Proyecto internacional de emisiones - IVE	59
3. Metodología	61
3.1. Flota vehicular y factor de actividad	61
3.1.1. Estimación del tamaño de la flota vehicular	61
3.1.2. Estimación del factor de actividad de la flota	62
3.2. Factores de emisión	63
3.2.1. Selección de categorías vehiculares	63
3.2.2. Selección de la ruta para las pruebas de emisiones	67
3.2.3. Obtención de los vehículos	68
3.2.4. Campaña de campo	72
3.2.4.1. Instrumentación y métodos experimentales	74
3.2.4.2. Pruebas de emisiones en ruta	77
3.3. Estimación del inventario de emisiones vehiculares	78
4. Resultados	79
4.1. Características de la flota vehicular de Bogotá	79
4.2. Factores de emisión	82
4.3. Inventario de emisiones	85
4.4. Información en tiempo real	88
4.5. Impacto de la reconversión tecnológica a gas natural	90
4.6. Efecto de la calidad del combustible	93
5. Análisis de incertidumbre	94
6. Conclusiones	95
7. Referencias	97



# 1. Aspectos generales

---

El presente documento representa la tercera de cuatro partes en las que se encuentra dividido el reporte final de resultados del estudio elaborado por el Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA) de la Universidad de los Andes y contratado por la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (SDA) como parte del convenio de ciencia y tecnología número 347 de 2006.

El objeto de dicho convenio fue elaborar estudios y planes para contribuir a los procesos de monitoreo y mejoramiento de la calidad del aire en el distrito capital de Bogotá así como diseñar las políticas necesarias para controlar los factores que generan contaminación atmosférica.

Esta tercera parte del reporte final se centra en los resultados obtenidos para el inventario de emisiones de gases contaminantes y material particulado asociados con el sector vehicular de Bogotá.

## 2. Antecedentes

Durante el transcurso de la última década son grandes los avances que se han logrado respecto a la rigurosidad y precisión de las técnicas y metodologías utilizadas con el fin de conocer los inventarios de emisiones (contabilidad de las emisiones producidas por todas las fuentes) asociados con las flotas vehiculares que transitan por los centros urbanos del mundo.

Estos avances tienen que ver tanto con las técnicas analíticas y los equipos utilizados así como con una mejor reproducción de las condiciones reales de operación de los vehículos durante las pruebas que se llevan a cabo para estimar sus emisiones. De esta forma, hoy en día es posible conocer los denominados “factores de emisión” de los vehículos en función de características tales como su edad, estado de mantenimiento, y tamaño del motor.

Del mismo modo, el avance en las técnicas de medición en ruta (e.d., metodologías que no requieren el uso de instalaciones fijas en un laboratorio de medición de emisiones vehiculares) ha permitido realizar la caracterización de emisiones en flotas de ciudades de todo el mundo logrando así resultados que corresponden a las condiciones reales de operación, tales como altura sobre el nivel del mar y tipo y calidad de los combustibles utilizados.

Esto último representa un cambio significativo en la práctica que durante varios años dominó los ejercicios de estimación de emisiones en ciudades del mundo en desarrollo y que sigue siendo común hoy en día. Dicha práctica se refiere al uso de modelos de estimación de emisiones, basados en factores de emisión determinados en pruebas realizadas en laboratorios de ciudades pertenecientes a economías desarrolladas.

Si bien estos modelos han sido de gran ayuda para la toma de decisiones en lugares que no cuentan con la capacidad financiera o técnica para realizar sus propios experimentos de emisiones vehiculares, al mismo tiempo es claro que los resultados obtenidos de esta forma no son ideales dado su alto margen de incertidumbre. Esto quiere decir que el uso de dichos modelos es un excelente punto de partida pero que no es recomendable detenerse en dicho punto. Por el contrario, se deben llevar a cabo los esfuerzos que sean del caso para documentar de mejor forma las emisiones que sean representativas de las particularidades de carácter local.

### 2.1. Experiencias internacionales

Salles et al. (1995) determinó el inventario de emisiones vehiculares para la ciudad de París haciendo uso de una técnica de modelación en donde combinó información estadística de flujos migratorios de contaminantes con información recopilada en campo sobre la velocidad y densidad del tráfico en diferentes vías.

Rakesh et al. (2006) utilizó el modelo MicrofacNO<sub>x</sub> para determinar las emisiones vehiculares de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) en Canadá. Este modelo es utilizado para proveer factores de emisión con una alta resolución tanto espacial como temporal y, a diferencia del comúnmente utilizado modelo MOBILE, cuenta con la capacidad de proveer factores de emisión de forma desagregada. En este estudio se encontró que las emisiones de NO<sub>x</sub> tienen alta dependencia a la composición y velocidad de la flota vehicular así como a las condiciones de temperatura de la ciudad.

Haciendo uso de una metodología de medición remota con equipos de tecnología infrarroja no dispersiva y de espectroscopía ultravioleta para determinar las emisiones de monóxido de carbono (CO) y NO<sub>x</sub> de los vehículos que pasaban por el lugar, Singer et al. (1999) estimó un inventario de emisiones para la costa del sur de California encontrando los siguientes resultados para las emisiones diarias de contaminantes: 4,700 toneladas de CO y 550 toneladas de compuestos orgánicos volátiles (VOC).

Los métodos de medición remota son relativamente fáciles de implementar y de bajo costo al mismo tiempo que permiten la construcción de extensas bases de datos de factores de emisión en cortos intervalos de tiempo. Adicionalmente, bajo esta metodología, los conductores no se percatan de que están siendo objeto de dichas mediciones (Pokharel et al., 2002). Una de sus más grandes limitaciones, sin embargo, tiene que ver con la imposibilidad de conocer el régimen del motor o el estado de mantenimiento del mismo en el momento que son monitoreadas las emisiones.

Guo et al. (2006) desarrolló un inventario de emisiones para la ciudad de Hangzhou en China haciendo uso de estas mismas técnicas pero complementando sus mediciones con factores de emisión generados por el Proyecto Internacional de Emisiones (IVE). Según estos resultados, los factores de emisión IVE subestiman el inventario de emisiones de CO e hidrocarburos totales (THC) en 45% y 7%, respectivamente. El caso contrario fue documentado para las emisiones de NO<sub>x</sub>, en donde los factores IVE llevaron a una sobreestimación del 50% en el inventario de emisiones.

Reynolds et al. (2000) realizó un inventario de emisiones para la ciudad de Dublín (Irlanda) haciendo uso de factores de emisión reportados en la literatura científica así como utilizando datos proveídos por el sistema de control de tráfico de la ciudad (el cual documenta 500 intercepciones al interior del perímetro urbano). Los resultados de este trabajo indican que, en horas de alto tráfico vehicular, los factores de emisión de contaminantes son los siguientes: 65 g h<sup>-1</sup> para óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>); 1,600 g h<sup>-1</sup> para NO<sub>x</sub>; 9,500 g h<sup>-1</sup> para CO y 95 g h<sup>-1</sup> para material particulado (PM).

Qiao et al. (2006) realizó un inventario de emisiones en la ciudad de Beijing (China) en donde se hicieron mediciones de contaminantes utilizando sistemas PEMS (sistema portátil para medición de emisiones) que permiten la cuantificación de las emisiones en tiempo real y de forma directa (mediciones en el tubo de escape) mientras el vehículo se encuentra operando de forma regular en las calles (medición en ruta). Según los resultados de este estudio, el tipo de vía por la que circulan los vehículos (v.g., autopista vs. calle residencial) tiene un impacto significativo sobre las emisiones generadas por los mismos.

Behrentz et al., (2005) realizó un extenso estudio con el fin de determinar las variables que intervienen en las emisiones de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) en vehículos de la flota liviana que circula por el Sur de California. Durante esta investigación se llevaron a cabo más de 400 pruebas dinamométricas en donde se logró documentar que la temperatura al interior del catalizador es la variable más importante al momento de determinar las emisiones de N<sub>2</sub>O en un vehículo operado con gasolina. Según estos mismos resultados, el factor de emisión promedio de N<sub>2</sub>O para la flota evaluada fue de 20 mg km<sup>-1</sup>.

Durbin et al. (2008) determinó las emisiones de vehículos que operan con diésel en el Laboratorio de Emisiones Vehiculares de la Universidad de California (CE-CERT). Durante este trabajo se realizaron experimentos y pruebas en dinamómetro para cuantificar las emisiones de NO<sub>x</sub>, PM, THC y CO. Con base en los resultados obtenidos se logró establecer, entre otras cosas, correlaciones entre las emisiones de NO<sub>x</sub>, la edad de los vehículos, y la velocidad de operación de los mismos.

## 2.2. Experiencias previas en América Latina

Schifter et al. (2004) construyó un inventario de emisiones vehiculares para el área metropolitana de Ciudad de México a partir de mediciones remotas y haciendo uso de una metodología similar a la utilizada por Singer et al. (1999). Para los análisis correspondientes al tipo de vehículo asociado con dichas emisiones, se documentó el tráfico vehicular con una videocámara digital. El inventario de emisiones vehiculares estimado por medio de esta metodología indicó que las emisiones en la ciudad eran del orden de 750,000 toneladas al año de CO; 85,000 toneladas al año para THC y más de 100,000 toneladas al año para NO<sub>x</sub>.

Acosta et al. (2004) realizó mediciones de emisiones en 21 vehículos en Buenos Aires (Argentina) operados en diversas rutas de la ciudad. En este trabajo se adaptó un elemento vénturi subsónico al tubo de escape de los vehículos de prueba con el fin de obtener una medición confiable en lo que se refiere al flujo de gases emitido. Por su parte, el gas de escape fue desviado para lograr mediciones de las concentraciones de las especies de interés (THC, CO y dióxido de carbono - CO<sub>2</sub>) por medio de sensores electroquímicos y detectores infrarrojos. Como resultado de este proyecto se encontraron los siguientes factores de emisión (expresados en gramos por kilómetro): 180 a 390 para CO<sub>2</sub>; 0.1 a 280 para CO; 0.1 a 3.5 para HC y 0.1 a 6.5 para NO<sub>x</sub>.

La Fundación Estatal de Ingeniería del Medio Ambiente de Río de Janeiro desarrolló el inventario de fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos para su región metropolitana. En este estudio se seleccionaron las 185 vías con mayor volumen vehicular con el fin de analizar las características de la flota que por allí transitaba. Esta información fue complementada con registros oficiales de las autoridades de tránsito de la ciudad. Como resultado de este proyecto se determinó que las emisiones en esta región se distribuyen de la siguiente forma: 7,800 Ton año<sup>-1</sup> para la fracción respirable del material particulado (PM<sub>10</sub>); 7,500 Ton año<sup>-1</sup> de SO<sub>2</sub>; 60,200 Ton año<sup>-1</sup> de NO<sub>x</sub>; 314,700 Ton año<sup>-1</sup> de CO; y 53,400 Ton año<sup>-1</sup> de THC.

En el año 2005 se realizó una actualización del inventario de emisiones para la región metropolitana de Santiago de Chile por parte de la Comisión Nacional del Medio Ambiente, en donde los factores de emisión con los que se determinó dicho inventario fueron obtenidos por medio de los modelos COPERT III y MODEM. En este ejercicio se tuvieron en cuenta, además de los componentes típicos de fuentes fijas y móviles; fuentes aéreas, maquinaria de construcción y emisiones evaporativas. Para el caso de PM se tuvo además en cuenta las emisiones producidas por el desgaste de los frenos y neumáticos de los vehículos. Los resultados de este inventario indican que las emisiones en esta región son de 1,750 Ton año<sup>-1</sup> para PM<sub>10</sub>; 1,339 Ton año<sup>-1</sup> para la fracción fina del material particulado (PM<sub>2.5</sub>); 185,877 Ton año<sup>-1</sup> para CO; 38,973 Ton año<sup>-1</sup> para NO<sub>x</sub>; 18,967 Ton año<sup>-1</sup> para VOC; 189 Ton año<sup>-1</sup> para SO<sub>x</sub>; y 1,050 Ton año<sup>-1</sup> para amonio (NH<sub>3</sub>).

## 2.3. Experiencias previas en Colombia

Jaramillo et al. (2004) desarrolló un inventario de emisiones para la zona industrial de Cali-Yumbo utilizando factores de emisión determinados a partir del modelo MOBILE 6.0, incluyendo vías arterias y secundarias. A partir de este esfuerzo se encontraron los siguientes resultados (expresados en toneladas emitidas por año): 318,053 para CO; 29,260 para VOC; 18,966 para NO<sub>x</sub>, 4,133 para SO<sub>x</sub> y 1,052 para PM<sub>10</sub>.

Toro et al. (2006) desarrolló un inventario de emisiones para Medellín y el Valle de Aburrá haciendo uso de la herramienta de modelación ETROMBE (la cual permite estimar las emisiones con una resolución espacial de un kilómetro cuadrado y una resolución temporal de una hora) en combinación con factores de emisión generados a partir de la metodología CORINAIR. De esta forma se estimaron las siguientes emisiones (expresadas en toneladas de contaminante por año): 104,118 para CO; 14,779 para NO<sub>x</sub>; 27,627 para VOC; 989 para TSP y 920 para SO<sub>2</sub>.

## 2.4. Experiencias previas en Bogotá

Behrentz et al. (2005) desarrolló un inventario de emisiones para vehículos livianos que operan con gasolina en Bogotá haciendo uso de factores de emisión determinados en pruebas dinámicas realizadas en California. Los resultados de este estudio indican que el inventario de emisiones en la ciudad (en unidades de toneladas por año) asociado con el tráfico automotor se distribuye de la siguiente forma: 230,000 para CO; 3,000,000 para CO<sub>2</sub>; 12,000 para NO<sub>x</sub>; 25,000 para THC; 1,400 para metano (CH<sub>4</sub>) y 90 para N<sub>2</sub>O.

Zarate et al. (2007) desarrolló un inventario de emisiones para la ciudad de Bogotá basándose en una metodología de medición indirecta bajo el principio de modelación reversa en un cañón urbano. En este caso se llevaron a cabo mediciones de concentraciones de contaminantes criterio en una importante vía de la ciudad de forma simultánea a la aplicación de una metodología de sustancias trazadoras para cuantificar las condiciones de mezcla atmosférica. Según estos resultados, las emisiones para la flota vehicular de Bogotá son las siguientes: 840 toneladas al día de CO; 40 toneladas al día de NO<sub>x</sub>, 4.5 toneladas al día de PM; 6.5 toneladas al día para SO<sub>x</sub> y más de 5,000 toneladas al día para CO<sub>2</sub>.

## 2.5. Proyecto internacional de emisiones - IVE

Muchos de los modelos computacionales utilizados para la estimación de inventarios de emisiones han sido desarrollados en Europa y Estados Unidos. Esto significa que los factores de emisión y de actividad vehicular que conforman los mismos no necesariamente son representativos de las condiciones de una ciudad del mundo en desarrollo.

Como respuesta a esta situación y gracias a la financiación proveída por el Banco Mundial y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) se dio inicio al proyecto IVE. Este esfuerzo de carácter internacional se estableció con el fin de generar no solo una serie de factores de emisión que fuesen representativos para las condiciones del mundo en desarrollo sino también para diseñar y aplicar una metodología de medición de emisiones en ruta (mediciones abordó) que pudiera ser replicada de forma estándar en muchas ciudades diferentes.

De esta manera, en la primera etapa de cada proyecto IVE que es aplicado en una ciudad, se documentan las condiciones de tráfico y se hace uso de factores de emisión teóricos para la estimación del inventario de emisiones vehiculares. Esta fase es posteriormente complementada por un ejercicio más complejo e integral en donde se desarrollan pruebas de emisiones directas con el fin de construir un inventario que sea robusto y confiable.

Durante la primera fase del proyecto IVE realizada en Bogotá, Giraldo et al. (2005) estimó los factores de actividad vehicular por medio de cerca de 550 encuestas realizadas en estacionamientos públicos y privados. Adicionalmente, se instalaron cámaras de video en diferentes zonas de la ciudad y a partir de lo documentado por las mismas se logró establecer el nivel de ocupación de las vías de acuerdo a las diferentes categorías vehiculares utilizadas. Del mismo modo, cerca de 50 equipos de posicionamiento global (GPS) fueron utilizados para documentar los patrones de manejo y a través de los mismos se generó el ciclo de manejo representativo para cada una de las diferentes vehiculares categorías existentes en la ciudad.

Durante esta misma fase, tal y como fue mencionado anteriormente, se utilizaron factores de emisión teóricos que fueron ajustados teniendo en cuenta condiciones de tecnología vehicular, presencia de sistemas de control de emisiones, temperatura, humedad, calidad de combustibles, altura, pendiente de las vías y patrón de conducción. Por medio de dichos ajustes se determinaron las siguientes emisiones (expresadas en toneladas por año): 820,000 para CO; 2,000 para PM<sub>10</sub>; 2,200 para SO<sub>x</sub>, 50,000 para NO<sub>x</sub>, 70,000 para VOC; 4,500,000 para CO<sub>2</sub>, 110 para N<sub>2</sub>O y 15,000 para CH<sub>4</sub>.

Este mismo proyecto, haciendo uso de una metodología que es replicada de forma idéntica en cada caso ha sido también desarrollado en las siguientes ciudades: Los Ángeles (Estados Unidos), Nairobi (Kenya), Santiago (Chile), Pune (India), Ciudad de Méjico (Méjico), Lima (Perú), Sao Paulo (Brasil), Estambul (Turquía), Buenos Aires (Argentina), Almaty (Kazakhstan), Beijing y Shangai (China). En la Figura 2.1 se muestra un resumen de resultados encontrados para algunas de estas ciudades.

Herrera (2007) realizó una actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá utilizando como base la metodología IVE (Fase I) pero haciendo algunos ajustes a la información de entrada del modelo utilizado. Según estos resultados, el inventario de emisiones vehiculares de la ciudad se distribuye de la siguiente forma: 380,000 toneladas al año de CO; 40,000 toneladas al año de VOC; 42,000 toneladas al año de NO<sub>x</sub>; 1,100 toneladas al año para PM<sub>2.5</sub>; y 75 toneladas al año para N<sub>2</sub>O.

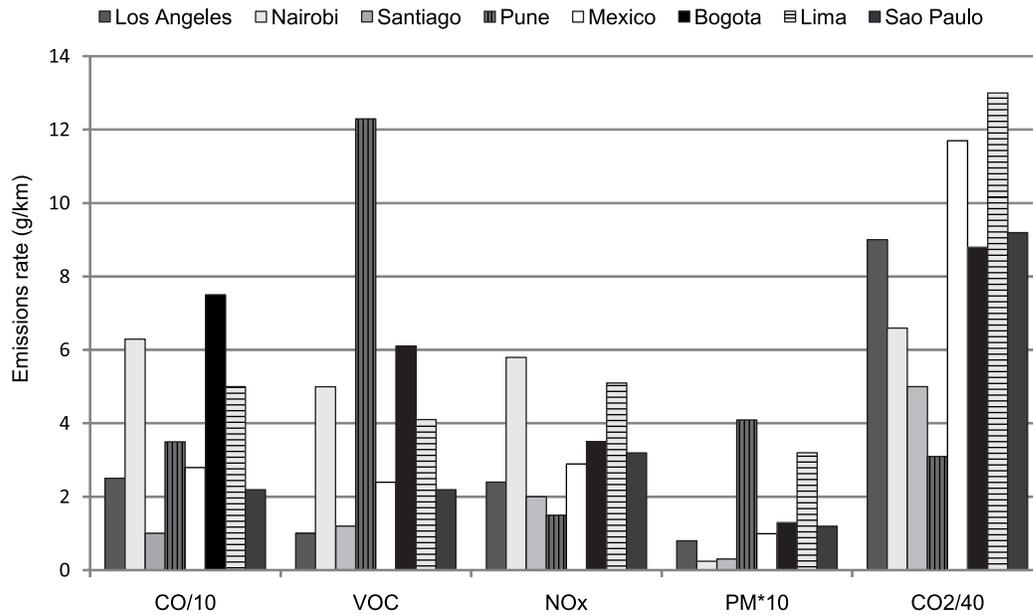


Figura 2.1. Factores medios de emisión (g km<sup>-1</sup>) encontrados durante el proyecto IVE.

## 3. Metodología

Durante el desarrollo de este proyecto, la información necesaria para estimar el inventario de emisiones provenientes de fuentes vehiculares (expresado en términos de las toneladas de contaminantes generados cada año) fue recopilada en dos etapas: **1)** En primer lugar, se compiló información existente referente al tamaño y distribución de la flota vehicular de la ciudad así como de sus niveles de actividad (distancias recorridas al año). **2)** Posteriormente, con el fin de estimar los factores de emisión de los vehículos se llevó a cabo una masiva campaña de campo (sin precedentes en ninguna ciudad del país) en la que se realizaron más de 200 experimentos de mediciones directas de emisiones, utilizando técnicas en tiempo real y bajo condiciones reales de operación de los vehículos.

La metodología utilizada corresponde al mismo protocolo definido en el Proyecto IVE (ISSRC, 2004) el cual, tal y como fue mencionado anteriormente, ha sido estandarizado de forma rigurosa y aplicado con éxito en más 13 ciudades alrededor del mundo.

### 3.1. Flota vehicular y factor de actividad

El factor de actividad y el tamaño de la flota de la ciudad, así como su conformación y distribución en diferentes categorías vehiculares fue determinado usando referencias y estudios anteriores adelantados por el CIIA y otras entidades.

#### 3.1.1. Estimación del tamaño de la flota vehicular

Dada la diversidad en la cantidad y calidad de la información disponible, distintas categorías vehiculares fueron objeto de diferentes métodos al momento de estimar su tamaño. De esta forma, se aplicaron metodologías específicas para estimar el número de **a)** automóviles particulares, taxis, camperos y camionetas, y buses del sistema de transporte público colectivo; **b)** vehículos que han sido sometidos a la reconversión tecnológica que permite operarlos con gas natural vehicular (GNV) como combustible; **c)** vehículos de la flota de transporte de carga; **d)** vehículos articulados de la flota de transporte masivo TransMilenio (TM).

Para el primer caso (automóviles particulares, taxis, camperos y camionetas, y buses del sistema de transporte público colectivo), se utilizaron las estadísticas disponibles en la Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá (SDM) en lo que se refiere a los vehículos que circulan por la ciudad. La base de datos correspondiente a esta información contaba con alrededor de 800,000 registros, correspondiente cada uno de ellos a un vehículo matriculado en la capital del país (SDM, 2005).

Para el caso de los vehículos reconvertidos a gas natural se consideró que la mejor fuente de información no era la SDM sino el gremio que promueve y comercializa dicho combustible. De esta forma, el número de vehículos que pertenecen a la categoría en referencia fue determinado a partir de estadísticas suministradas por la firma Gazel S.A. (actualizadas para septiembre de 2008). Según éstas, por las calles de Bogotá circulan cerca de 87,000 vehículos de dichas características.

Dadas las particularidades y especificidades de movilidad de este sector de la flota, para el caso de los vehículos de carga también se consideró una fuente alterna de información. En dicho caso, se utilizó el Estudio de Centros de Información Logística de Carga de Bogotá (SDM, 2007) en donde se recopiló y analizó información referente al número de toneladas de carga que ingresan y salen diariamente de la ciudad.

Estos datos fueron a su vez comparados y ajustados de acuerdo a lo reportado en el Informe del Parque Automotor de Transporte de Carga en Colombia (DTT, 2006), en donde se detalla información referente al número de camiones registrados a nivel nacional, el combustible que utilizan y el número de ejes con el que cuentan. Según este informe, el parque automotor de carga en Colombia está compuesto por poco menos de 194,000 vehículos, de los cuales 160,000 son camiones de dos ejes.

De los resultados de los estudios previamente descritos fue posible concluir que el flujo de vehículos de carga en Bogotá es de aproximadamente 25,000 camiones.

Para el caso de los buses articulados de TM, el tamaño de la flota fue determinado a partir de estadísticas proveídas por TransMilenio S.A. (TMSA), correspondiendo a 1,071 buses troncales (TMSA, 2008).

### 3.1.2. Estimación del factor de actividad de la flota

Al igual que en el caso del tamaño de la flota, la metodología de estimación de los factores de actividad (expresados en términos del kilometraje recorrido en un año) fue función de la categoría vehicular analizada. Para este tipo de información se aplicaron metodologías específicas para **a)** vehículos particulares, camperos y camionetas; **b)** taxis, camiones, microbuses, buses y busetas; **c)** buses articulados de TM; **d)** buses escolares y de turismo.

Para el primer caso (vehículos particulares, camperos y camionetas) se hizo uso de la metodología propuesta por Behrentz et al. (2005) en donde se establecieron correlaciones entre el kilometraje acumulado y el año modelo de los vehículos que hacían parte de la base de datos de la Revista Motor en su sección de venta de vehículos usados<sup>1</sup>. Con este procedimiento se establecieron las siguientes relaciones entre el factor de actividad (expresado en kilómetros al año) y la edad del vehículo (expresada en años)<sup>2</sup>:

- 1) Factor de actividad (vehículos de pasajeros) =  $8,000 + (25,000) / (\text{edad})$ .
- 2) Factor de actividad (camperos y camionetas) =  $10,500 + (30,000) / (\text{edad})$ .

Para el caso del transporte público colectivo (microbuses, buses y busetas), público individual (taxis) y de carga (camiones), los factores de actividad fueron supuestos equivalentes a los documentados en la implementación de la primera fase del Proyecto IVE en la ciudad de Bogotá (Giraldo, 2005). En dicho estudio, los factores de actividad fueron determinados a partir de aforos vehiculares realizados en las calles así como a través de encuestas aplicadas a representantes de los sectores involucrados. Los resultados de esta metodología arrojaron valores entre 31,000 kilómetros por año (para el caso de camiones) y 73,000 kilómetros al año (para el caso de taxis).

El factor de actividad para la flota troncal (buses articulados) de TM fue determinado a partir de estadísticas proveídas por TMSA y corresponden a un valor medio en la ciudad de cerca de 70,000 kilómetros al año.

Finalmente, el factor de actividad para buses escolares y de turismo fue obtenido a partir de consultas a diversos gremios de empresas prestadores de estos servicios. Haciendo uso de los resultados de dichas consultas, se determinó que los vehículos pertenecientes a esta categoría vehicular recorren aproximadamente 72,000 kilómetros al año y que durante los períodos de vacaciones escolares tan sólo opera el 50% de esta flota.

<sup>1</sup> Esta fuente de información cuenta con decenas de miles de registros.

<sup>2</sup> Estas relaciones reproducen la realidad del uso de los vehículos privados en donde éste se reduce progresivamente a medida que los vehículos se acercan al cumplimiento de su vida útil.

## 3.2. Factores de emisión

La metodología utilizada para la determinación de los factores de emisión para los vehículos de Bogotá estuvo compuesta por cuatro etapas (ver Figura 3.1): **1)** En primer lugar se seleccionaron las categorías vehiculares que serían objeto de las mediciones de emisiones, de tal forma que éstas fuesen representativas de la flota de la ciudad; **2)** De forma paralela, se llevó a cabo la selección de las rutas en las que se realizarían los ensayos de emisiones; **3)** Posteriormente, se desarrolló e implementó la estrategia para obtener los vehículos específicos que fueron sometidos a los experimentos de determinación de emisiones, incluyendo máquinas operadas con ACPM<sup>3</sup>, gasolina y GNV; **4)** Se llevó a cabo la campaña de campo en la que se realizaron más de 200 experimentos de mediciones directas de emisiones (con el fin de determinar los factores de emisión en términos de gramos de contaminantes generados por cada kilómetro recorrido) con equipos que operaban en tiempo real.

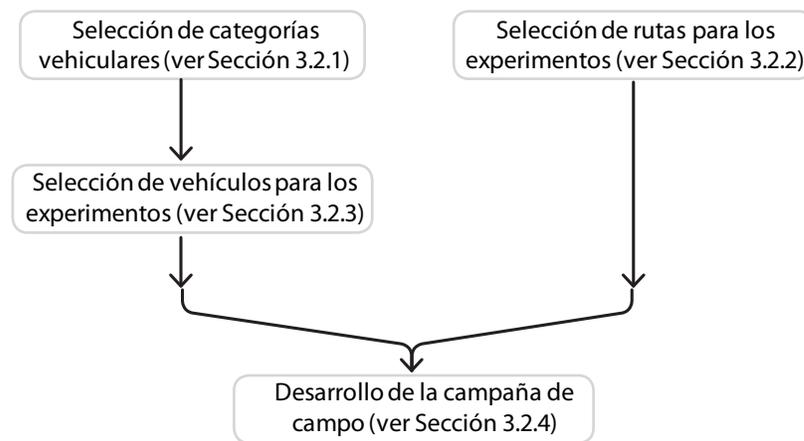


Figura 3.1. Diagrama esquemático de la metodología para la determinación de los factores de emisión de la flota vehicular de Bogotá.

### 3.2.1. Selección de categorías vehiculares

Tal y como es el caso de cualquier inventario de emisiones y debido a razones de viabilidad logística y presupuestal, las mediciones directas en el tubo de escape de los vehículos no se realizaron en el 100% de la flota de la ciudad sino en una muestra seleccionada de tal forma que fuese representativa de la misma.

En la selección de dichas categorías se tuvieron en cuenta los siguientes criterios: edad del vehículo (año modelo); tipo de vehículo (pasajeros, campero o camioneta, taxi, bus o buseta, colectivo, camión, bus escolar o de turismo, bus articulado de TM); tecnología de control de emisiones (v.g., presencia de convertidor catalítico - TWC<sup>4</sup>); tamaño del motor (cilindraje); y tipo de combustible (gasolina, GNV, ACPM).

Para determinar las categorías vehiculares que conformaron la muestra que fue objeto de las mediciones directas de emisiones, se llevó a cabo un análisis descriptivo de la forma en que éstas representaban al universo del parque automotor de la ciudad. Esto se hizo de acuerdo a los criterios antes mencionados y según la información disponible en la Secretaría de Movilidad al momento de realizar este ejercicio (ver tablas 3.1 y 3.2).

<sup>3</sup> ACPM = Aceite combustible para motores que es utilizado en vehículos operados con tecnología diésel. Dado que este estudio se desarrolló en la ciudad de Bogotá, el combustible utilizado durante las pruebas de emisiones en realidad correspondió al denominado ACEM o diésel extra colombiano. Para el período en el que se adelantó este estudio, dicho combustible correspondía a un contenido de azufre de 1,000 ppm.

<sup>4</sup> TWC = Three-way catalyst (convertidor catalítico de tres vías).

NOTA: La selección y distribución de las categorías vehiculares que hacen referencia a automotores operados con gasolina y ACPM se llevó a cabo, tal y como fue mencionado previamente, con base en la información reportada por la SDM y de acuerdo a la representatividad de dichas categorías. Este no fue el caso para GNV, en donde la decisión de incluir estos vehículos en la muestra fue motivada por la importancia que dicho combustible tiene para la política pública ambiental de las ciudades colombianas.

NOTA 2: La decisión final de incluir una categoría en particular se vio afectada por la posibilidad real de obtener suficientes vehículos (ver Sección 3.2.3) que pertenecieran a dicha categoría durante el desarrollo de la campaña de campo.

Finalmente, a partir de las consideraciones antes mencionadas, en donde el objetivo siempre fue contar con una muestra lo más representativa posible de las condiciones observadas en la ciudad, se seleccionaron las siguientes categorías vehiculares (ver figuras 3.2 y 3.3):

- Vehículo de pasajeros; gasolina; TWC;  $\leq 1,400$  cc (**VP1**).
- Vehículo de pasajeros; gasolina; TWC;  $> 1,400$  cc (**VP2**).
- Vehículo de pasajeros; gasolina; No TWC<sup>5</sup>;  $\leq 1,400$  cc (**VP3**).
- Vehículo de pasajeros; gasolina; No TWC;  $> 1,400$  cc (**VP4**).
  
- Campero o camioneta; gasolina; TWC (**CC1**).
- Campero o camioneta; gasolina; No TWC;  $< 2,500$  cc (**CC2**).
- Campero o camioneta; gasolina; No TWC;  $\geq 2,500$  cc (**CC3**).
  
- Campero o camioneta; GNV (**CC4**).
  
- Taxi; gasolina (**T1**).
- Taxi; GNV (**T2**).
  
- Bus o buseta; ACPM;  $< 5,000$  cc (**B1**).
- Bus o buseta; ACPM;  $\geq 5,000$  cc (**B2**).
  
- Camión; ACPM; Año modelo inferior a 1997;  $< 6,000$  cc (**C1**).
- Camión; ACPM; Año modelo inferior a 1997;  $\geq 6,000$  cc (**C2**).
- Camión; ACPM; Año modelo superior a 1997 (**C3**).
  
- Bus articulado de TM; ACPM (**TM**).
- Bus escolar o de turismo; ACPM (**ET**).
- Microbus; ACPM (**MB**).

<sup>5</sup> "No TWC" significa que el vehículo no cuenta con control de emisiones como parte de su sistema de evacuación de gases de combustión.

**Tabla 3.1.** Distribución de la flota vehicular de carga liviana de Bogotá (fuente: SDM, 2005).

Tipo de vehículo	No. Vehículos	Control de emisiones	No. Vehículos	Cilindraje (cc)	No.vehículos	Porcentaje con respecto al total de vehículos	Categoría
Automóvil	489,760	TWC	184,282	≤ 1,400	125,056	16	VP1
				> 1,400	59,226	7	VP2
		No TWC	305,478	≤ 1,400	165,997	21	VP3
				> 1,400	139,483	18	VP4
Camperos y camionetas	182,064	TWC	56,604			7	CC1
		No TWC	125,459	< 2,500	65,426	8	CC2
				> 2,500	60,033	8	CC3
Taxi	50,471					6	
Total	796,958						

NOTA: El total incluye 74,663 vehículos que pertenecen a categorías que no fueron evaluadas como parte de este estudio (motos y buses, busetas y camiones que operan con gasolina). TWC = Convertidor catalítico de tres vías.

**Tabla 3.2.** Distribución de la flota vehicular de carga pesada de Bogotá (SDM, 2005).

Tipo de vehículo	No. Vehículos	Año modelo	No. Vehículos	Cilindraje (cc)	No.vehículos	Porcentaje con respecto al total de vehículos	Categoría
Camión	8,640	< 1997	3,931	< 6,000	1,725	5	C1
				≥ 6,000	2,205	7	C2
		≥ 1997	4,708			15	C3
Bus y buseta (público)	14,457			< 5,000	65,426	23	B1
				> 5,000	60,033	22	B2
Bus articulado	855					3	TM
Microbus	5,397					17	MB
Bus escolar o de turismo	337					1	ET
Total	32,202						

NOTA: El total incluye 2,516 vehículos que pertenecen a categorías que no fueron evaluadas como parte de este estudio (vehículos de pasajeros, camperos y camionetas que operan con ACPM, tractores, y maquinaria agrícola e industrial).

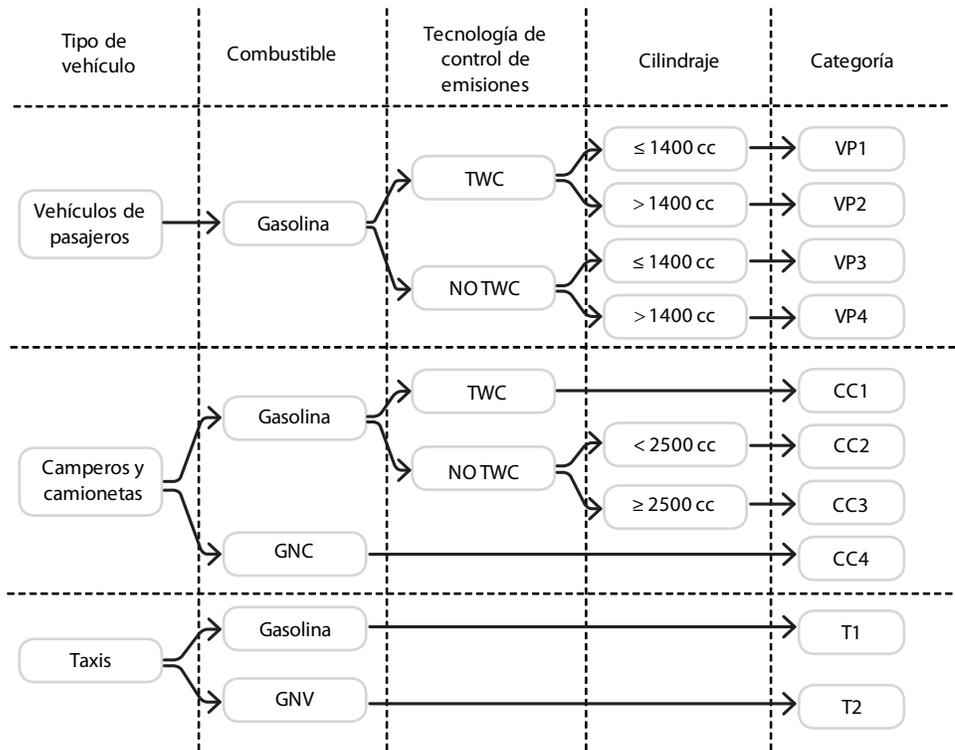


Figura 3.2. Categorías vehiculares para automotores que operan con gasolina y GNV.

VP1 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; TWC; ≤ 1,400 cc. VP2 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; TWC; > 1,400 cc. VP3 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; No TWC; ≤ 1,400 cc. VP4 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; No TWC; > 1,400 cc. CC1 = Camperos o camionetas; Gasolina; TWC. CC2 = Camperos o camionetas; Gasolina; No TWC; < 2,500 cc. CC3 = Camperos o camionetas; Gasolina; No TWC; ≥ 2,500 cc. CC4 = Camperos o camionetas; GNV; T1 = Taxi; Gasolina. T2 = Taxi; GNV.

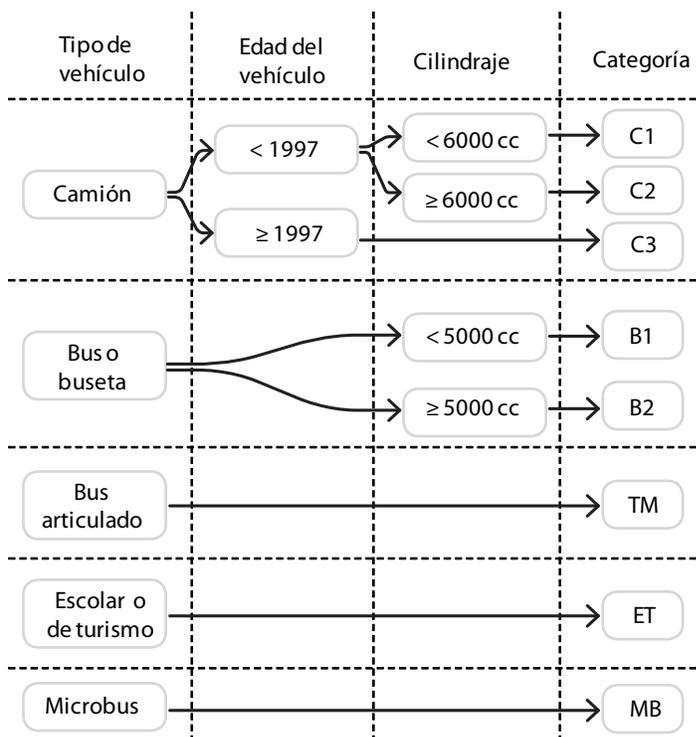


Figura 3.3. Categorías vehiculares para vehículos que operan con ACPM.

B1 = Bus o buseta; ACPM; < 5,000 cc. B2 = Bus o buseta; ACPM; ≥ 5,000 cc. C1 = Camión; ACPM; año modelo < 1997; < 6,000 cc. C2 = Camión; ACPM; año modelo < 1997; ≥ 6,000 cc. C3 = Camión; ACPM; año modelo ≥ 1997. TM = Bus articulado de TM; ACPM. ET = Bus escolar o de turismo; ACPM. MB = Microbus; ACPM.

### 3.2.2. Selección de la ruta para las pruebas de emisiones

La totalidad de las pruebas de emisiones para los vehículos de carga liviana (gasolina y GNV) así como para las categorías de vehículos de carga pesada con excepción de los buses articulados de TM, fueron realizadas sobre un único circuito en las calles de Bogotá cuyo punto de origen se encontraba en la localidad de Puente Aranda. Dicho circuito se encontraba compuesto por vías principales e intermedias (Avenida El Dorado, Avenida Carrera 68, Avenida de las Américas y Avenida Calle 13) así como por vías secundarias de la capital del país (ver Figura 3.4).

El circuito fue seleccionado de tal forma que como parte del mismo se sometiera al vehículo al más variado régimen de conducción al incluir vías rápidas y vías típicamente congestionadas así como superficies planas y a desnivel. Este circuito tiene una longitud aproximada de 10 kilómetros y, dependiendo del tráfico durante el desarrollo de la prueba, su recorrido tardaba alrededor de 30 minutos.

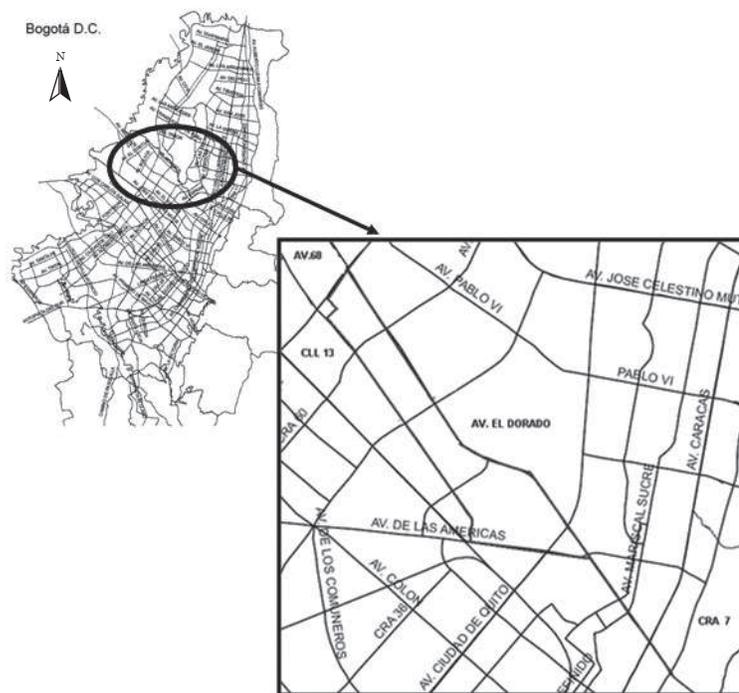


Figura 3.4. Ubicación del circuito utilizado para las pruebas en ruta.

Por su parte, durante la etapa de la campaña en la que se realizaron monitoreos de emisiones en vehículos de la flota articulada de TM, las pruebas se llevaron a cabo al interior de las troncales y en los carriles dedicados para la operación de estos vehículos. Dichas pruebas fueron adelantadas en horarios en los que las troncales en referencia se encontraban fuera de servicio.

Dado que durante este estudio se consideraron tres operadores distintos de TM (Si02, Transmasivo, y Express del Futuro), las mediciones correspondientes a los vehículos pertenecientes a dichas empresas se realizaron en las troncales que son operadas por las mismas: Avenida de las Américas, Avenida Suba y Avenida Calle 80, respectivamente (ver Figura 3.5). En estos casos, la duración de las pruebas fue entre 40 y 55 minutos recorriendo una distancia entre 27 y 31 kilómetros.

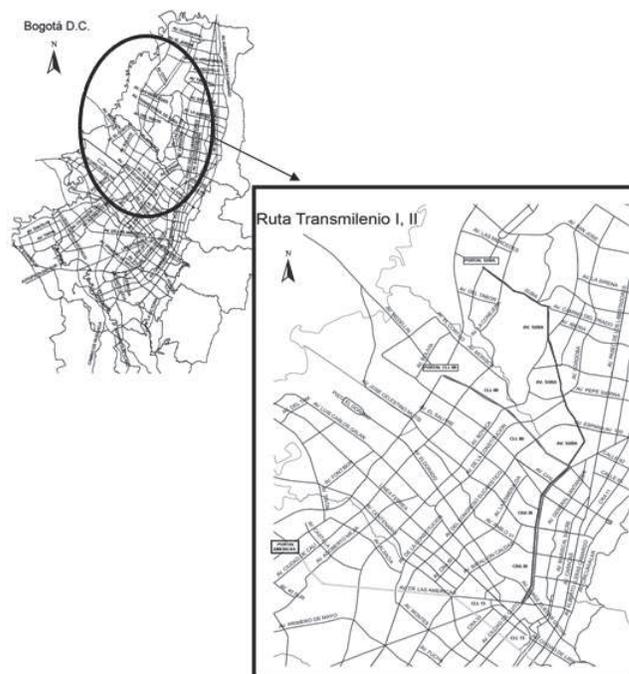


Figura 3.5. Ubicación de los circuitos utilizados para las pruebas con buses troncales.

### 3.2.3. Obtención de los vehículos

Con excepción de los buses articulados de TM, los vehículos de prueba (ver tablas 3.3. y 3.4) utilizados durante la realización de la campaña de campo fueron obtenidos como resultado de una convocatoria abierta y pública por parte del CIIA. En dicho proceso, difundido masivamente a través de diversas estrategias, se ofreció una remuneración económica como contraprestación a la utilización de los vehículos en los experimentos realizados<sup>6</sup>. Adicionalmente, empresas tales como Coca Cola y Gas Natural S.A. aportaron vehículos de prueba de forma voluntaria y gratuita.

<sup>6</sup> La remuneración para vehículos privados y taxis fue de \$100,000 diarios mientras que para camiones, buses y busetas fue de \$250,000. También se presentó el caso de algunos vehículos especiales (v.g., grúas) que tuvieron que ser compensados de acuerdo a su tarifa horaria de operación (~\$80,000). Los operadores de TM ofrecieron el uso de sus vehículos sin costo alguno para el proyecto (gracias a la gestión realizada por TMSA).

Tabla 3.3. Automotores de carga liviana utilizados como vehículos de prueba para la determinación de los factores de emisión en Bogotá.

Vehículo	Categoría	Marca	Línea	Modelo	Cilindraje	Combustible	Tipo
1	T2	Renault	Symbol Citius	2007	1400	GNV	Taxi
2	T1	Hyundai	Atos	2004	1000	Gasolina	Taxi
3	T1	Hyundai	Giro	2005	1500	Gasolina	Taxi
4	T2	Hyundai	Atos	2005	1000	Gasolina	Taxi
5	CC1	Chevrolet	Gran Vítara	2006	2000	Gasolina	Campero/camioneta
6	VP2	Renault	Scenic	2002	1600	Gasolina	Vehículo de pasajeros
7	VP4	Subaru	Legacy	1993	2200	Gasolina	Vehículo de pasajeros
8	CC4	Ford	150	1998	5000	GNV	Campero/camioneta
9	VP1	Renault	Symbol	2003	1400	Gasolina	Vehículo de pasajeros
10	VP3	Fiat	Topolino 750	1978	750	Gasolina	Vehículo de pasajeros
11	VP1	Renault	19 energy	1400	2000	Gasolina	Vehículo de pasajeros
12	VP1	Chevrolet	Alto	2001	1000	Gasolina	Vehículo de pasajeros
13	T1	Hyundai	Atos	2007	1000	Gasolina	Taxi
14	T2	Daewoo	Racer	1997	1500	GNV	Taxi
15	T2	Daewoo	Cielo	2001	1500	GNV	Taxi
16	T1	Hyundai	Atos	2007	1000	Gasolina	Taxi
17	VP1	Renault	Twingo	2003	1300	Gasolina	Vehículo de pasajeros
18	VP4	Nissan	Sentra	1995	1600	Gasolina	Vehículo de pasajeros
19	CC1	Chevrolet	Gran Vítara	2003	2000	Gasolina	Campero/camioneta
20	CC3	Jeep	Grand Cherokee	1998	5200	Gasolina	Campero/camioneta
21	VP4	Honda	Accord	1982	1600	Gasolina	Vehículo de pasajeros
22	VP2	Renault	Megane	2000	1600	Gasolina	Vehículo de pasajeros
23	CC1	Nissan	Patrol	1999	4500	Gasolina	Campero/camioneta
24	VP3	Chevrolet	Sprint	1996	1000	Gasolina	Vehículo de pasajeros
25	T1	Hyundai	Atos	2005	1000	Gasolina	Taxi
26	T1	Chevrolet	724	2007	1000	Gasolina	Taxi
27	T2	Hyundai	Atos	2006	1000	GNV	Taxi
28	CC3	Chevrolet	Trooper	1995	2600	Gasolina	Campero/camioneta
29	CC3	Chevrolet	Blazer	1996	4500	Gasolina	Campero/camioneta
30	CC2	Chevrolet	Luv	1997	2300	Gasolina	Campero/camioneta
31	VP1	Renault	Twingo	2003	1300	Gasolina	Vehículo de pasajeros
32	CC3	Jeep	Cherokee	1993	4000	Gasolina	Campero/camioneta
33	CC1	Chevrolet	Vítara	2003	1600	Gasolina	Campero/camioneta
34	CC4	Toyota	Land Cruiser	1998	4500	GNV	Campero/camioneta
35	CC1	Kia	Carens LX	2007	2000	Gasolina	Campero/camioneta
36	VP4	Renault	19	1996	1800	Gasolina	Vehículo de pasajeros
37	VP4	Hyundai	Accent	1996	1500	Gasolina	Vehículo de pasajeros
38	CC2	Mitsubishi	Montero	1993	2400	Gasolina	Campero/camioneta
39	VP4	Mazda	626 L	1988	1800	Gasolina	Vehículo de pasajeros
40	VP4	Renault	21	1989	2000	Gasolina	Vehículo de pasajeros
41	VP3	Chevrolet	Swift	1994	1300	Gasolina	Vehículo de pasajeros
42	VP2	Mazda	3	2006	1600	Gasolina	Vehículo de pasajeros
43	VP3	Chevrolet	Swift	1996	1300	Gasolina	Vehículo de pasajeros
44		Mazda	121	1999	1300	Gasolina	Vehículo de pasajeros
45	CC2	Nissan	Patrol	1982	2300	Gasolina	Campero/camioneta
46	CC2	Chevrolet	Trooper	1990	2400	Gasolina	Campero/camioneta
47	CC2	Lada	Niva	1981	1600	Gasolina	Campero/camioneta
48	CC2	Chevrolet	Luv	1996	1600	Gasolina	Campero/camioneta
49	T1	Hyundai	Atos	2007	1000	Gasolina	Taxi
50	T2	Hyundai	Atos	2007	1000	Gasolina	Taxi
51	T2	Daewoo	Cielo	1999	1500	GNV	Taxi
52	T1	Daewoo	Cielo	1997	1500	Gasolina	Taxi
53	CC4	Chevrolet	Rodeo	2000	3200	GNV	Campero/camioneta
54	VP4	Mazda	626	1984	1800	Gasolina	Vehículo de pasajeros
55	CC2	Chevrolet	Trooper	1988	2400	Gasolina	Campero/camioneta
56	VP2	Citroen	Xsara	1998	1800	Gasolina	Vehículo de pasajeros
57	CC3	Ford	Bronco	1980	5000	Gasolina	Campero/camioneta

## Continuación

Vehículo	Categoría	Marca	Línea	Modelo	Cilindraje	Combustible	Tipo
58	VP2	Chevrolet	Epica	2005	2000	Gasolina	Vehículo de pasajeros
59	VP2	Volkswagen	Jetta	2007	2000	Gasolina	Vehículo de pasajeros
60	VP3	Mazda	323	1985	1300	Gasolina	Vehículo de pasajeros
61	T2	Daewoo	Racer	1996	1500	GNV	Taxi
62	T2	Hyundai	Atos	2007	1000	GNV	Taxi
63	T2	Daewoo	Racer	1995	1500	GNV	Taxi
64	T2	Daewoo	Racer	1996	1500	Gasolina	Taxi
65	VP1	Chevrolet	Alto	2000	1000	Gasolina	Vehículo de pasajeros
66	CC2	Datsun	Capacete	1980	1800	Gasolina	Campero/camioneta
67	CC3	Ford	F150	1996	5000	Gasolina	Campero/camioneta
68	VP1	Renault	Megane	2002	1400	Gasolina	Vehículo de pasajeros
69	VP4	Subaru	Leone	1991	1800	Gasolina	Vehículo de pasajeros
70	VP4	Mercedes	Benz 190E	1984	1900	Gasolina	Vehículo de pasajeros
71	VP4	Mazda	323	1989	1500	Gasolina	Vehículo de pasajeros
72	VP3	Renault	9	1988	1400	Gasolina	Vehículo de pasajeros
73	CC2	Daihatsu	Rocky	1991	2000	Gasolina	Campero/camioneta
74	T1	Hyundai	Accent	2001	1500	Gasolina	Taxi
75	T2	Chevrolet	Chevy Taxi	2003	1300	GNV	Taxi
76	CC3	Chevrolet	Blazer	1996	2400	Gasolina	Campero/camioneta
77	T2	Hyundai	Accent	2002	1500	GNV	Taxi
78	VP1	Renault	Symbol	2006	1400	Gasolina	Vehículo de pasajeros
79	VP2	Volkswagen	Jetta	2005	2000	Gasolina	Vehículo de pasajeros
80	CC4	Chevrolet	Custom	1971	3100	GNV	Campero/camioneta
81	DM	Chevrolet	724	2007	1000	GNV	Taxi
82	DM	Mazda	323	1993	1500	GNV	Taxi
83	VP1	Mazda	Allegro	2003	1300	Gasolina	Vehículo de pasajeros
84	T2	Hyundai	Accent	2002	1500	GNV	Taxi
85	T2	Mazda	323	1994	1500	GNV	Taxi
86	DM	Mazda	B22	2007	2200	GNV	Campero/camioneta
87	CC4	Ford	Bronco XLT	1995	5000	GNV	Campero/camioneta
88	DM	Mazda	B2600	2007	2600	GNV	Campero/camioneta
89	CC2	Chevrolet	Luv	1994	2300	Gasolina	Campero/camioneta
90	VP3	Datsun	120 Y	1981	1200	Gasolina	Vehículo de pasajeros
91	CC4	Ford	F 150	1994	5000	GNV	Campero/camioneta
92	VP3	Dacia	1410	1987	1400	Gasolina	Vehículo de pasajeros
93	VP3	Renault	9 Brio	1993	1300	Gasolina	Vehículo de pasajeros
94	CC2	Toyota	Hilux	1996	2400	Gasolina	Campero/camioneta
95	CC4	Ford	Explorer	1997	4000	GNV	Campero/camioneta
96	T2	Daewoo	Cielo	1999	1500	GNV	Taxi
97	T2	Daewoo	Cielo	1998	1500	GNV	Taxi
98	T2	Daewoo	Cielo	1999	1500	GNV	Taxi
99	DM	Mazda	B-2200	2007	2200	GNV	Campero/camioneta
100	VP2	Peugeot	206 Midnight	2007	1600	Gasolina	Vehículo de pasajeros
101	VP2	Hyundai	Accent	1998	1500	Gasolina	Vehículo de pasajeros
102	VP2	Renault	Megane	2006	1600	Gasolina	Vehículo de pasajeros
103	DM	Renault	Megane	2007	1600	GNV	Vehículo de pasajeros
104	DM	Mazda	B-22DC3	2007	2200	GNV	Campero/camioneta
105	DM	Ford	Explorer	1998	4000	GNV	Campero/camioneta
106	CC1	Mazda	B-22DC9	2003	2200	Gasolina	Campero/camioneta
107	T2	Daewoo	Cielo	1998	1500	GNV	Taxi
108	CC3	Chevrolet	Trooper	1991	2500	Gasolina	Campero/camioneta
109	T2	Hyundai	Accent	2003	1500	GNV	Taxi
110	VP2	Chevrolet	Zafira	2002	2000	Gasolina	Vehículo de pasajeros
111	VP4	Mazda	626	1998	2000	Gasolina	Vehículo de pasajeros
112	CC4	Ford	150	1997	5000	GNV	Campero/camioneta
113	DM	Jeep	Cherokee	1997	4000	GNV	Campero/camioneta
114	CC3	Land Rover	Discovery	1966	3500	Gasolina	Campero/camioneta

VP1 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; TWC; ≤ 1,400 cc. VP2 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; TWC; > 1,400 cc. VP3 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; No TWC; ≤ 1,400 cc. VP4 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; No TWC; > 1,400 cc. CC1 = Campero o camioneta; Gasolina; TWC. CC2 = Campero o camioneta; Gasolina; No TWC; < 2,500 cc. CC3 = Campero o camioneta; Gasolina; No TWC; ≥ 2,500 cc. CC4 = Campero o camioneta; GNV; T1 = Taxi; Gasolina. T2 = Taxi; GNV. GNV = Gas natural vehicular. DM = Vehículos sometidos a ensayos de emisiones "en caliente" y cuyos resultados fueron usados exclusivamente para analizar las implicaciones del uso del gas natural vehicular.

Tabla 3.4. Automotores de carga pesada utilizados como vehículos de prueba para la determinación de los factores de emisión en Bogotá.

Vehículo	Marca	Línea	Modelo	Cilindraje	Combustible	Tipo
1	Nissan	Urban	2001	2200	ACPM	Microbus
2	Chevrolet	LT-132	2001	7127	ACPM	Bus/buseta
3	Agrale	85 TCA plus	2005	4300	ACPM	Bus/buseta
4	Chevrolet	P-30-133	1984	3298	ACPM	Bus/buseta
5	Agrale	MA-8.5-TCA	2005	4300	ACPM	Bus/buseta
6	Chevrolet	NKR	2001	2771	ACPM	Microbus
7	Chevrolet	B60 218	1991	7600	ACPM	Bus/buseta
8	Mazda	T45	1994	3500	ACPM	Bus/buseta
9	International	AL-4700	1995	7600	ACPM	Bus/buseta
10	Chevrolet	NKR 55	1994	2771	ACPM	Microbus
11	Chevrolet	NPR 729	2008	4570	ACPM	Microbus
12	Chevrolet	P30-133	1982	5700*	ACPM	Bus/buseta
13	Chevrolet	LT-500	1994	7650	ACPM	Bus escolar o de turismo
14	Hyundai	Chorus	1996	5400	ACPM	Bus escolar o de turismo
15	Dodge		1971	6000	ACPM	Grua
16	Dodge	D-600	1970	7560	ACPM	Grua
17	International	Dina	1996	7600	ACPM	Camión
18	Freightliner	Business	2005	12800	ACPM	Camión
19	International	4700	1996	7600	ACPM	Camión
20	Chevrolet	NHR	2005	2771	ACPM	Camión
21	Mazda	T45	1997	3500	ACPM	Camión
22	Chevrolet	B-6	1990	7560	ACPM	Bus/buseta
23	Chevrolet	CHR 7.2 TURBO	2005	7200	ACPM	Bus escolar o de turismo
24	Chevrolet	NPR	1998	4570	ACPM	Bus escolar o de turismo
25	Ford	F 800	1956	6800	ACPM	Grua
26	Dodge	P-300-137	1980	4500	ACPM	Bus/buseta
27	Chevrolet	NPR	2003	4570	ACPM	Camión
28	Dodge	D-600	1974	7800	ACPM	Camión
29	Chevrolet	B60-218	1991	6000	ACPM	Bus/buseta
30	Chevrolet	Kodiak	1998	6600	ACPM	Camión
31	Ford	Cargo	2008	8270	ACPM	Camión
32	Kia	K-3500	1995	3455	ACPM	Camión
33	Scania	L 94 IA	2004	8970	ACPM	Bus articulado
34	Scania	L 94 IA	2006	8970	ACPM	Bus articulado
35	Scania		2008	9000	ACPM	Bus articulado
36	Volvo	B12M	2007	12130	ACPM	Bus articulado
37	Volvo	B10M	2001	9603	ACPM	Bus articulado
38	Volvo	B10M	2001	9603	ACPM	Bus articulado
39	Mercedes Benz	0400 UPA	2004	9973	ACPM	Bus articulado
40	Mercedes Benz	0400 UPA	2005	9973	ACPM	Bus articulado
41	Mercedes Benz	OH 2836 RR	2007	11967	ACPM	Bus articulado

B1 = Bus o buseta; ACPM; < 5,000 cc. B2 = Bus o buseta; ACPM; ≥ 5,000 cc. C1 = Camión; ACPM; año modelo < 1997; < 6,000 cc. C2 = Camión; ACPM; año modelo < 1997; ≥ 6,000 cc. C3 = Camión; ACPM; año modelo ≥ 1997. TM = Bus articulado de TM; ACPM. ET = Bus escolar o de turismo; ACPM. MB = Microbus; ACPM.

\*A pesar de que estos cilindrajes corresponden a los reportados en las tarjetas de propiedad de los vehículos, dichos valores generan ciertas dudas y es posible que el motor instalado en el vehículo al momento de hacer las pruebas de emisiones fuese de un tamaño diferente al aquí especificado (debido a proceso de repotenciones y reemplazo de motores).

En resumen, durante esta etapa del proyecto fue posible reclutar un total de 155 vehículos distribuidos de la siguiente forma: 80 vehículos de gasolina, 34 vehículos reconvertidos a gas natural, 32 vehículos de carga pesada y 9 buses articulados de TM. Haciendo uso de estos automotores, se llevaron a cabo 202 pruebas en ruta para determinar los factores de emisión de la flota de Bogotá (ver Sección 3.2.4).

El control de recepción y operación de estos vehículos de prueba se llevó a cabo haciendo uso de formatos de campo que fueron diseñados de forma específica para el desarrollo de este proyecto.

NOTA: Dadas las características de la industria automotriz colombiana, todos los “vehículos de gas natural” a los que se hace referencia en este estudio corresponden a motores que han sido sometidos a un proceso de reconversión tecnológica realizado localmente y que les permite operar como automotores duales o híbridos (gas natural – gasolina). Esto significa que ninguna de las pruebas realizadas en este proyecto tiene que ver con “vehículos dedicados a gas natural”, los cuales hacen referencia a automotores que han sido diseñados y concebidos por su fabricante original para operar con dicho combustible.

### 3.2.4. Campaña de campo

La parte central de esta etapa del proyecto estuvo compuesta por una campaña de campo en la que, durante el mes de mayo de 2007 y entre los meses de abril y mayo de 2008 se llevaron a cabo un total de 202 pruebas en ruta.

A partir de estos experimentos de medición directa de emisiones en el tubo de escape y haciendo uso de sofisticados métodos analíticos que operan en tiempo real, fue posible determinar los factores de emisión de especies contaminantes (expresados en términos de gramos de contaminante emitido por kilómetro recorrido) para las diferentes categorías vehiculares que conforman el parque automotor de Bogotá.

Durante las pruebas en ruta, el vehículo bajo estudio se encuentra en condiciones reales de operación en las calles de la ciudad mientras que diversos equipos instalados en su interior analizan el contenido y la composición del gas de escape producto de la combustión en el motor. Para el caso específico de este estudio, los vehículos operados con gasolina y GNV fueron objeto de pruebas de emisiones para CO, CO<sub>2</sub>, THC y NO<sub>x</sub>. Los vehículos operados con ACPM fueron objeto de pruebas de emisiones para PM.

Durante las pruebas en ruta se recolectó información en tiempo real referente a las concentraciones de las especies de interés en el gas de escape (ug/m<sup>3</sup>) así como acerca del flujo de dicho gas (m<sup>3</sup>/s). Adicionalmente, para lograr determinar el factor de emisión representativo para todo el ciclo de manejo, se documentó la posición, velocidad y distancia recorrida por el vehículo de prueba.

Para cada una de las categorías vehiculares consideradas en este estudio se estableció un solo factor de emisión para los contaminantes de interés. Dicho factor de emisión corresponde al valor medio de los factores de emisión encontrados para cada uno de los vehículos de prueba que fueron evaluados y que hacían parte de la categoría vehicular en referencia.

Tal y como se explica en detalle en la Sección 3.2.4.2 de este documento, 105 de las 202 pruebas de emisiones realizadas corresponden a experimentos en condiciones de “arranque en frío” mientras que las pruebas restantes corresponden a condiciones de “arranque en caliente”. Las tablas 3.5 y 3.6 ilustran la matriz experimental utilizada durante la campaña de campo referente a vehículos de carga liviana y carga pesada, respectivamente.

Tabla 3.5. Matriz experimental para vehículos de carga liviana.

Categoría	Inicio de mediciones con motor frío <sup>1</sup>		Inicio de mediciones con motor caliente <sup>2</sup>		
	Pruebas con gasolina	Pruebas con GNV <sup>3</sup>	Pruebas con gasolina <sup>4</sup>	Pruebas con GNV <sup>4</sup>	
VP1	9				
VP2	11		1	1	
VP3	9				
VP4	12				
CC1	6				
CC2	11				
CC3	9				
CC4		8	7	7	
T1	12				
T2		17	3	3	
Piloto	1				
<b>Total</b>	<b>80</b>	<b>25</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>127</b>

<sup>1</sup>El motor del vehículo se encontraba frío al inicio de la prueba como resultado de un proceso de acondicionamiento y reposo de una duración de al menos 12 horas. <sup>2</sup>El motor del vehículo se encontraba caliente al inicio de la prueba como resultado de un proceso de acondicionamiento de varios minutos en el que el motor se encontraba encendido. <sup>3</sup>Prueba en vehículo reconvertido a gas natural. <sup>4</sup>El mismo vehículo híbrido (gasolina – gas natural) fue sometido al mismo experimento en condiciones de arranque en caliente alternando el tipo de combustible utilizado. VP1 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; TWC; ≤ 1,400 cc. VP2 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; TWC; > 1,400 cc. VP3 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; No TWC; ≤ 1,400 cc. VP4 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; No TWC; > 1,400 cc. CC1 = Camper o camioneta; Gasolina; TWC. CC2 = Camper o camioneta; Gasolina; No TWC; < 2,500 cc. CC3 = Camper o camioneta; Gasolina; No TWC; ≥ 2,500 cc. CC4 = Camper o camioneta; GNV; T1 = Taxi; Gasolina. T2 = Taxi; GNV.

Tabla 3.6. Matriz experimental para vehículos de carga pesada.

Categoría	Pruebas con ACEM <sup>1</sup>	Pruebas con ACEM y filtro de partículas <sup>2</sup>	Pruebas con LS-ACPM <sup>3</sup>	Pruebas con ACEM y Aditivo <sup>4</sup>	
TM	9				
B1	6		1		
B2	9	1	2		
C1	3		3	2	
C2	5		5	2	
C3	7		5	2	
MB	4				
ET	5		4		
<b>total</b>	<b>48</b>	<b>1</b>	<b>20</b>	<b>6</b>	<b>75</b>

<sup>1</sup>Pruebas realizadas con ACPM tipo extra disponible en Bogotá (contenido de azufre de aproximadamente 1,000 ppm). <sup>2</sup>Experimentos realizados con vehículos equipados con un dispositivo de control de emisiones de fabricación local y que se encuentra en fase de desarrollo. <sup>3</sup>Experimentos realizados con ACPM importado y con bajo contenido de azufre proveído por Ecopetrol. <sup>4</sup>Experimentos realizados en vehículos cuyo combustible se encontraba mezclado con aditivos disponibles en el mercado local y cuyo mercadeo se basa en sus propiedades de reducción de emisiones de PM. B1 = Bus o buseta; ACPM; < 5,000 cc. B2 = Bus o buseta; ACPM; ≥ 5,000 cc. C1 = Camión; ACPM; año modelo < 1997; < 6,000 cc. C2 = Camión; ACPM; año modelo < 1997; ≥ 6,000 cc. C3 = Camión, ACPM; año modelo ≥ 1997. TM = Bus articulado de TM; ACPM. ET = Bus escolar o de turismo; ACPM. MB = Microbus; ACPM.

### 3.2.4.1. Instrumentación y métodos experimentales

El montaje experimental de las pruebas en ruta desarrolladas en este proyecto incluyó los siguientes componentes:

Sistema de captura de gases: Compuesto por un juego de mangueras siliconadas diseñadas para resistir altas temperaturas así como de diversos acoples del mismo material que se conectan directamente al tubo de escape del vehículo de prueba (ver Figura 3.6).

Sistema de dilución: Compuesto por dos dilutores en serie (Dekati DI-1000) que operan en condiciones de temperatura y presión controladas (ver Figura 3.7).

Sensor de flujo másico: Elemento de alta precisión (Sierra Instruments Smart Insertion Thermal Gas Mass Flow Meter) diseñado para operar en altas temperaturas y bajo condiciones de flujo variable (ver Figura 3.8).

Sistema de posicionamiento global: GPS de alta precisión que determina posición y velocidad en tiempo real con el fin de conocer el régimen de manejo (velocidad y aceleración) así como la distancia total recorrida.

Equipo de medición de concentraciones de material particulado: Dekati DMM-230. Este equipo, que permite la determinación en tiempo real de concentraciones de material particulado en el gas de escape (ver Figura 3.9), opera por medio de una bomba de vacío, un analizador de movilidad y un juego de impactadores de alta precisión. El analizador de movilidad carga las partículas para que éstas sean analizadas posteriormente por medio de un electrómetro. Las partículas se distribuyen en alguno de los seis impactadores inerciales de acuerdo a su diámetro aerodinámico. Cada impactador tiene asociado un electrómetro que mide la corriente total en cada uno de ellos. Esta corriente es proporcional al número de partículas atrapadas en el sistema.

Equipo de medición de concentraciones de gases: Semtech-G (Sensors Inc). Este instrumento, que permite la determinación en tiempo real de las concentraciones de gases (CO, CO<sub>2</sub>, THC, NO<sub>x</sub>) presentes en el escape (ver Figura 3.10), se encuentra provisto de un detector de ionización de llama calentada (FID), un analizador ultravioleta no dispersivo (NDUV) y un analizador infrarrojo no dispersivo (NDIR). Este equipo trabajó de forma conjunta con el flujómetro SEMTECH-EFM (ver Figura 3.11).

Sistema de adquisición de datos: De acuerdo a las necesidades específicas de la campaña de campo realizada en este estudio, miembros del equipo de trabajo diseñaron e implementaron un sistema de captura de datos con respaldo en tiempo real haciendo uso de la herramienta de programación LabView (ver figuras 3.12 y 3.13).

Adicionalmente, los vehículos fueron equipados con sensores de humedad y temperatura ambiente. Estos dos parámetros son utilizados para llevar a cabo algunas correcciones en los cálculos de los factores de emisión.

Las figuras 3.14 y 3.15 ilustran la forma en que se realizó el montaje de estos equipos en los vehículos de prueba. La Figura 3.16 muestra los distintivos que fueron utilizados durante todas las pruebas en ruta y que se encontraban provistos de los logos de la SDA y del CIIA.



Figura 3.6. Manguera siliconada y acople al tubo de escape.

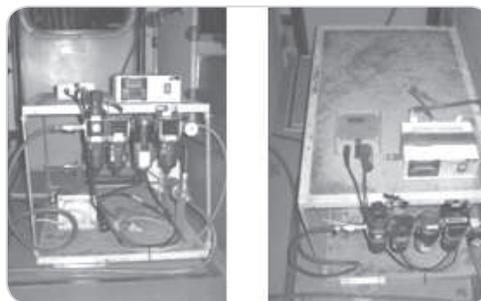


Figura 3.7. Sistema de dilución.



Figura 3.8. Tubo de muestreo y flujómetro.



Figura 3.9. Equipo de medición de material particulado y sistema de dilución.



Figura 3.10. Equipo de medición de especies gaseosas.



Figura 3.11. Flujómetro adaptado al equipo de medición de especies gaseosas.

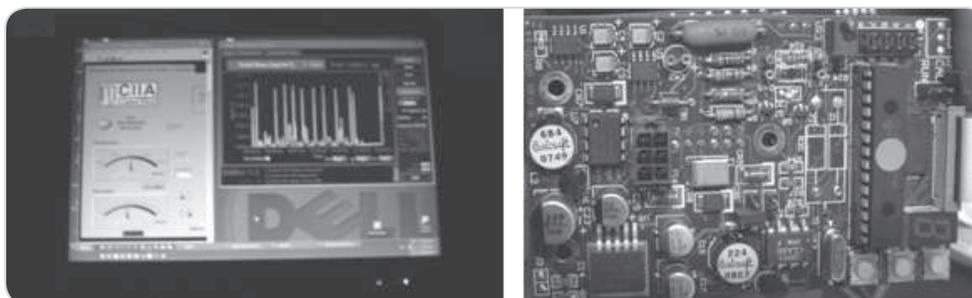


Figura 3.12. Tarjeta de captura e imagen del sistema de adquisición de datos.

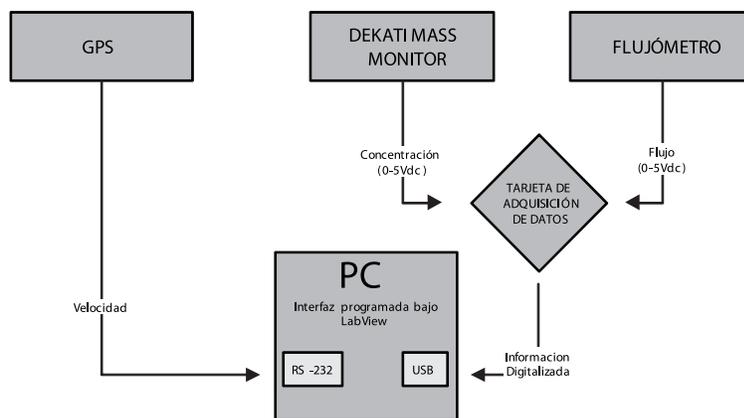


Figura 3.13. Diagrama del sistema de adquisición de datos utilizado.



Figura 3.14. Montaje del sistema de medición en un vehículo de carga pesada.

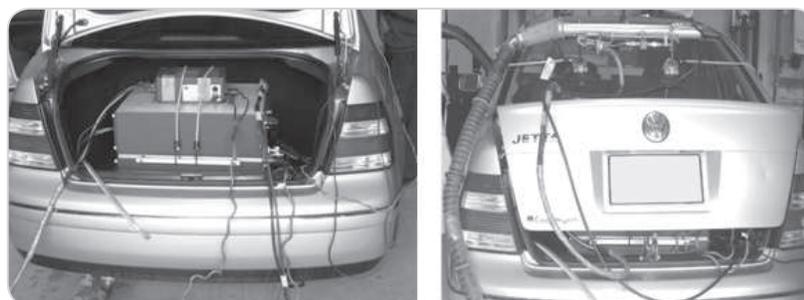


Figura 3.15. Montaje del sistema de medición en un vehículo de carga liviana.



Figura 3.16. Vehículos de prueba dotados de distintivos.

NOTA: Toda la información recopilada en el sistema de adquisición de datos fue compilada en una única base de datos en donde de forma previa a la actualización de la misma se llevó a cabo un procedimiento de control de calidad y validación de la información recolectada en campo. Dicha base de datos incluye cada una de las entradas en tiempo real, de tal forma que cuenta con más de 4.5 millones de registros.

### 3.2.4.2. Pruebas de emisiones en ruta

Tal y como ha sido mencionado previamente, los 202 experimentos desarrollados en la campaña de campo se llevaron a cabo siguiendo la metodología de medición en ruta propuesta por el Proyecto IVE, desarrollada por científicos de la Universidad de California y del Centro Internacional de Investigaciones para Sistemas Sostenibles (ISSRC) de los Estados Unidos.

Durante la realización de la primera fase de la campaña, en donde se documentaron las emisiones provenientes de vehículos de carga liviana operados con gasolina y GNV, se contó con el acompañamiento permanente (en campo y durante las mediciones) de funcionarios del ISSRC.

Los experimentos realizados durante la fase de campo se llevaron a cabo con diversos objetivos y diferentes condiciones en el momento de su ejecución. En particular, se realizaron dos tipos de pruebas de emisiones en función de la temperatura del motor al momento de dar inicio a las mismas: 1) Pruebas de arranque en frío para documentar las emisiones en un ciclo de manejo completo, incluyendo la porción del mismo en la que aun no se ha llegado a las condiciones óptimas de operación del motor y de los sistemas de control de emisiones; 2) Pruebas de arranque en caliente en donde se pretende que desde el principio las emisiones sean comparables entre los diferentes tipos de vehículos.

Para las 105 pruebas de arranque en frío realizadas durante la campaña de campo (ver Tabla 3.5), los vehículos fueron sometidos a un proceso de acondicionamiento en donde los motores debían reposar (sin ser operados) por períodos de al menos 12 horas antes de empezar el experimento. El punto de inicio de las pruebas correspondió al instante en que se daba arranque al motor del vehículo.

En el caso de las 97 pruebas de arranque en caliente (todos los vehículos con motores diésel fueron sometidos a este tipo de experimentos – ver Tabla 3.6), el acondicionamiento consistió en operar los vehículos por espacio de cinco minutos antes de dar inicio a la recolección de información de emisiones.

Por otra parte, para una sub-muestra de 11 de los 34 vehículos reconvertidos a gas natural que fueron objeto de este estudio, se llevaron a cabo, además de las pruebas de emisiones en frío, una serie de pruebas de emisiones en caliente (ver Tabla 3.5). En este último caso, se realizaron mediciones por duplicado haciendo uso del mismo vehículo y el mismo circuito pero alternando el combustible utilizado durante las pruebas. Esto significa que, aprovechando la característica dual e híbrida de estos vehículos, se llevó a cabo para cada uno de ellos una prueba usando gas natural y una prueba usando gasolina. Para estos casos no se realizó operación distinta que activar el dispositivo de selección de combustible del que se encuentran provistos todos estos automotores.

Para el caso de los vehículos de carga pesada, además de las 49 pruebas convencionales (de arranque en caliente), se realizaron una serie de experimentos adicionales con diversos objetivos (ver Tabla 3.6):

En primer lugar; gracias a las gestiones adelantadas por la SDA y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; se hizo posible la entrega por parte de Ecopetrol de un combustible diésel importado con bajo contenido de azufre. De esta forma, una sub-muestra de 19 vehículos participantes en esta etapa del proyecto fue objeto de experimentos por duplicado, en donde en uno de los casos se operó el vehículo con ACPM convencional mientras que en el segundo caso el mismo vehículo fue operado con el combustible importado (y correspondiente a calidad internacional). Para estas pruebas, el tanque de combustible fue desocupado y purgado antes de dar inicio a los experimentos de medición de emisiones.

Adicionalmente, se llevaron a cabo repeticiones de pruebas convencionales en donde el segundo de los experimentos se realizó después de instalar en el mismo vehículo un dispositivo de control de emisiones de fabricación local (PMGroup de Colombia) que se encuentra en fase de desarrollo y optimización de desempeño.

Similarmente, se realizaron seis repeticiones de pruebas tipo convencional en donde el segundo de los experimentos se llevó a cabo después de mezclar el combustible presente en el tanque del vehículo con aditivos que pretenden lograr una reducción en las emisiones de PM (aditivos marca XP3 y TPX).

### 3.3. Estimación del inventario de emisiones vehiculares

El cálculo de emisiones totales producidas ( $E$ ; Ton día<sup>-1</sup>) por el sector vehicular de la ciudad de Bogotá, se llevó a cabo haciendo uso del esquema lógico mostrado en la Figura 3.17 y aplicando la siguiente ecuación:

$$E = \sum Fe_{i,j} \cdot A_j \cdot Nf_j$$

En donde  $Fe_{i,j}$  (g km<sup>-1</sup>) corresponde al factor de emisión para el contaminante  $i$  (PM, CO, NO<sub>x</sub>, THC, CO<sub>2</sub>) para la categoría vehicular  $j$  (VP1, VP2, VP3, VP4, CC1, CC2, CC3, CC4, T1, T2, B1, B2, C1, C2, C3, TM, ET, MB);  $A_j$  es el nivel de actividad (km día<sup>-1</sup>) para la fuente correspondiente a la categoría vehicular  $j$ ;  $Nf_j$  es el número de fuentes que pertenecen a la categoría vehicular  $j$ .

Los factores de emisión para cada contaminante y para cada categoría vehicular se obtuvieron de acuerdo a la metodología presentada en las secciones anteriores, a partir de mediciones directas de emisiones en el tubo de escape de vehículos sometidos a pruebas en ruta. En este sentido se supone que los valores encontrados en dichas mediciones son representativos para todos los vehículos de Bogotá. Del mismo modo, esta metodología supone que las categorías vehiculares utilizadas son representativas de todo el parque automotor de la ciudad.

Tal y como fue discutido previamente, el tamaño de la flota (ver Sección 3.1.1) y el nivel de actividad vehicular (ver Sección 3.1.2) se obtuvieron a través de múltiples fuentes de información tales como gremios del sector automotor, el Proyecto IVE (Fase I), la Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá y TransMilenio S.A.

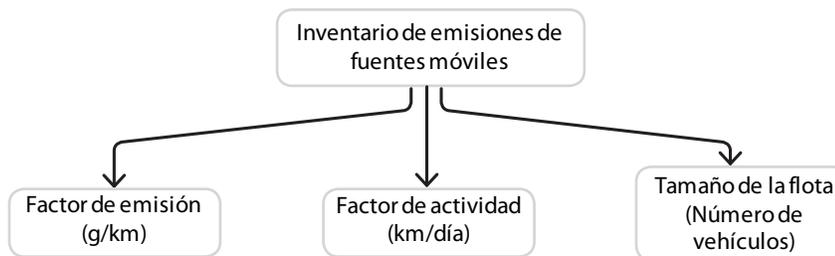


Figura 3.17. Metodología utilizada para la determinación del inventario de emisiones.

## 4. Resultados

En este capítulo se presentan los principales resultados de esta etapa del proyecto. En primer lugar se muestran los resultados asociados con el tamaño y los niveles de actividad de la flota vehicular de Bogotá y la forma en que se encuentra compuesta. A continuación se ilustran los resultados obtenidos para los factores de emisión para cada una de las categorías vehiculares consideradas. Finalmente, se presentan los resultados del inventario de emisiones de gases contaminantes y material particulado para la flota de la ciudad.

### 4.1. Características de la flota vehicular de Bogotá

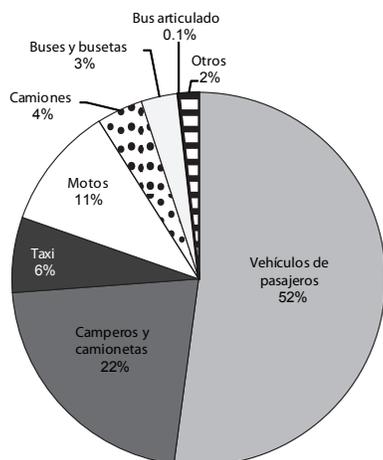
La Tabla 4.1 y la Figura 4.1 resumen la información más reciente y actualizada que se encuentra disponible en Bogotá respecto al tamaño y la composición de su parque automotor. La Figura 4.2 muestra la distribución de dicha flota respecto al tipo de combustible que utiliza.

Tabla 4.1. Flota vehicular que circula por Bogotá.

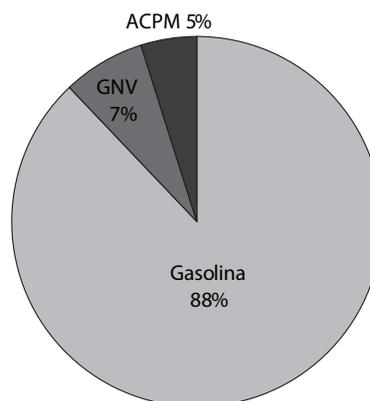
Combustible	Categoría Vehicular	Número de Vehículos	
Gasolina	Vehículos de pasajeros	619,546	
	Camperos y camionetas	224,952	
	Motos <sup>1</sup>	128,912	
	Taxis	50,957	
	Otros <sup>2</sup>	12,936	
	Camiones	12,491	
	Microbuses	6,742	
	Buses y busetas	4,624	<b>1,061,160</b>
GNV	Taxis	27,832	
	Camperos y camionetas	25,224	
	Camiones	10,438	
	Vehículos de pasajeros	9,567	
	Microbuses	7,829	
	Otros <sup>2</sup>	6,088	<b>86,978</b>
ACPM	Camiones <sup>3</sup>	25,000	
	Buses y busetas	12,775	
	Camperos y camionetas	11,874	
	Microbuses	5,785	
	Otros	1,664	
	Buses articulados de TM	1,070	
	Buses alimentadores de TM	414	
	Buses escolares y de turismo	368	<b>58,950</b>
		<b>1,207,088</b>	

<sup>1</sup>Incluye ciclo-motos y moto-triciclos. <sup>2</sup>Incluye tractores, maquinaria agrícola y maquinaria industrial.  
<sup>3</sup>Fuentes: DDT (2006) y SDM (2007).

NOTA: La tabla anterior fue construida haciendo uso de varias fuentes de información. Los datos referentes a motos y vehículos de carga liviana (incluyendo taxis) que operan con gasolina y ACPM así como aquellos relacionados con vehículos de transporte público colectivo y de servicio escolar y de turismo fueron obtenidos de la Secretaría Distrital de Movilidad (SDM, 2008). Las estadísticas de los vehículos de transporte de carga provienen del estudio de Centros de Información Logística de Carga de Bogotá (SDM, 2007). Los datos referentes a la flota de buses articulados fueron proveídos por TMSA. Los valores relacionados con vehículos operados con GNV fueron obtenidos de Gazel S.A.



**Figura 4.1.** Distribución porcentual de las categorías vehiculares de Bogotá. Vehículos de pasajeros incluye automotores de gasolina y GNV; Camperos y camionetas incluyen vehículos de gasolina, ACPM y GNV; Taxis incluye vehículos de gasolina y GNV; Camiones incluye vehículos alimentados con ACPM, gasolina y GNV; Buses y busetas incluye vehículos de gasolina y ACPM y hace referencia a la flota de transporte público colectivo (incluyendo buses, busetas y microbuses) así como a la flota de alimentadores del sistema Transmilenio; Otros incluye tractores y maquinaria agrícola e industrial; Motos incluye ciclo-motos y moto-triciclos.



**Figura 4.2.** Distribución de la flota vehicular que circula por Bogotá de acuerdo al tipo de combustible utilizado. (nota: estos valores no corresponden al consumo de combustible por parte de estos vehículos).

Estos resultados demuestran, tal y como ha sido documentado en estudios previos, que la flota de la ciudad se encuentra dominada por vehículos de uso privado proveídos de motores que se alimentan con gasolina. Dos de cada tres vehículos que circulan por la ciudad cumplen con estas condiciones. Es igualmente interesante notar que son más numerosos los vehículos que operan con GNV (correspondiendo al 7% del total de la flota) que aquellos que hacen lo propio con ACPM (5% de la flota).

Al interior de los automotores que operan con gasolina, la mayor parte de ellos (58%) corresponde a vehículos de pasajeros mientras que para el caso de los vehículos alimentados con ACPM el sector que domina esta categoría corresponde al transporte de carga (42%). Para esta misma categoría, los buses articulados y alimentadores que hacen parte del sistema de transporte masivo de la ciudad no alcanzan a representar el 3% de la flota.

Al interior de los vehículos de gas natural, las categorías que dominan este sector de la flota son los taxis y los camperos y camionetas. En este sentido es importante resaltar que, según estas cifras, uno de cada tres taxis que circulan por la ciudad ha sido sometido al proceso de reconversión a gas natural.

Estas cifras también demuestran la importancia que ha cobrado la flota de motocicletas. Hoy en día se cuenta con cerca de dos motocicletas por cada vehículo de transporte público individual (taxis). Más importante aun, estos resultados indican que por cada vehículo de transporte colectivo que circula por las calles de Bogotá, hay registradas cerca de cuatro motocicletas (ver Figura 4.1).

La Figura 4.3 muestra la distribución de la flota según el año (modelo) de fabricación de los vehículos mientras que la Figura 4.4 ilustra la distribución según el cilindraje de los mismos. Estos resultados demuestran que la flota de gasolina es, en promedio, más antigua que la flota que opera con ACPM, alcanzando una edad media de 14 años. Por su parte, como era de esperarse, el tamaño medio de los motores de los vehículos de ACPM es significativamente mayor que el tamaño medio de los motores de la flota de gasolina.

El histograma ilustrado en la Figura 4.3 muestra que las distribuciones por edades de los vehículos se encuentran dominadas por automotores de años recientes. Esto es una consecuencia del notable incremento en ventas de vehículos nuevos (tanto de gasolina como de ACPM) y una señal clara del proceso de renovación del parque automotor de la ciudad.

La Figura 4.5 muestra la distribución de la flota según el fabricante (o ensamblador) del vehículo. En este caso es claro que las marcas que llevan a cabo ensamblaje a nivel local dominan el parque de vehículos de la ciudad.

Finalmente, la Tabla 4.2 muestra el resumen de los factores de actividad que fueron determinados para las categorías vehiculares consideradas en este estudio, según el procedimiento descrito en la Sección 3.1.2.

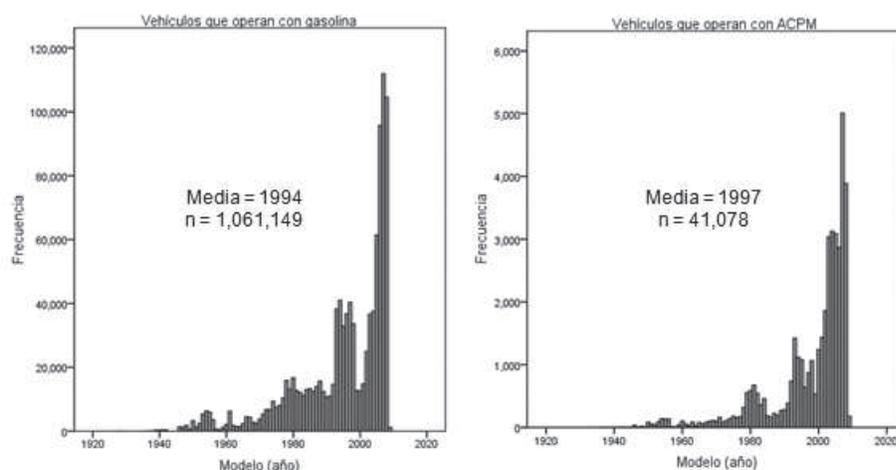


Figura 4.3. Distribución de la flota vehicular por año-modelo de fabricación (año base = 2008)

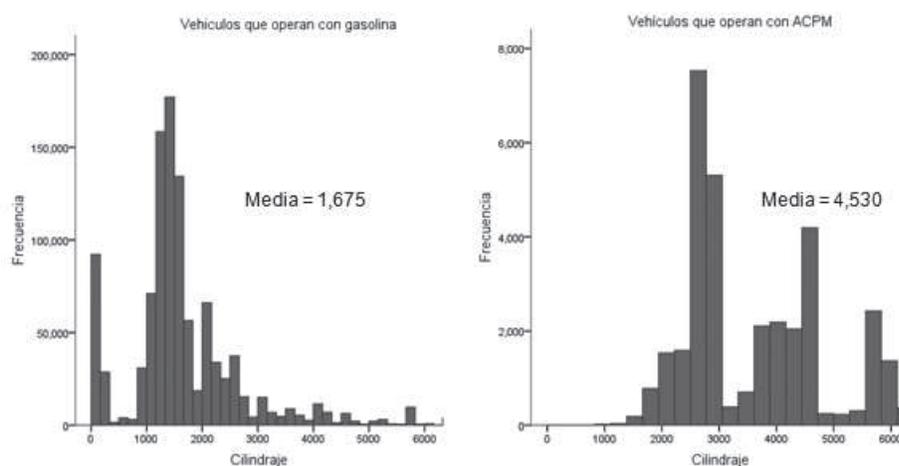


Figura 4.4. Distribución de la flota vehicular de Bogotá por tamaño del motor.

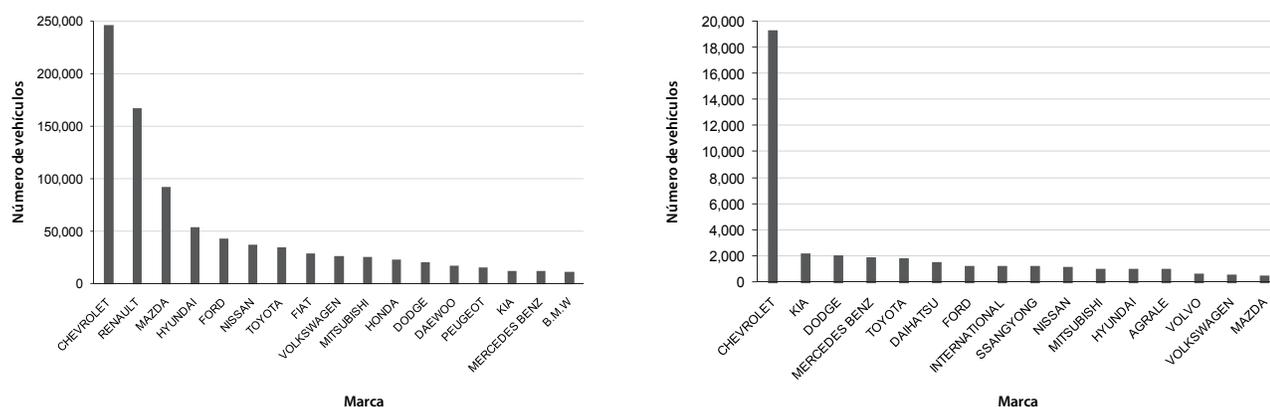


Figura 4.5. Distribución de la flota vehicular de Bogotá por fabricante (vehículos de gasolina en la parte izquierda y vehículos de ACPM en la parte derecha).

Tabla 4.2. Factores medios de actividad para la flota vehicular de Bogotá.

Categoría Vehicular	km año <sup>-1</sup>
Taxis	75,000
Buses, busetas y microbuses	65,000
Camiones	30,000
Flota articulada de TM	70,000
Servicio escolar y de turismo	63,000
Vehículos de pasajeros	9,500 – 18,000
Camionetas y camperos	12,000 – 22,000

## 4.2. Factores de emisión

La tablas 4.3 y 4.4 muestran el resumen de los resultados obtenidos para los factores de emisión encontrados en este estudio (la Figura 4.6 muestra la misma información de manera gráfica). La Tabla 4.5 presenta la comparación de estos valores con aquellos encontrados en estudios previos.

Tabla 4.3. Factores de emisión para los vehículos de carga liviana de Bogotá.

Categoría Vehicular	CO <sub>2</sub> (g km <sup>-1</sup> )	CO (g km <sup>-1</sup> )	NO <sub>x</sub> (g km <sup>-1</sup> )	THC (g km <sup>-1</sup> )
VP1	230 ± 40	7 ± 3	0.7 ± 0.2	0.9 ± 0.4
VP2	310 ± 20	9 ± 5	0.9 ± 0.5	0.9 ± 0.5
VP3	220 ± 50	60 ± 20	1 ± 0.5	7 ± 3
VP4	300 ± 40	70 ± 25	2 ± 1	9 ± 3.5
CC1	380 ± 80	10 ± 8	1 ± 0.5	0.7 ± 0.3
CC2	380 ± 40	75 ± 20	3 ± 1	10 ± 3
CC3	460 ± 130	85 ± 30	4 ± 3	7.5 ± 2
CC4	440 ± 120	40 ± 25	3 ± 1	4 ± 1.5
T1	260 ± 30	8 ± 3	2 ± 1	1 ± 0.5
T2	250 ± 40	13 ± 4	4 ± 1.5	5 ± 1.5

VP1 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; TWC; ≤ 1,400 cc. VP2 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; TWC; > 1,400 cc. VP3 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; No TWC; ≤ 1,400 cc. VP4 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; No TWC; > 1,400 cc. CC1 = Campero o camioneta; Gasolina; TWC. CC2 = Campero o camioneta; Gasolina; No TWC; < 2,500 cc. CC3 = Campero o camioneta; Gasolina; No TWC; ≥ 2,500 cc. CC4 = Campero o camioneta, GNV; T1 = Taxi; Gasolina. T2 = Taxi; GNV.

Tabla 4.4. Factores de emisión para los vehículos de carga pesada de Bogotá.

Categoría Vehicular	PM <sub>2.5</sub> (g km <sup>-1</sup> )
B1	0.3 ± 0.2
B2	1.2 ± 1
C1	0.9 ± 0.5
C2	0.8 ± 0.5
C3	0.3 ± 0.2
MB	0.03 ± 0.02
ET	0.6 ± 0.4
TM	0.3

B1 = Bus o buseta; ACPM; < 5,000 cc. B2 = Bus o buseta; ACPM; ≥ 5,000 cc. C1 = Camión; ACPM; año modelo < 1997; < 6,000 cc. C2 = Camión; ACPM; año modelo < 1997; ≥ 6,000 cc. C3 = Camión; ACPM; año modelo ≥ 1997. TM = Bus articulado de TM; ACPM. ET = Bus escolar o de turismo; ACPM. MB = Microbus; ACPM.

Tabla 4.5. Comparación con factores de emisión reportados en estudios previos (g km<sup>-1</sup>).

	EPFL - Uniandes (2003)	Uniandes - START (2005) <sup>a</sup>	Uniandes - IVE (2005)	Este estudio <sup>b</sup>
CO <sub>2</sub>		180 - 350		300 <sup>c</sup> ± 25
CO	15.47 ± 2.84	3 - 35	0.5 - 35	35 <sup>c</sup> ± 7.5
NO <sub>x</sub>	0.41 ± 0.09	0.2 - 1.5	0.7 - 3.5	2.5 <sup>c</sup> ± 0.5
THC		0.1 - 4	0.1 - 5.2	5 <sup>c</sup> ± 1
PM	0.35 <sup>e</sup> ± 0.08			0.3 <sup>d</sup> ± 0.1

<sup>a</sup> Resultados para vehículos de carga liviana y operados con gasolina. <sup>b</sup> Factores de emisión determinados por medio de mediciones directas en pruebas dinámicas. <sup>c</sup> Resultados para flota liviana que opera con gasolina y gas natural. <sup>d</sup> Resultados para vehículos de carga pesada que operan con ACPM. <sup>e</sup> Resultados para PM<sub>10</sub>.

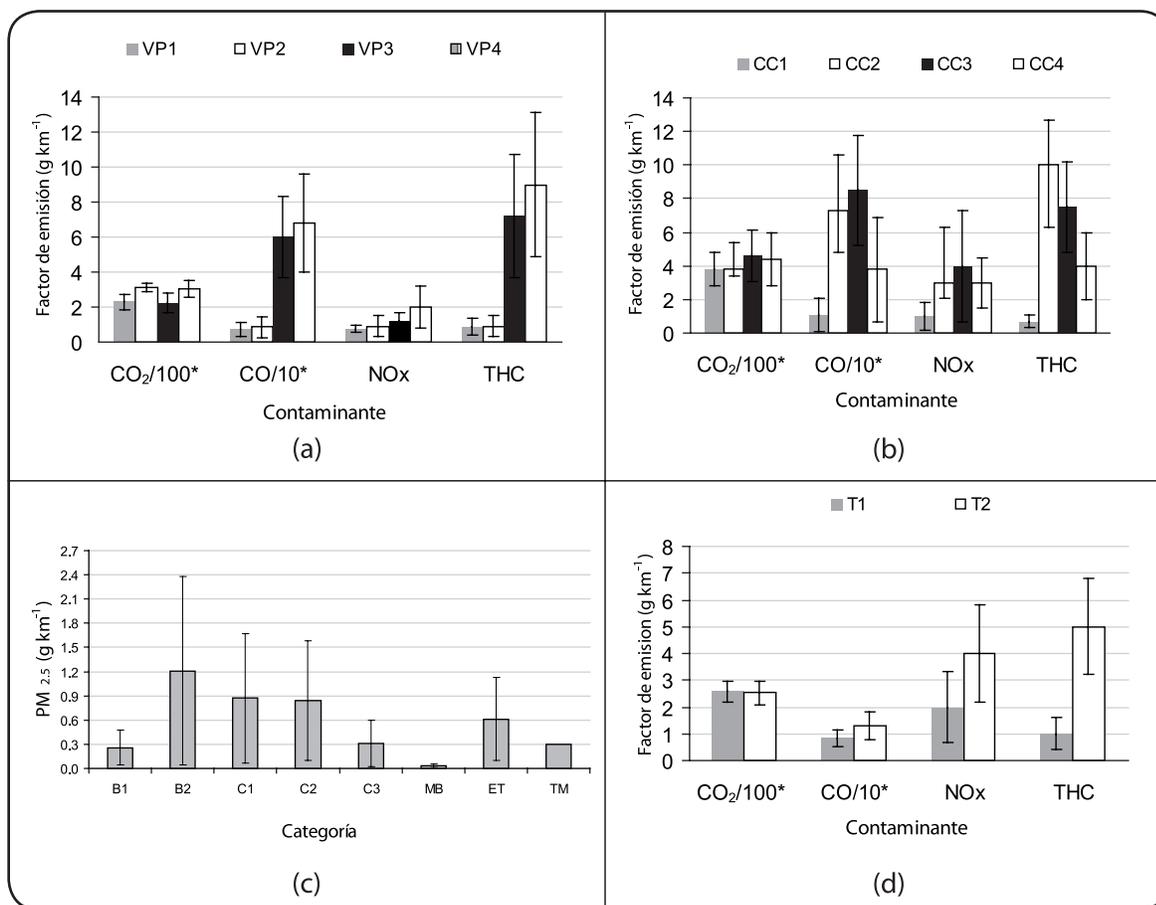
Para el caso del CO<sub>2</sub>, la categoría vehicular con el más alto factor de emisión (superando los 400 g km<sup>-1</sup>) es la que corresponde a los camperos y camionetas con motores de gran tamaño (e.d., mayores consumos de combustible) y alimentados con gasolina (ver Figura 4.6). Esta misma categoría es la que presenta las mayores emisiones de CO dadas las condiciones de tamaño del motor, tipo de combustible y consumo de combustible; en conjunto con la ausencia de sistemas de control de emisiones (e.d., convertidor catalítico).

Respecto a NO<sub>x</sub>, la categoría anteriormente mencionada vuelve a ser importante pero en este caso se disputa el factor de emisión más alto con los taxis que han sido reconvertidos a gas natural (ver Figura 4.6d).

Para el caso de THC las categorías que exhiben los más elevados factores de emisión corresponden a vehículos de pasajeros que no cuentan con convertidor catalítico así como a los camperos y camionetas de motores pequeños que no se encuentran provistos de este tipo de tecnología de control de emisiones (ver Figura 4.6). Estos resultados se pueden explicar por el denominado efecto de la "zona de enfriamiento de llama" en donde los motores de mayor tamaño tienden a producir una menor cantidad de THC por unidad de combustible quemado.

Al comparar los resultados obtenidos para vehículos provistos con convertidores catalíticos con aquellos relacionados con vehículos que no cuentan con estos dispositivos se puede apreciar el gran impacto asociado con el uso de la tecnología de control de emisiones. En particular, para el caso de CO y THC (figuras 4.6a y 4.6b), los vehículos equipados con convertidores catalíticos exhibieron factores de emisión significativamente inferiores.

Respecto al material particulado, los factores de emisión obtenidos demuestran la importancia de variables tales como el tamaño del motor y la edad del vehículo. Esto se puede apreciar en los resultados mostrados en la Figura 4.6c en donde el factor de emisión de los buses con motores de gran tamaño es significativamente superior al documentado para buses con motores de menor tamaño. Algo similar fue observado para CO en los vehículos de gasolina y después de controlar por el efecto asociado con la presencia de sistemas de control de emisiones (ver Figura 4.6a).



**Figura 4.6.** Comparación de los factores de emisión encontrados para la flota vehicular de Bogotá.

Para facilitar la comparación y estar en capacidad de utilizar la misma escala, los valores correspondientes a CO<sub>2</sub> y CO se encuentran divididos por 100 y por 10, respectivamente. VP1 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; TWC; ≤ 1,400 cc. VP2 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; TWC; > 1,400 cc. VP3 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; No TWC; ≤ 1,400 cc. VP4 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; No TWC; > 1,400 cc. CC1 = Camper o camioneta; Gasolina; TWC. CC2 = Camper o camioneta; Gasolina; No TWC; < 2,500 cc. CC3 = Camper o camioneta; Gasolina; No TWC; ≥ 2,500 cc. CC4 = Camper o camioneta; GNV; T1 = Taxi; Gasolina. T2 = Taxi; GNV. B1 = Bus o buseta; ACPM; < 5,000 cc. B2 = Bus o buseta; ACPM; ≥ 5,000 cc. C1 = Camión; ACPM; año modelo < 1997; < 6,000 cc. C2 = Camión; ACPM; año modelo < 1997; ≥ 6,000 cc. C3 = Camión; ACPM; año modelo ≥ 1997. TM = Bus articulado de TM; ACPM. ET = Bus escolar o de turismo; ACPM. MB = Microbus; ACPM.

Similarmenete, al comparar los resultados para las diferentes categorías de camiones, es posible identificar cómo los vehículos de modelos recientes cuentan con factores de emisión inferiores que aquellos relacionados con camiones con mayores tiempos de uso (ver Figura 4.6c). En este punto es necesario aclarar que la variable año-modelo es en realidad un indicador del tipo de tecnología utilizada así como del estado general de funcionamiento de los elementos del motor y el sistema de alimentación de combustible.

Es de resaltar los factores de emisión obtenidos para la flota articulada de TransMilenio, en donde a pesar del gran tamaño de los motores de dichos vehículos, las emisiones individuales fueron comparables con aquellas de buses con motores mucho más pequeños (ver Figura 4.6c). En algunos casos, dichos tamaños llegaron a representar menos de la mitad del cilindraje de los buses de TM (ver Tabla 3.4).

A pesar de que la metodología empleada en este estudio no incluyó una evaluación detallada del estado de mantenimiento de los vehículos de prueba, las diferencias antes mencionadas pueden estar relacionadas con las tecnologías utilizadas por la flota de TM así como con las exigentes bitácoras de mantenimiento que caracterizan a este sector del parque automotor de la ciudad.

Los resultados antes descritos permiten llegar a conclusiones contundentes respecto a las estrategias que se deben seguir para lograr una reducción en las emisiones generadas por la flota vehicular. En particular, a partir de lo documentado en la campaña de campo, se puede afirmar que se deben llevar a cabo todos los esfuerzos que sean del caso para lograr una renovación del parque de vehículos de la ciudad así como para desincentivar el uso de vehículos de gran tamaño al interior de la flota de servicio privado.

Adicionalmente, se debe continuar y expandir la política de exigencia de sistemas de control de emisiones, los cuales no sólo deben estar relacionados con la flota de gasolina sino también con la flota que utiliza ACPM.

Finalmente, las emisiones encontradas para vehículos reconvertidos a gas natural demostraron ser elevadas para CO, NO<sub>x</sub> y THC. Estas emisiones superan en algunos casos a aquellas relacionadas con vehículos similares que no han sido sometidos al proceso de reconversión tecnológica (ver Figura 4.6d). Un análisis más detallado de estos efectos se presenta en la Sección 4.5.

### 4.3. Inventario de emisiones

Las tablas 4.6 y 4.7 muestran el resultado del inventario de emisiones para las fuentes vehiculares de Bogotá. Las figuras 4.7 y 4.8 muestran estos mismos resultados gráficamente. Las tablas 4.8 y 4.9 resumen los valores encontrados y otros estudios previos desarrollados para Bogotá y otras ciudades del mundo.

Estos resultados representan un gran avance para la ciudad pues no sólo provienen de un ejercicio de gran complejidad y con muy pocos antecedentes previos sino también por el grado de confiabilidad de los mismos. Adicionalmente, estas cifras permiten la identificación de los principales sectores responsables de las emisiones y por lo mismo son una herramienta de diseño de políticas de control de contaminación del aire.

Por ejemplo, según lo presentado en la Figura 4.7, los vehículos de transporte público individual generan contribuciones significativas al inventario de emisiones de todos los contaminantes evaluados, a pesar de representar un sector minoritario la flota (ver Figura 4.1). Esto se explica por el elevado factor de actividad (ver Tabla 4.2) y el consecuente consumo de combustible que caracteriza a esta categoría vehicular.

Al mismo tiempo, es claro que al interior de los vehículos de carga liviana las emisiones de CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> y THC se encuentran dominadas por los vehículos de servicio privado, los cuales se encuentran asociados con contribuciones entre el 60 y el 90% de las emisiones de dichas especies contaminantes (ver Figura 4.7).

Para el caso del material particulado fino, el servicio público colectivo es el sector de la flota que domina el inventario de emisiones, generando un aporte superior al 50% al interior de la flota de carga pesada de la ciudad. Un aporte similar se encuentra asociado con el transporte de carga al interior del perímetro urbano.

De forma consistente con los resultados de estudios previos desarrollados por el CIIA, el aporte al inventario de emisiones de material particulado por parte de la flota de buses articulados que circulan por las vías troncales de TM es inferior al 3%. Esta baja contribución se encuentra asociada no sólo con los menores factores de emisión que fueron documentados en este estudio sino también con la naturaleza eficiente del sistema en referencia, en donde se cuenta con la capacidad de movilizar un gran número de pasajeros con una flota compuesta por poco más de 1,000 vehículos.

**Tabla 4.6.** Emisiones de los vehículos de carga liviana de Bogotá (Ton año<sup>-1</sup>).

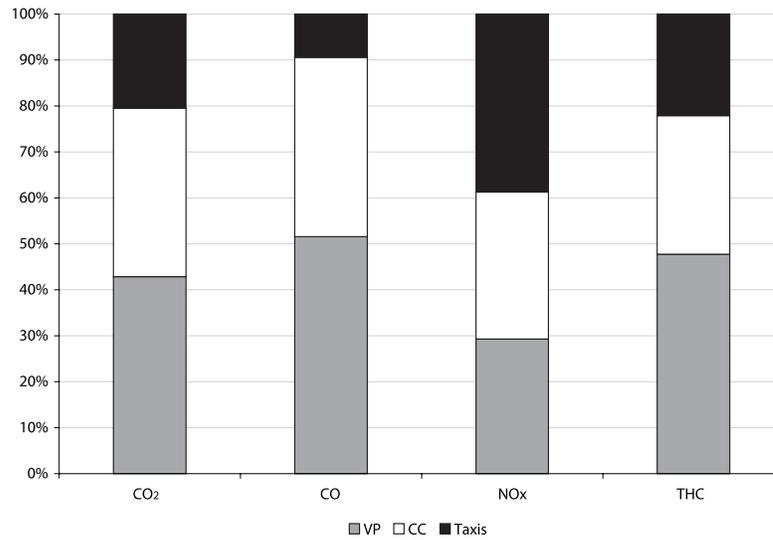
Categoría	CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	THC
VP1	550,000 ± 100,000	17,000 ± 9,000	1,700 ± 500	2,000 ± 1,000
VP2	680,000 ± 50,000	18,000 ± 13,000	2,000 ± 1,300	2,000 ± 1,300
VP3	360,000 ± 90,000	100,000 ± 40,000	2,000 ± 800	12,000 ± 5,500
VP4	420,000 ± 70,000	95,000 ± 40,000	3,000 ± 1,700	12,500 ± 5,700
CC1	800,000 ± 200,000	22,000 ± 20,000	2,000 ± 1,700	1,500 ± 800
CC2	300,000 ± 40,000	60,000 ± 20,000	2,500 ± 700	8,000 ± 3,000
CC3	370,000 ± 125,000	70,000 ± 25,000	3,200 ± 2,500	6,000 ± 2,000
CC4	250,000 ± 90,000	22,000 ± 18,000	1,800 ± 900	2,500 ± 1,100
T1	360,000 ± 55,000	12,000 ± 4,000	2,500 ± 1,800	1,200 ± 800
T2	600,000 ± 100,000	30,000 ± 12,000	9,000 ± 4,000	12,000 ± 4,000

VP1 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; TWC; ≤ 1,400 cc. VP2 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; TWC; > 1,400 cc. VP3 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; No TWC; ≤ 1,400 cc. VP4 = Vehículo de pasajeros; Gasolina; No TWC; > 1,400 cc. CC1 = Campero o camioneta; Gasolina; TWC. CC2 = Campero o camioneta; Gasolina; No TWC; < 2,500 cc. CC3 = Campero o camioneta; Gasolina; No TWC; ≥ 2,500 cc. CC4 = Campero o camioneta, GNV; T1 = Taxi; Gasolina. T2 = Taxi; GNV.

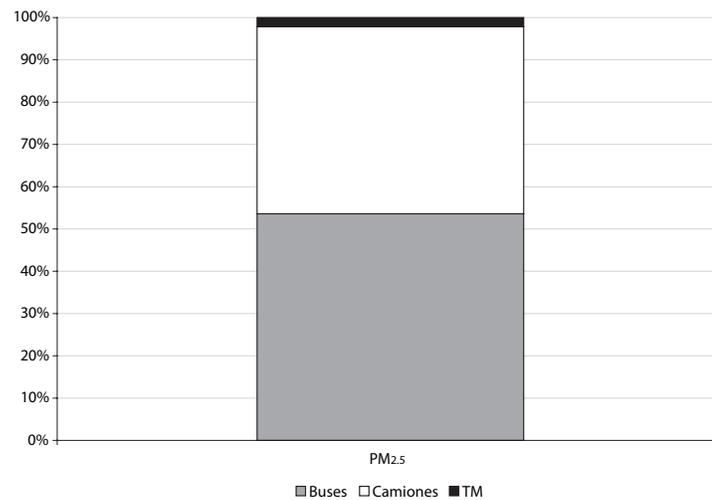
**Tabla 4.7.** Emisiones de los vehículos de carga pesada de Bogotá (Ton año<sup>-1</sup>).

Categoría	PM <sub>2.5</sub>
B1	135 ± 100
B2	400 ± 390
C1	135 ± 120
C2	170 ± 140
C3	130 ± 120
MB	10 ± 7
ET	15 ± 12
TM	22

B1 = Diésel, Bus o buseta, < 5000 cc; B2 = Diésel, Bus o buseta, ≥ 5000 cc; C1 = Diésel, Camión, < 1997, < 6000cc; C2 = Diésel, Camión, < 1997, ≥ 6000cc; C3 = Diésel, Camión, ≥ 1997; MB = Diésel, Microbus; ET = Diésel, Bus escolar o de turismo; TM = Diésel, Bus articulado.



**Figura 4.7.** Contribución de las categorías vehiculares al inventario de emisiones provenientes de vehículos de carga liviana de Bogotá.  
VP = Vehículos de pasajeros; CC = Camperos y camionetas.



**Figura 4.8.** Contribución de las categorías vehiculares al inventario de emisiones provenientes de vehículos de carga pesada de Bogotá.  
Nota: Buses incluye buses, busetas, microbuses y alimentadores del sistema TransMilenio; TM corresponde a la flota de vehículos articulados del sistema de transporte masivo de la ciudad.

**Tabla 4.8.** Emisiones totales generadas por el sector vehicular de Bogotá (Ton año<sup>-1</sup>).

CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	THC	PM <sub>2,5</sub>
4,800,000 ± 300,000	450,000 ± 70,000	30,000 ± 6,000	60,000 ± 10,000	1,100 ± 450

NOTA: Los valores de emisiones para CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> y THC corresponden a la contribución exclusiva de la flota de vehículos de carga liviana. Del mismo modo, las emisiones de PM<sub>2,5</sub> hacen referencia a las emisiones producidas exclusivamente por los vehículos de carga pesada de la ciudad.

Tabla 4.9. Comparación con estudios previos (Ton año<sup>-1</sup>).

	CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	HC	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
Ciudad de México <sup>1</sup>		753,848	100,229	87,023		
Santiago de Chile <sup>2</sup>		185,877	38,973		1,339	1,750
Río de Janeiro <sup>3</sup>		314,700	60,200	53,400		7,800
Valle de Aburrá <sup>4</sup>		104,118	14,779			
Cali (Yumbo) <sup>5</sup>		318,053	18,966			1,052
Bogotá (2003) <sup>6</sup>	1,873,545	306,162	13,651			1,643
Bogotá (2005) <sup>7</sup>	3,000,000	230,000	12,000	25,000		
Bogotá (2005) <sup>8</sup>	5,100,000	900,000	55,000			2,200
Este estudio	4,800,000	450,000	30,000	60,000	1,100	-

1. Inventario de emisiones para el área metropolitana de la Ciudad de México (2005). 2. Comisión nacional del medio ambiente del Estado de Chile (CONAMA, 2005). 3. Fundación estatal de ingeniería del medio ambiente de Brasil (FEEMA, 2004). 4. Universidad de Antioquia (2004). 5. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos convencionales para la zona de Cali-Yumbo (Universidad de Antioquia, 2004). 6. Diseño e implementación de un modelo de calidad de aire para Bogotá (EPFL - Universidad de Los Andes, 2003). 7. Estimación de contaminantes y emisiones de gases efecto invernadero de fuentes móviles (START - Universidad de Los Andes, 2005). 8. Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá (Proyecto IVE - Universidad de los Andes, 2005).

#### 4.4. Información en tiempo real

Una de las principales fortalezas de la metodología utilizada durante la fase de campo de este estudio tuvo que ver con la posibilidad de capturar la información de emisiones de contaminantes (así como de otras variables relevantes) en tiempo real. De esta forma, se cuenta con las herramientas para entender los ciclos de manejo típicos para la ciudad de Bogotá (ver Giraldo, 2005) así como para establecer correlaciones entre variables tales como el nivel de generación de un contaminante en particular y el régimen de operación del vehículo que lo produce (velocidad y aceleración).

En la Figura 4.9 se ilustra un ejemplo de uno de los ciclos de manejo documentados durante este estudio para un vehículo de carga liviana. En esta representación se puede observar la manera típica en que se conduce en la ciudad, en términos de las velocidades máximas alcanzadas y las aceleraciones para llegar a éstas así como en términos del número de detenciones y la duración de las mismas.

La Figura 4.10 muestra la relación entre el ciclo de manejo observado para un vehículo de carga pesada y las emisiones instantáneas de material particulado que se generan como resultado de dicho ciclo. En esta representación se puede notar la cercana correlación entre el nivel de emisiones y la carga a la que se encuentra sometida el motor del vehículo. A mayor aceleración, mayores son las emisiones de material particulado.

La Figura 4.11 muestra los resultados de emisiones de THC en tiempo real para un vehículo de año modelo reciente y equipado con TWC así como para un vehículo de alto kilometraje no provisto de este tipo de dispositivos. Estos resultados demuestran nuevamente el impacto que la tecnología del vehículo tiene sobre sus emisiones.

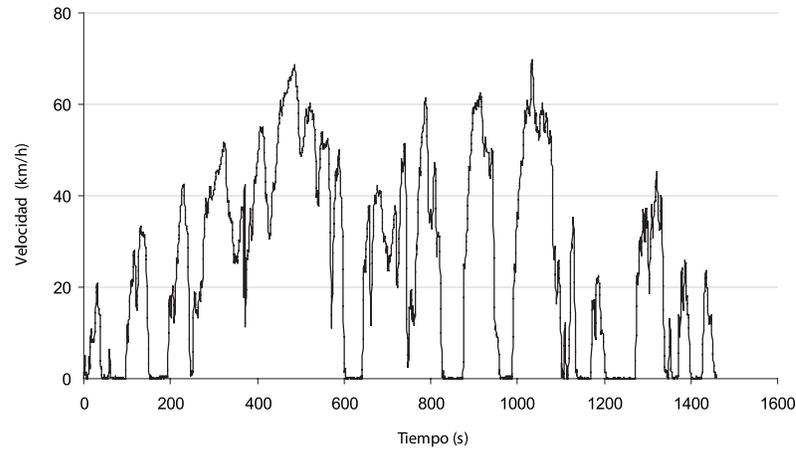


Figura 4.9. Ciclo de manejo típico para un vehículo de carga liviana en Bogotá.

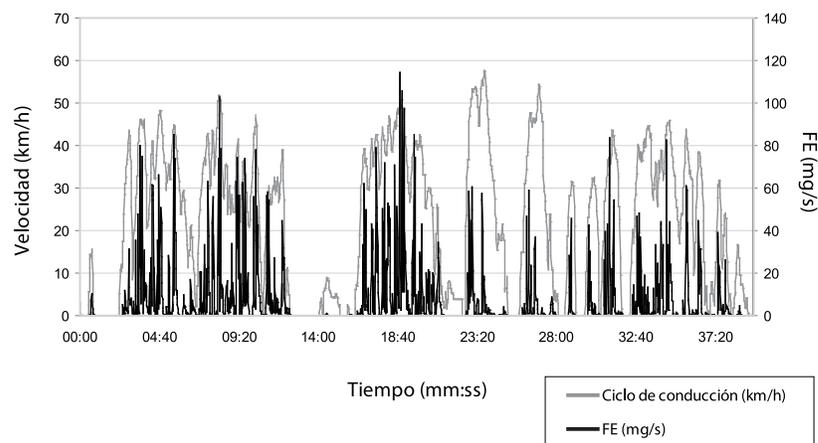


Figura 4.10. Comparación de las emisiones de material particulado y el ciclo de manejo al que se encuentra sometido un vehículo de carga pesada.

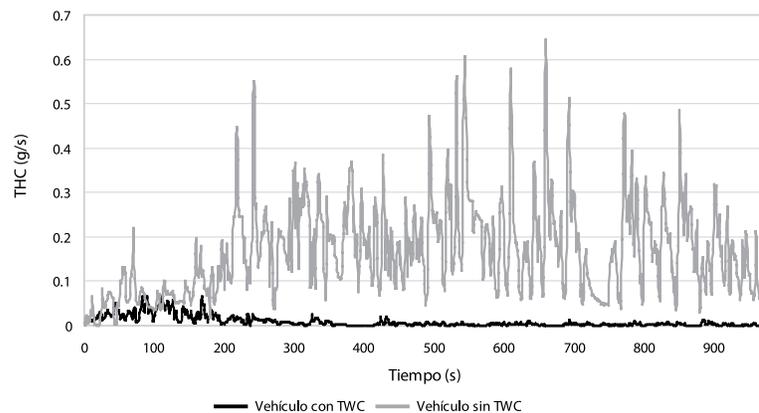


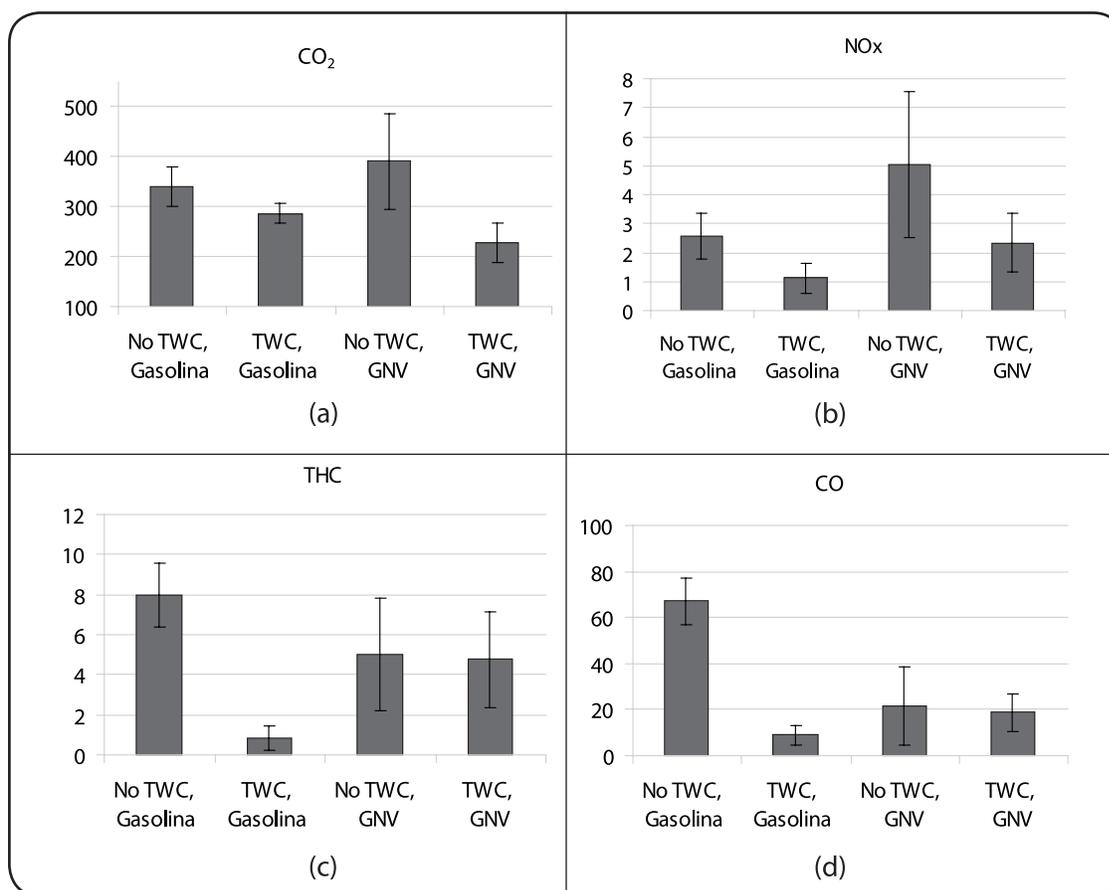
Figura 4.11. Comparación de las emisiones (expresadas en gramos por segundo) de THC en dos vehículos que cuentan con diferentes tecnologías.  
TWC = Convertidor catalítico de tres vías.

## 4.5. Impacto de la reconversión tecnológica a gas natural

Tal y como fue mencionado en secciones anteriores, durante el desarrollo de este proyecto se logró detectar que los beneficios ambientales que han sido asociados con la reconversión tecnológica de vehículos de gasolina a vehículos duales (gasolina – GNV) son limitados y sólo se presentan en ciertas condiciones particulares. Del mismo modo, dicha reconversión puede acarrear efectos negativos en lo que se refiere a las emisiones de NO<sub>x</sub>, CO y THC.

La Figura 4.12 muestra los factores de emisión para las especies de interés obtenidos mediante las pruebas en ruta con arranque en frío (ver Sección 3.2.4.2). Estos resultados demuestran claramente lo anteriormente enunciado. Para el caso de THC (Figura 4.12c) y CO (Figura 4.12d), los factores de emisión para vehículos equipados con TWC son mayores cuando tales automotores operan con GNV. Para el caso de NO<sub>x</sub> (ver Figura 4.12b), sin importar si los vehículos cuentan con o no con TWC, los factores de emisión son mayores cuando se opera con GNV.

Para el caso de THC y CO se observa un comportamiento contrario al anteriormente descrito cuando se trata de vehículos más antiguos que no cuentan con TWC<sup>7</sup> y que operan con tecnologías menos sofisticadas y exigentes en lo que se refiere al tipo y calidad de combustible utilizado. En estos casos, los vehículos operados con GNV exhiben factores de emisión que son menores que aquellos relacionados con los vehículos de gasolina (ver Figura 4.12).



**Figura 4.12.** Comparación de los factores de emisión para vehículos de gasolina y para vehículos reconvertidos a gas natural (prueba con arranque en frío).

TWC = Vehículos provistos de convertidor catalítico; GNV = Gas natural vehicular.

<sup>7</sup> Dadas las exigencias impuestas por la Resolución 005 de 1996 del Ministerio de Ambiente (así como por los actos normativos que la derogaron de forma posterior), en términos de los niveles máximos permitidos para las concentraciones de especies contaminantes en los gases de escape de los vehículos, a partir del año 1997 todos los vehículos nuevos en Colombia (importados o ensamblados localmente) se encuentran provistos de sistemas de control de emisiones. De esta forma, la presencia de este tipo de dispositivos se convierte en un indicador de la edad del vehículo y viceversa.

Estos resultados fueron confirmados por medio de una serie de pruebas adicionales en las que una selección de vehículos reconvertidos a gas natural fueron sometidos a una comparación uno a uno, realizando los ensayos de emisiones operando el mismo vehículo con gas y luego con gasolina (ver Sección 3.2.4.2.).

La Figura 4.13 muestra algunos de los resultados obtenidos haciendo uso de dicho procedimiento. Con unas pocas excepciones al interior de los casos evaluados, las emisiones de NO<sub>x</sub> y THC (ver también Figura 4.14) fueron mayores cuando se operó el vehículo con GNV que cuando se operó el vehículo con gasolina.

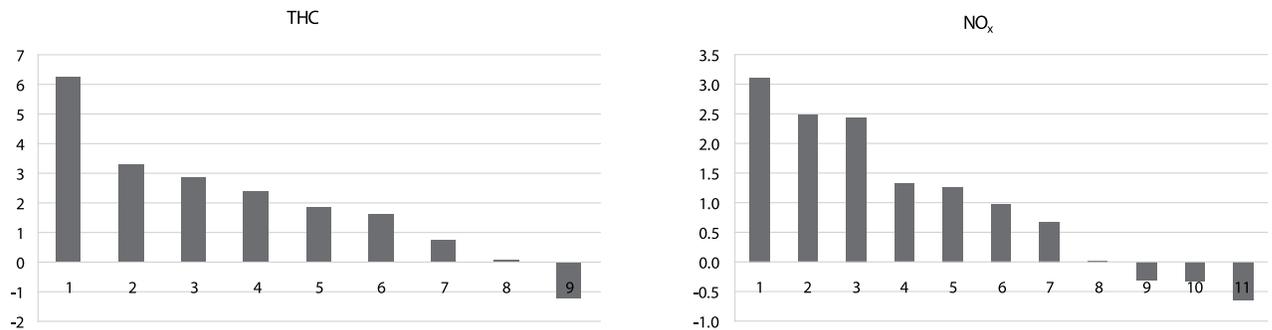


Figura 4.13. Incremento en los factores de emisión ( $\text{g km}^{-1}$ ) para vehículos duales al ser operados con GNV en lugar de gasolina (cada barra corresponde a un vehículo distinto).

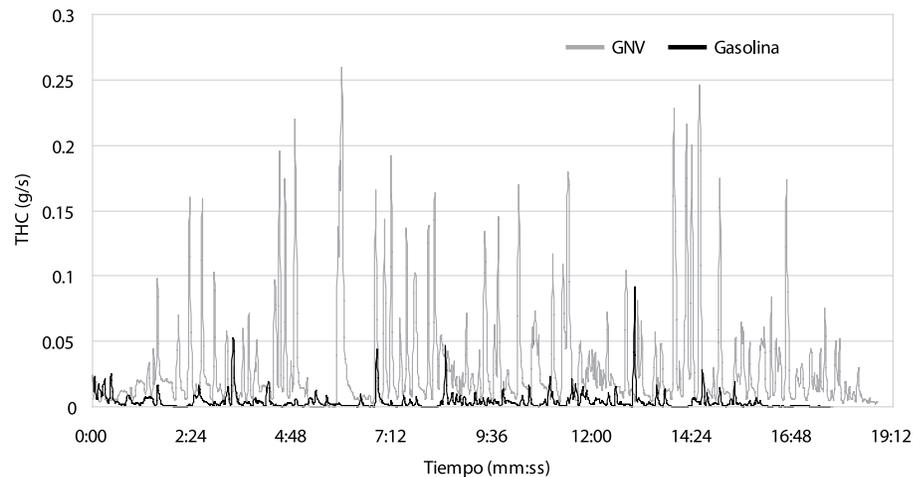


Figura 4.14. Emisiones en tiempo real producidas por un vehículo dual operando con GNV y gasolina (camioneta de 4,000 cc; TWC; Año-modelo: 1998).

El principal significado de los resultados antes descritos es que la reconversión tecnológica a gas natural es positiva para algunas de las especies contaminantes que se encuentran reguladas en Colombia. Sin embargo, este tan sólo es el caso para vehículos relativamente antiguos que correspondan a tecnologías sencillas en lo que se refiere a su proceso de combustión y alimentación de combustible. Para el caso de vehículos de modelos recientes con tecnologías más sofisticadas y provistos de dispositivos de control de emisiones, la reconversión a gas natural tiene repercusiones negativas y causa un incremento en los niveles de emisiones de gases contaminantes generados por el vehículo.

Estos resultados son de la mayor relevancia para Bogotá y otros centros urbanos del país pues gracias a los incentivos y beneficios económicos asociados con el GNV, el uso de vehículos reconvertidos es cada vez más frecuente. Por ejemplo, hoy en día son más numerosos los vehículos que operan con GNV que aquellos que los hacen con ACPM y uno de cada tres taxis que circulan por Bogotá han sido sometidos al proceso de reconversión que les permite ser alimentados con este combustible.

Esta situación se explica por la forma como el gas natural vehicular es utilizado en Colombia, en donde la inmensa mayoría de los vehículos que se alimentan de este combustible corresponden en realidad a máquinas que fueron concebidas y diseñadas para operar con gasolina y que han sido objeto de transformaciones realizadas localmente, mediante procedimientos que no necesariamente se ajustan a las especificaciones del fabricante.

En este sentido, tal y como fue mencionado anteriormente, mientras más moderno y sofisticado es el vehículo, más difícil es que su reconversión mantenga las condiciones originales de desempeño. Lo que esto significa es que sin importar que los vehículos reconvertidos a gas se encuentren operando con un combustible más limpio, las virtualmente inevitables limitaciones de dicha reconversión no permiten una operación óptima del motor y por lo mismo se producen mayores emisiones de contaminantes.

Si se desea continuar con las políticas de promoción del gas natural vehicular incluyendo los eventuales beneficios ambientales asociados con el mismo, se deben desarrollar los instrumentos e incentivos apropiados para que el uso de este combustible se lleve a cabo, no a través de reconversiones tecnológicas, sino por medio de vehículos dedicados (e.d, vehículos que sólo operan con GNV) que correspondan a los últimos desarrollos de la industria automotriz mundial.

Esto es de particular importancia pues si bien el problema de contaminación de Bogotá y otras ciudades no está vinculado de forma directa con la presencia de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno (las especies que se ven más negativamente afectadas por las reconversiones a gas natural), estas sustancias químicas son promotoras tanto de smog fotoquímico (ozono) como de material particulado secundario. De esta forma, un incremento en dichas emisiones tiene un impacto negativo en los niveles de contaminación de especies que representan la preocupación actual para las autoridades ambientales y de salud pública de la ciudad.

Finalmente, vale la pena resaltar el caso del CO<sub>2</sub>, el cual si bien no es una sustancia contaminante o que sea parte de la normativa nacional de calidad del aire, es una especie de gran interés dada su capacidad de generar cambio climático. El comportamiento observado para este caso es distinto al documentado para los demás gases que fueron considerados en este proyecto. En particular, la Figura 4.12 muestra que para vehículos provistos con TWC, las emisiones de CO<sub>2</sub> se reducen como consecuencia del uso de GNV. Lo contrario ocurre, sin embargo, para los vehículos de modelos más antiguos que carecen de tecnologías de control de emisiones.

También es relevante resaltar que en este estudio no se llevaron a cabo mediciones de emisiones de PM para vehículos operados con gasolina y GNV. Es probable que dadas las características de este combustible, el uso del GNV hubiese mostrado un comportamiento positivo, en términos de una reducción de emisiones de dicho contaminante. Este parámetro no fue incluido como parte de la matriz experimental ya que se encuentra bastante bien documentado que el aporte de los vehículos de gasolina al inventario de emisiones de PM de Bogotá no es significativo (Giraldo, 2005; Herrera 2006).

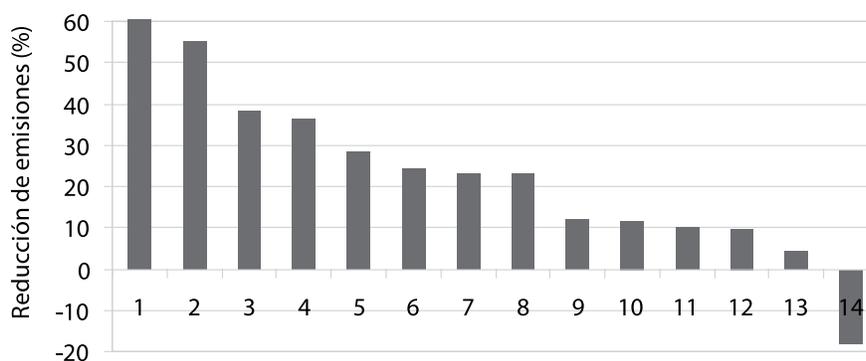
## 4.6. Efecto de la calidad del combustible

Tal y como fue descrito en la sección de metodología, durante este proyecto se llevaron a cabo pruebas de emisiones específicamente destinadas a estudiar el impacto que tiene la calidad del combustible diésel, en términos de su contenido de azufre, en los niveles de emisiones de material particulado.

La Figura 4.15 resume los principales resultados de dichos experimentos, a partir de los cuales se puede afirmar de forma contundente que el uso de ACPM de calidad internacional (e.d., bajo contenido de azufre) conlleva a reducciones sustanciales en las emisiones de material particulado por parte de la flota de carga pesada.

El amplio rango observado en la reducción de emisiones por efecto del uso de combustible de bajo contenido de azufre (entre el 5 y el 60%) se encuentra relacionado con las características propias de los vehículos que fueron parte del estudio, en términos de su edad, tamaño de motor y estado de mantenimiento. En particular, aquellos vehículos que exhibieron un mayor factor de emisión al ser evaluados con ACPM convencional fueron precisamente para los cuales se observaron las mayores reducciones en las emisiones de PM.

Estos resultados son consistentes con la masiva documentación disponible en la literatura técnica y científica internacional acerca de los impactos que el contenido de azufre tiene sobre los niveles de emisión de material particulado. Esto no significa, sin embargo, que el esfuerzo aquí realizado no cuente con un valor agregado ya que el fenómeno en referencia pudo ser documentado y demostrado para condiciones reales de operación en Bogotá.



**Figura 4.15.** Porcentaje de reducción de emisiones de PM<sub>2.5</sub> en vehículos diésel al ser operados con ACPM de calidad internacional.

El porcentaje de reducción se determinó para cada caso a partir de las diferencias entre los factores de emisión obtenidos para cada vehículo, cuando éstos fueron operados con el ACPM importado y de calidad internacional y cuando fueron operados con el ACPM disponible en Bogotá.

## 5. Análisis de incertidumbre

Los autores de este trabajo consideran que los resultados relacionados tanto con factores de emisión como con los inventarios finales corresponden a valores confiables y que representan la realidad actual de la ciudad en una forma que no puede ser replicada haciendo uso de resultados obtenidos en ejercicios anteriores. Esto significa que los inventarios aquí reportados pueden ser utilizados por la ciudad para la toma de decisiones en lo que se refiere a su política de control de la contaminación del aire.

Al mismo tiempo, sin embargo, esto no quiere decir que la metodología utilizada en este estudio (así como en cualquier trabajo de esta naturaleza) no cuente con limitaciones que generan un cierto grado de incertidumbre en los resultados. Dicha incertidumbre se encuentra cuantificada y documentada de forma explícita en las tablas que conforman al capítulo de resultados (ver Sección 4) y fue del orden del 30%.

Dicho valor de incertidumbre global, determinado al propagar la incertidumbre para cada paso haciendo uso del método de mínimos cuadrados, corresponde a una magnitud típica del error que se encuentra asociado con este tipo de ejercicios.

Las principales fuentes de error en nuestros resultados se encuentran relacionadas con los siguientes aspectos: **1)** Los factores de emisión asignados a las categorías vehiculares corresponden a experimentos realizados en una muestra y no en el universo posible de todo el parque automotor; **2)** No todas las categorías vehiculares que conforman a la flota de Bogotá lograron ser considerados durante el desarrollo de las pruebas de emisiones (v.g., la muestra no incluyó vehículos de carga liviana operados con ACPM); **3)** El número de vehículos que transitan por Bogotá no necesariamente corresponde a los vehículos registrados en la base de datos de la SDM (debido a la circulación de automotores registrados en otras ciudades así como a las limitaciones existentes en la depuración de la información contenida en dicha base de datos); **4)** No todas las categorías vehiculares fueron objeto de análisis para todas las especies de interés (e.d., no se realizaron mediciones de PM en vehículos de gasolina y GNV ni mediciones de emisiones de gases en vehículos operados con ACPM); **5)** Los factores de actividad vehicular fueron determinados a partir de información secundaria.

Estos aspectos a su vez se encuentran relacionados con limitaciones y situaciones que no era posible resolver durante el desarrollo de la campaña de campo e incluyen temas tales como los costos asociados con las mediciones directas de emisiones durante pruebas en ruta, la relativamente restringida disponibilidad en la información del sector automotor en Colombia, la calidad de la información registrada en la base de datos de la SDM, y la disposición por parte de los propietarios de los vehículos para el desarrollo de las pruebas de emisiones.

Dado el esfuerzo realizado y el avance logrado en la confiabilidad de los factores de emisión obtenidos de forma rigurosa y para las condiciones específicas y reales de la ciudad, es ahora posible realizar proyectos focalizados a resolver las limitaciones específicas antes enumeradas. De esta forma, se abre la puerta para que las actualizaciones y mejoras al inventario de emisiones aquí presentado no requieran de estudios de esta envergadura y complejidad en términos del tiempo y los recursos financieros necesarios para su ejecución.

## 6. Conclusiones

Las fuentes vehiculares en Bogotá emiten anualmente a la atmósfera más de 4,800,000 toneladas de dióxido de carbono; 450,000 toneladas de monóxido de carbono; 30,000 toneladas de óxidos de nitrógeno; 60,000 toneladas de hidrocarburos y 1,100 toneladas de material particulado fino. Estas cantidades, sin bien son relativamente comparables con otras ciudades de América Latina, se encuentran íntimamente relacionadas con el problema de contaminación del aire en la ciudad.

Según los registros oficiales disponibles en la Secretaría Distrital de Movilidad y en complemento con otras fuentes confiables de información, por Bogotá circulan más de 1.2 millones de vehículos; incluyendo automotores de uso privado, motocicletas, taxis, vehículos de carga y vehículos de servicio de transporte público.

Dos de cada tres vehículos que circulan por la ciudad son automotores de servicio privado que se alimentan con gasolina y el 58% de éstos corresponden a vehículos de pasajeros. Por otro lado, por cada vehículo de transporte público individual registrado en Bogotá circulan dos motocicletas y por cada vehículo de transporte colectivo que circula por las calles de esta misma ciudad hay registradas cerca de cuatro motocicletas.

El conocimiento de estas cifras es de gran importancia pues de dichas cantidades depende la estrategia que se puede implementar para hacerle control a las fuentes de emisión. Por ejemplo, el relativamente bajo número de buses de transporte público colectivo (en comparación con otros sectores de la flota vehicular) significa que debería ser posible ejercer estrategias de comando y control para un alto porcentaje de los mismos.

Los resultados encontrados en este trabajo representan una evidencia clara de que las políticas de desincentivo al uso del vehículo privado así como de la promoción del uso del sistema de transporte público no han sido exitosas. En este sentido se debe seguir pensando en un sistema de transporte integrado en el que TransMilenio y otras formas de transporte masivo sean cada vez más importantes y representen un mayor porcentaje de los viajes que se realizan en la ciudad.

Este escenario debe significar la salida masiva de buses del sistema de transporte colectivo para lograr los beneficios ambientales esperados, en términos de una reducción significativa en las emisiones de material particulado.

Esto último debe considerarse como una de las prioridades fundamentales en las políticas de control de la contaminación del aire en Bogotá. Hoy en día se cuenta con un diagnóstico certero de que el principal agente contaminante de la atmósfera de Bogotá es el PM y según lo documentado en éste y otros estudios previos, la principal fuente de dicha contaminación (al interior del parque automotor) son los vehículos de transporte público colectivo.

Para reducir los niveles de emisiones por parte de la flota de carga liviana de la ciudad se deben implementar programas y medidas enfocadas hacia los siguientes temas: reducción del uso del vehículo privado y de vehículos de gran tamaño que se caractericen por elevados consumos de combustible, mejorar los patrones de conducción de tal forma que sean menos agresivos, promover la renovación del parque automotor de tal forma que los vehículos se encuentren provistos de tecnologías más avanzadas y más limpias, continuar y expandir las políticas existentes relacionadas con la exigencia de contar con tecnologías de control de emisiones, y diseñar programas para la renovación de convertidores catalíticos que ya hayan cumplido con su vida útil.

Los resultados aquí reportados también demuestran que una estrategia eficiente para la reducción de emisiones por parte de la flota liviana se encuentra asociada con mayores controles a los vehículos de transporte público individual. Esto se debe a que a pesar de representar un bajo porcentaje de la flota de la ciudad (lo que los hace relativamente más sencillos de controlar), el elevado nivel de actividad vehicular de estos automotores genera que su aporte al inventario de emisiones sea bastante importante. Del mismo modo, dados los patrones de uso, estos vehículos pueden deteriorarse en cortos períodos de tiempo y por lo mismo tienen el potencial de ser más contaminantes que automotores de características similares que se encuentren operando al interior de la flota de servicio particular.

Adicionalmente, se debe continuar con los esfuerzos para lograr la distribución de ACPM de calidad internacional, de tal forma que se sigan logrando reducciones de emisiones en toda la flota que usa este combustible y se permita el uso de tecnologías de control de emisiones para motores diésel. En este mismo sentido también es necesario implementar programas de chatarrización, renovación y modernización del parque de vehículos de carga pesada, así como de mantenimiento preventivo y especializado de los mismos.

---

Finalmente, a través de la documentación inédita generada durante la campaña de campo de este trabajo, se logró determinar que los beneficios ambientales que han sido asociados con la reconversión tecnológica de vehículos de gasolina a vehículos duales (gasolina – gas natural) son limitados y sólo se presentan en condiciones particulares. Del mismo modo, dicha reconversión puede acarrear efectos negativos en lo que se refiere a las emisiones de NO<sub>x</sub>, CO y THC.

Esto significa que si se desea continuar con las políticas de promoción del gas natural vehicular incluyendo los eventuales beneficios ambientales asociados con el mismo, se deben desarrollar los instrumentos e incentivos apropiados para que el uso de este combustible se lleve a cabo, no a través de reconversiones tecnológicas, sino por medio de vehículos dedicados (e.d, vehículos que sólo operan con GNV) que correspondan a los últimos desarrollos de la industria automotriz mundial.

## 7. Referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá. 2007. Estudio sobre los centros de actividad logística de carga de Bogotá (CALCAB). Volumen I: Diagnostico y caracterización de la logística.
- Acosta, Ferro, Herrero & Schreck, 2004. Medición de emisiones vehiculares en la ciudad de Buenos Aires. Dirección General de Política y Evaluación Ambiental de la Subsecretaría de Medio Ambiente. Asociación regional de empresas de petróleo y gas natural en América Latina (ARPEL), Canadian International Development Agency.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente del Estado de Chile (CONAMA). Diciembre, 2008. Actualización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la región metropolitana 2005.
- Behrentz, Belalcazar & Echeverry, 2005. Estimation of pollutant and greenhouse gas emission for mobile sources in Bogotá. Advanced institute on urbanization, emissions and the global carbon cycle. The global change system for analysis, research and training (START).
- Behrentz E., 2005. Measurements of nitrous oxide emissions from light-duty motor vehicles: Analysis of important variables and implications for California's greenhouse gas emissions inventory. University of California. Los Angeles.
- Durbin, Johnson, Wayne, Maldonado & Chernich, 2008. Emissions from heavy-duty vehicles under actual on-road driving conditions. *Atmospheric Environment*, **42**: 4812–4821.
- Fundación Estatal de Ingeniería del Medio Ambiente (FEEMA). Mayo, 2004. Inventario de fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos de la región metropolitana de Río de Janeiro.
- Fitz, D, 2003. Characterizing the range of children's pollutant exposure during school bus commutes. California Air Resources Board. Center for environmental Research and Technology, University of California.
- Giraldo & Behrentz, 2005. Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variables pertinentes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de los Andes.
- Guo, Zhang, Shi & Wang, 2007. On-road remote sensing measurements and fuel-based motor vehicle emission inventory in Hangzhou, China. *Atmospheric Environment*, **41**: 3095–3107.
- Herrera D. 2007. Modelo de emisiones vehiculares para la ciudad de Bogotá (EVB). Departamento de ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de los Andes.
- Jaramillo, Nuñez, Ocampo, Pérez & Portilla, 2004. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos convencionales en la zona de Cali-Yumbo. Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia: **31**:0120-6230
- Lents, Davis, Nikkila & Osses, 2005. Measurement of in-use passenger vehicle emissions in three urban areas of developing nations. International Sustainable Systems Research Center.
- Lents, Davis, Nikkila & Osses, 2004. Sao Paulo vehicle activity. International Sustainable Systems Research Center.
- Manzi, V, Belalcazar, L.C, Giraldo, E., 2003. Estimación de los factores de emisión de las fuentes móviles de la ciudad de Bogotá. Revista de ingeniería, Universidad de los Andes 18-25.
- Ministerio de Transporte - República de Colombia. 2006. Parque automotor de transporte de carga en Colombia. Dirección de transporte y tránsito. Grupo de investigación y desarrollo en transporte.
- Pokharel, Bishop & Stedman, 2002. An on-road motor vehicle emissions inventory for Denver: an efficient alternative to modeling. *Atmospheric Environment*, **36**: 5177–5184.
- Qiao F. & Yu L., 2006. On-road vehicle emissions in Beijing, China: An experimental study using PEMS. Department of Transportation Studies, Texas Southern University. Houston, Texas.

Reynolds A & Broderick B., 2000. Development of an emissions inventory model for mobile sources. *Transportation Research, Part D 5*: 77-101.

Rakesh B, & Sloan, 2006. A high-resolution NOx emission factor model for North American motor vehicles. *Atmospheric Environment, 40*: 5214-5223.

Salles, Janischewski, Jaecker-Voirol & Martin, 1995. Mobile source emissions inventory model application to Paris Area. *Atmospheric environment, Vol 30, No. 12*: 1965-1975.

Schifter, Díaz, Múgica & López-Salinas, 2005. Fuel-based motor vehicle emissions inventory for the metropolitan area of Mexico City. *Atmospheric Environment, 39*: 931-940.

Singer B. & Harley, R. 1996. A fuel-based motor vehicle emissions inventory. The University of California Transportation Center.

Singer, B. & Harley R., 2000. A fuel-based inventory of motor vehicle exhaust emissions in the Los Angeles area during Summer 1997. *Atmospheric Environment, 34*: 1783-1795.

Transmilenio (2008). Transmilenio en cifras, estadísticas Transmilenio 2008. [En línea]

Universidad de los Andes, Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental. 2002. Diseño e implementación de un modelo de calidad de aire para Bogotá. Sexto informe semestral. Bogotá.

Universidad Pontificia Bolivariana, Área metropolitana del Valle de Aburrá. 2006. Actualización del inventario de emisiones atmosféricas en el valle de Aburrá - Informe final.

U.S, Environmental Protection Agency – EPA. 2008. Title 40: Protection of Environment. CFR 40; Part 86: 1342-94 — control of emissions from new and in-use highway vehicles and engines.

User's Manual - Sierra Series 640S Steel – MassTM Insertion mass flow meter. Part number IM 64S. Amsterdam.

User's manual DMM-230<sup>a</sup>, Dekati Mass Monitor Version 1.2. Dekati Ltd. 2002.

User's manual Dekati diluter, Version 4.5, Dekati Ltd. 2004.

User's manual SEMTECH-G. ON-vehicle Gasoline Emission Analyzer. Document 9510-067. Sensors, Inc.

Zarate E., 2007. Understanding the origins and fate of air pollution in Bogotá, Colombia. Swiss Federal Institute of Technology - Lausanne. School of Architecture, Civil and Environmental Engineering.

Zarate, E., Belalcazar, LC., Clappier, A., Manzi, V & Van den Bergh, 2007. Air quality modelling over Bogota, Colombia: Combined techniques to estimate and evaluate emission inventories. *Atmospheric Environment, 41*: 6302-6318.







