

**ESTIMACIÓN DEL INVENTARIO DE EMISIONES DE FUENTES MÓVILES
PARA LA CIUDAD DE BOGOTÁ E IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES
PERTINENTES**

LILIANA ANDREA GIRALDO AMAYA

**Proyecto de grado presentado como requisito para el título de Maestría en
Ingeniería Civil**

**Directores Internos
EDUARDO BEHRENTZ
ARTURO ARDILA**

**Director Externo
MAURICIO OSSES**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2005**

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| RESUMEN EJECUTIVO | 1 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| 2. OBJETIVOS | 6 |
| 3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO IVE | 7 |
| 4. METODOLOGÍA..... | 10 |
| 4.1 DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA DE MEDICIÓN..... | 10 |
| 4.1.1 <i>Selección de Rutas para la Realización de la Campaña de Medición.....</i> | <i>11</i> |
| 4.1.2 <i>Aforos Vehiculares Utilizando Cámaras de Video</i> | <i>13</i> |
| 4.1.3 <i>Encuestas en Parqueaderos de la Ciudad</i> | <i>13</i> |
| 4.1.4 <i>Patrones de Conducción Utilizando GPS</i> | <i>14</i> |
| 4.1.5 <i>Recolección de Información sobre el Número de Veces que se Enciende un Vehículo Particular.....</i> | <i>16</i> |
| 4.2 ESTIMACIÓN DEL INVENTARIO DE EMISIONES | 16 |
| 4.3 SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS EVALUADOS | 17 |
| 5. RESULTADOS | 19 |
| 5.1 DISTRIBUCIÓN TECNOLÓGICA DE VEHÍCULOS DE PASAJEROS..... | 19 |
| 5.2 FACTOR DE ACTIVIDAD PARA VEHÍCULOS DE PASAJEROS..... | 21 |
| 5.3 AFOROS VEHICULARES UTILIZANDO CÁMARAS DE VIDEO | 22 |
| 5.3.1 <i>Ocupación Relativa de las Vías en Bogotá.....</i> | <i>23</i> |
| 5.3.2 <i>Ocupación Relativa de las Vías en Bogotá Dependiendo del Sector Socio-Económico</i> | <i>24</i> |
| 5.3.3 <i>Comparación de los Resultados Bogotanos con Otras Ciudades.....</i> | <i>25</i> |
| 5.4 PATRONES DE CONDUCCIÓN..... | 27 |
| 5.4.1 <i>Patrones de Conducción de Vehículos Particulares.....</i> | <i>27</i> |
| 5.4.2 <i>Patrones de Conducción de Motos, Taxis, Buses y Camiones</i> | <i>30</i> |
| 5.5 PATRONES DE ENCENDIDO DE LOS VEHÍCULOS DE PASAJEROS..... | 31 |
| 5.6 RESULTADOS DEL INVENTARIO DE EMISIONES DE FUENTES MÓVILES PARA BOGOTÁ SEGÚN EL MODELO IVE..... | 33 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.7 INVENTARIO DE EMISIONES DE FUENTES MÓVILES PARA BOGOTÁ BAJO DIFERENTES ESCENARIOS | 35 |
| 5.7.1 Escenarios Mejorando la Calidad del Diesel | 36 |
| 5.7.2 Escenarios Considerando Eliminación de la Sobreoferta Actual de Buses..... | 37 |
| 5.7.3 Escenarios Renovando Parte de la Flota de Buses Incluyendo Mejoramiento de la Calidad del Diesel..... | 39 |
| 5.7.4 Escenario Sobre el Requerimiento de Catalizador Para Todas las Motos de la Ciudad y Caso Hipotético de Motos a 4 Tiempos..... | 40 |
| 5.7.5 Escenario del Cambio de Taxis y Colectivos a Gas Natural: Comparación Vehículos Duales y Vehículos Dedicados de Gas Natural | 42 |
| 5.7.6 Escenario Considerando el Cambio de Combustible de Transmilenio de Diesel a Gas Natural..... | 44 |
| 6. COMPARACIÓN DEL INVENTARIO DE EMISIONES CON ESTUDIOS PREVIOS..... | 48 |
| 7. INCERTIDUMBRE Y REPRESENTATIVIDAD | 50 |
| 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 52 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA..... | 55 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Ciudades en las que se ha desarrollado el proyecto IVE | 7 |
| Figura 2. Sectores seleccionados para la campaña de medición | 12 |
| Figura 3. Filmación del flujo vehicular en diferentes vías de Bogotá..... | 13 |
| Figura 4: Encuestas en parqueaderos de la ciudad de Bogotá..... | 14 |
| Figura 5. Recolección de información utilizando GPS..... | 15 |
| Figura 6. Recolección de información utilizando unidades VOCE. | 16 |
| Figura 7. Resumen de los escenarios analizados. | 18 |
| Figura 8. Distribución de vehículos de pasajeros por año modelo. | 20 |
| Figura 9. Actividad de vehículos particulares en los primeros 25 años de uso | 22 |
| Figura 10. Porcentaje de ocupación de las vías de las diferentes categorías vehiculares | 23 |
| Figura 11. Aforos de las principales categorías vehiculares en diferentes sectores de la ciudad. | 23 |
| Figura 12. Distribución de la flota vehicular en diferentes sectores socio-económicos de la ciudad en horas de la mañana y de la tarde..... | 25 |
| Figura 13. Comparación de los patrones de conducción para tres tipos de vías en un sector de nivel socio-económico alto..... | 28 |
| Figura 14. Patrón de encendido de vehículos particulares en Bogotá. | 33 |
| Figura 15. Aporte de las principales categorías vehiculares a las emisiones. | 34 |
| Figura 16. Emisiones totales utilizando diferentes calidades de diesel..... | 37 |
| Figura 17. Emisiones totales para los casos de sobreoferta y sin sobreoferta de buses de gasolina y diesel en la ciudad..... | 38 |
| Figura 18. Emisiones totales para la ciudad de Bogotá en el escenario de renovación de buses incluyendo mejoramiento en la calidad del diesel..... | 40 |
| Figura 19. Emisiones totales para la ciudad de Bogotá en los escenarios de motos con catalizadores y motos a 4 tiempos. | 41 |
| Figura 20. Emisiones para las categorías de taxi y colectivo operando con gasolina, gas natural y motores duales. | 43 |
| Figura 21. Emisiones totales para la ciudad de Bogotá en los escenarios con taxis y colectivos operando con gasolina, gas natural y motores duales. | 44 |
| Figura 22. Emisiones para Transmilenio en la ciudad de Bogotá utilizando diesel y gas natural como combustible..... | 45 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1: Descripción de las variables para la estimación de factores de emisión corregidos en el modelo IVE | 9 |
| Tabla 2. Distribución tecnológica de vehículos de pasajeros | 19 |
| Tabla 3. Comparación de la distribución tecnológica de vehículos de pasajeros en Bogotá con otras ciudades del mundo..... | 21 |
| Tabla 4. Comparación del porcentaje de las categorías vehiculares en diferentes ciudades. | 26 |
| Tabla 5. Velocidades promedio durante el día para VP en tres tipos de vías. | 29 |
| Tabla 6. Velocidades promedio durante el día para cuatro categorías vehiculares. | 30 |
| Tabla 7. Patrones de encendido de los vehículos particulares en la ciudad | 32 |
| Tabla 8. Emisiones totales de diversos contaminantes provenientes de fuentes móviles en la ciudad de Bogotá..... | 33 |
| Tabla 9. Aporte de buses articulados de Transmilenio al inventario de emisiones de la ciudad bajo diferentes escenarios. | 47 |
| Tabla 10. Resultados de diversos estudios | 48 |

RESUMEN EJECUTIVO

En la ciudad de Bogotá se han realizado diversos estudios encaminados a la estimación del inventario de emisiones provenientes de fuentes móviles, tanto para contaminantes criterio como para sustancias generadoras de cambio climático global. La presente investigación hace parte de este conjunto de proyectos, en donde además de actualizar y validar los inventarios existentes se pretendió ofrecer una metodología para la evaluación de estrategias encaminadas a la reducción de las emisiones de la flota vehicular de la ciudad.

Durante este estudio se estimó el inventario de emisiones de fuentes móviles de Bogotá y se identificaron las variables de mayor importancia para éste. Se determinó el aporte de cada una de las categorías vehiculares a las emisiones de contaminantes criterio (CO, PM₁₀, VOC, NO_x y SO_x), gases efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O) y sustancias tóxicas (benceno, acetaldehído, formaldehído, amoníaco, butadieno). Finalmente, a partir de una evaluación cuantitativa, se identificaron las estrategias más eficientes para la reducción de las emisiones provenientes de fuentes móviles en la ciudad.

La metodología utilizada durante esta investigación estuvo basada en el procedimiento propuesto por el proyecto IVE (modelo internacional de emisiones vehiculares), en donde el inventario de emisiones de un centro urbano es estimado a partir de una corta campaña de medición y una serie de factores de emisión reportados en la literatura científica.

La campaña de medición efectuada en Bogotá en enero de 2005 incluyó, entre otras, las siguientes actividades: 1) Recolección de información acerca de la distribución tecnológica de los vehículos de pasajeros: año modelo, tipo de combustible utilizado, lectura del odómetro y presencia de dispositivos para el control de emisiones. 2) Aforos vehiculares en diversos puntos de la ciudad para determinar la distribución relativa de los diferentes componentes de la flota: buses, camiones, vehículos particulares, taxis y motos. 3) Recolección de información acerca de las costumbres de manejo de los conductores de la ciudad.

La herramienta de cálculo incluida en el modelo IVE fue utilizada tanto para la estimación del inventario de emisiones provenientes de fuentes móviles en Bogotá como para la evaluación de diversos escenarios relacionados con los niveles de emisiones en la ciudad. Estos escenarios fueron seleccionados con el fin de determinar la importancia de factores tales como el tipo y la calidad del combustible utilizado, la renovación y eliminación de la sobre-oferta de la flota de servicio público colectivo, y el uso de sistemas de control de emisiones.

Se estimaron las emisiones totales para contaminantes criterio obteniendo resultados de 6 Ton/d para PM_{10} , 2,500 Ton/d para CO, 150 Ton/d para NO_x , 7 Ton/d para SO_x y 200 Ton/d para COV.

Se determinó que los taxis, micro-buses y buses articulados del sistema Transmilenio no son categorías vehiculares importantes, en términos de su aporte al inventario total de emisiones en la ciudad. Por otro lado, las emisiones provenientes de los buses pertenecientes a la flota de servicio público colectivo, los camiones y las motos dominan el inventario de emisiones de material particulado en la ciudad.

A partir de los análisis realizados se determinó que la estrategia mas eficaz para disminuir las emisiones de material particulado, el más importante de todos los contaminantes atmosféricos desde una perspectiva de salud pública, es el mejoramiento en la calidad de los combustibles diesel (e.d., reducción del contenido de azufre) que se distribuyen en la capital del país. Otras estrategias interesantes incluyen la eliminación de la sobreoferta de buses, la renovación de la flota de servicio público colectivo y la renovación de la flota de motos de la ciudad que utilizan motores de dos tiempos hacia motores de cuatro tiempos.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica en las grandes ciudades es hoy en día uno de los temas que genera mayor interés público. Estudios recientes (Schifter et al., 2003; Ghose et al., 2004) han demostrado que las fuentes móviles son las principales generadoras de contaminantes atmosféricos en centros urbanos. Bogotá en su calidad de mega-ciudad no es la excepción y quedó en evidencia debido a los resultados de estudios realizados anteriormente que indican un aporte de los vehículos del 65% en la mayoría de contaminantes, comparado con un 35% proveniente de fuentes industriales (Uniandes, 2004). Por esta razón es importante estudiar estas fuentes y realizar inventarios que nos permitan cuantificar la severidad del problema.

A través de los años se han desarrollado diferentes metodologías para la estimación de inventarios de emisiones de fuentes móviles, las cuales se pueden clasificar en metodologías de estimación directa y metodologías de estimación indirecta. Las metodologías de estimación directa son aquellas que realizan mediciones de emisiones directamente en la fuente, algunos ejemplos son el monitoreo abordo, las mediciones con sensores remotos y las pruebas dinamométricas. Son metodologías muy precisas pero que necesitan una inversión de capital considerable para obtener resultados representativos. Las metodologías de estimación indirecta, como su nombre lo indica, son aquellas que permiten estimar las emisiones de contaminantes provenientes de una fuente a partir de diversas variables relacionadas con estas. Estas metodologías no realizan mediciones de emisiones en la fuente directamente, sino que se utilizan correlaciones entre las emisiones y diversos parámetros que las afectan.

En las metodologías de estimación directa, se realizan mediciones de las emisiones, mientras que en metodologías de estimación indirecta se utilizan factores de emisión para la estimación de las emisiones.

La gran mayoría de metodologías para la estimación de emisiones se fundamentan en la Ecuación 1.

$$E = F_e \cdot A \cdot N_f \quad (1)$$

Donde,

E = emisión; F_e = factor de emisión; A = factor de actividad; N_f = número de fuentes

Existen modelos computacionales diseñados para estimar las emisiones provenientes de distintas fuentes. Estos modelos son generados a partir de resultados empíricos basados en mediciones directas que a su vez son correlacionadas con diversos parámetros. Estas correlaciones son aplicadas en otros lugares y a partir de estas se estiman las emisiones. Los modelos de estimación de emisiones vehiculares más utilizados alrededor del mundo son el MOBILE y el COPERT, los cuales fueron desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y por la Agencia Ambiental Europea (EEA), respectivamente.

El principal inconveniente de utilizar modelos de estimación de emisiones desarrollados para ciudades distintas, tiene que ver con la influencia que las condiciones y características propias de cada lugar tienen en los factores de emisión vehiculares. Por esta razón, la USEPA financió en el 2003, la elaboración del Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE), con el objetivo de suplir las necesidades de países en vía de desarrollo en la realización de inventarios de emisiones de fuentes móviles. Este trabajo ha sido llevado a cabo por investigadores de la Universidad de California y el Centro Internacional de Investigación de Sistemas Sostenibles (ISSRC).

El modelo IVE fue creado en el marco del proyecto que lleva su nombre, con el objetivo de realizar un estudio internacional de emisiones por fuentes móviles en países en vía de desarrollo. El protocolo involucrado en tal estudio, incluye no solo la herramienta computacional sino el desarrollo de una metodología que permite recolectar, de manera efectiva y económica, la información necesaria para estimar las emisiones provenientes del parque automotor.

En Bogotá se han realizado diversos estudios en los cuales se han estimado las emisiones provenientes de fuentes móviles para contaminantes criterio (CO , NO_x , SO_x , PM y COV). En el año 2002, en el contexto del Modelo de Calidad del Aire para Bogotá, la Universidad de Los Andes, la Escuela Politécnica Federal de Lausanne (EPFL) y el

Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA), desarrollaron un inventario de emisiones por fuentes móviles para la ciudad de Bogotá, utilizando una metodología de modelación inversa en un cañón urbano de la ciudad. Más recientemente, la Universidad de Los Andes con financiación del Sistema para el Análisis, la Investigación y el Entrenamiento (Start) llevó a cabo una estimación del inventario de emisiones de gases efecto invernadero provenientes de vehículos livianos en Bogotá, basado en factores de emisión determinados para la flota vehicular de California.

A pesar de la importancia de los estudios existentes, el desarrollo del presente proyecto permite comparar y actualizar los resultados obtenidos además de ofrecer una alternativa económica y fácil de utilizar. Adicionalmente, la herramienta utilizada en este proyecto permite el análisis de escenarios y de sensibilidad para determinar e identificar los factores que tienen una mayor influencia en las emisiones de la flota vehicular de la ciudad.

2. OBJETIVOS

Los objetivos de este proyecto eran poder responder las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es el aporte de las diferentes categorías vehiculares a las emisiones totales de contaminantes en la ciudad?
- ¿Qué medidas son adecuadas para mitigar el problema de contaminación causado por fuentes móviles?

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO IVE

El modelo IVE es una herramienta computacional creada con el fin de ser flexible a las necesidades de ciudades que no cuentan con un modelo propio de estimación de emisiones. La aplicación de este modelo permite evaluar diferentes estrategias que pueden implementarse para la reducción de las emisiones de contaminantes de una ciudad. Adicionalmente, la metodología propuesta permite hacer seguimiento a medidas implementadas para reducir la contaminación de fuentes móviles. Este modelo se ha implementado en 11 ciudades como Santiago de Chile, Pune (India), Nairobi (Kasajistán), Sao Paulo (Brasil) entre otras (Figura 1).

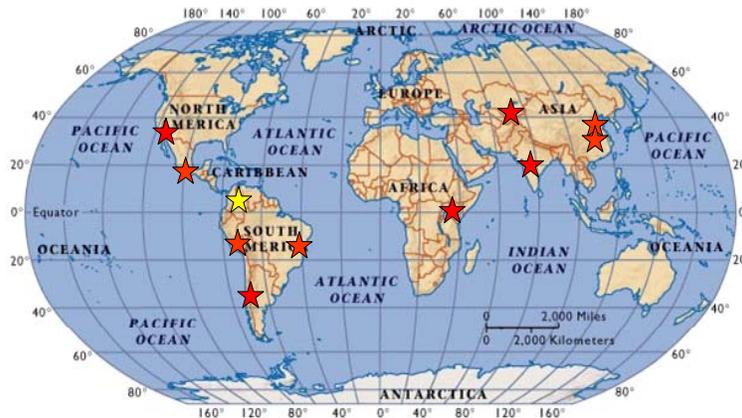


Figura 1. Ciudades en las que se ha desarrollado el proyecto IVE

Fuente: Presentación "Estudio Actividad Vehicular en Bogotá" al DAMA. Mauricio Osses 2005

Por medio del modelo IVE es posible estimar las emisiones de contaminantes criterio (CO, NOx, SOx, PM10 y COV), gases efecto invernadero (CO₂, N₂O, CH₄) y otras sustancias tóxicas (NH₃, benceno, plomo, 1.3-butadieno, acetaldehídos y formaldehídos) provenientes de las diferentes categorías vehiculares como vehículos de pasajeros (particulares y taxis), motocicletas, buses y camiones.

Para la estimación del inventario de emisiones el modelo requiere principalmente información acerca de los siguientes componentes: tasa de emisión de contaminantes de los vehículos (factores de emisión), actividad de los vehículos y distribución tecnológica

de la flota (v.g uso de aire acondicionado, tipo de combustible utilizado, sistemas de control de emisiones).

El modelo IVE cuenta con la opción de ingresar los factores de emisión propios de cada ciudad, sin embargo en caso de no contar con esta información, el modelo utiliza principalmente, factores de emisión desarrollados a partir del ciclo de conducción del Método de Prueba Federal (FTP) de Estados Unidos para ser luego ajustados a la realidad de las características observadas de la ciudad para la cual se está elaborando el análisis. El proceso de cálculo que realiza el modelo para la corrección del factor de emisión se presenta en la ecuación 2. En esta ecuación se calcula el factor de emisión ajustado para cada categoría de vehículos el cual posteriormente es utilizado para estimar los factores de emisión correspondientes para los estados de emisión en frío y en caliente. Este procedimiento se muestra en las ecuaciones 3a y 3b. La Tabla 1 presenta una descripción de las variables encontradas en las ecuaciones 2, 3a y 3b.

[C2]

$$Q_{[t]} = B_{[t]} * K_{1[t]} * K_{2[t]} * K_{3[t]} * K_{4[t]} * K_{5[t]} \quad (2)$$

$$Q_{EnCaliente} = \bar{U}_{FTP} * D / \bar{U}_c * \sum_t \left\{ F_{[t]} * Q_{[t]} * \sum_d \left(F_{[dt]} * K_{[dt]} \right) \right\} \quad (3a)$$

$$Q_{EnFrio} = \sum_t \left\{ F_{[t]} * Q_{[t]} * \sum_d \left(F_{[dt]} * K_{[dt]} \right) \right\} \quad (3b)$$

De la Tabla 1 se observa que los factores de corrección se clasifican de acuerdo a variables características de cada ciudad, a la calidad del combustible, a factores relacionados con la potencia y a variables de conducción. Es a partir de estas correcciones que el modelo IVE cuenta con la flexibilidad para ser utilizado en diversos lugares obteniendo resultados de gran utilidad para el establecimiento de políticas de control y prevención ambiental.

Tabla 1: Descripción de las variables para la estimación de factores de emisión corregidos en el modelo IVE

| Variable | Descripción |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $B_{[t]}$ | Factor de emisión base por tecnología (g/km) |
| $Q_{[t]}$ | Factor de emisión ajustado para cada tecnología (g) |
| $F_{[t]}$ | Fracción de viaje para una tecnología específica |
| $F_{[dt]}$ | Fracción de cada tipo de conducción o detención para una tecnología específica |
| \bar{U}_{FTP} | Velocidad promedio del ciclo de conducción LA4 (constante (kph)) |
| D | Distancia de viaje ingresada por el usuario (km) |
| \bar{U}_C | Velocidad promedio de un ciclo de conducción específico, ingresada por el usuario en el archivo de características de cada lugar (kph) |
| $K_{1[t]}$ | Factor de corrección por temperatura |
| $K_{2[t]}$ | Factor de corrección por humedad |
| $K_{3[t]}$ | Factor de corrección por mantenimiento y programas de inspección |
| $K_{4[t]}$ | Factor de corrección por la calidad del combustible |
| $K_{5[t]}$ | Factor de corrección por altura del lugar |
| $K_{[dt]}$ | Factor de corrección por la forma de conducir y detenciones (también incluye otros efectos causados por el uso de aire acondicionado y las pendientes de las vías) |

[C3]

Adaptado del Manual del Usuario Modelo IVE versión 1.1.1.

Los factores de emisión y corrección están definidos en el modelo IVE y son asignados de acuerdo a las características de los vehículos, la meteorología y calidad de los combustibles de cada ciudad.

4. METODOLOGÍA

La metodología seguida en la realización de este proyecto estuvo compuesta por tres actividades principalmente. En primer lugar se realizó una campaña de medición con el fin de recolectar información necesaria para ingresar al modelo. En segundo lugar se llevo a cabo la estimación del inventario de emisiones utilizando el modelo IVE como herramienta de cálculo y por último se identificaron las variables de mayor relevancia para el inventario y se evaluaron diferentes escenarios de posibles medidas encaminadas hacia la reducción de los niveles de emisión de contaminantes en la ciudad.

4.1 Descripción de la Campaña de Medición

La metodología seguida durante la campaña de medición, utilizada en la estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles, fue la establecida por los creadores del modelo IVE y ha sido aplicada de manera estandarizada en 11 ciudades del mundo.

Esta metodología permite recolectar información relacionada con la distribución tecnológica de vehículos de pasajeros (combustible y tipo de vehículos), la distribución de la flota activa en la ciudad, los patrones de conducción de las diferentes categorías vehiculares y los niveles de actividad vehicular.

La campaña de medición se llevó a cabo en Bogotá del 17 al 28 de Enero del 2005 e involucró la participación de aproximadamente 30 personas durante dos semanas de mediciones. Durante este periodo se desarrollaron las siguientes actividades:

- 1) Selección de rutas para la realización de la campaña de medición
- 2) Aforos (conteos) vehiculares utilizando cámaras de video.
- 3) Encuestas en parqueaderos de la ciudad
- 4) Recolección de información utilizando sistemas de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés)
- 5) Recolección de información sobre el número de veces que se encienden los vehículos particulares

Las mediciones realizadas en este proyecto permitieron recolectar información de la flota dinámica en la ciudad. Este concepto se refiere a la flota de vehículos que está siendo utilizada en la ciudad. Este tipo de mediciones son muy importantes y se diferencian de la información que se puede obtener de una base de datos estática, la cual se limita a la información de vehículos registrados en la ciudad sin tener en cuenta los factores de actividad de los mismos.

4.1.1 Selección de Rutas para la Realización de la Campaña de Medición

Para efectuar las mediciones con GPS en vehículos particulares (VP) y las filmaciones con cámaras de video, se seleccionaron tres sectores de la ciudad, cada uno representativo de un nivel socio-económico diferente. Uno en el Norte de la ciudad catalogado como sector de nivel socio-económico alto, una ruta en la zona centro de la ciudad catalogado como sector comercial y una ruta en un sector de nivel socio-económico medio-bajo.

En cada uno de estos sectores se llevaron a cabo mediciones en tres tipos de vías: vías residenciales, vías arteriales (vías de dos carriles en cada sentido, con semáforos que generalmente comunican las vías residenciales con las vías rápidas) y vías rápidas (vías con pocos o ningún semáforo y con cuatro o más carriles en cada sentido). Los sectores seleccionados fueron el barrio Santa Bibiana al norte de la ciudad, representativo de una zona de alto ingreso, el barrio Teusaquillo en la zona centro, representativo de una zona comercial y el barrio Marsella ubicado al sur de la ciudad representativo de una zona de medio-bajo ingreso. La Figura 2 muestra la ubicación de los sectores descritos anteriormente.

Durante los recorridos se hicieron mediciones con unidades GPS en tres VP. Se siguió un cronograma que consistía en recorrer durante seis días, tres en horas de la mañana (7:00-13:00) y tres en horas de la tarde (14:00-21:00), los sectores seleccionados. Cada día, cada uno de los vehículos realizaba recorridos en uno de los tres sectores seleccionados. El vehículo debía recorrer cada hora una de las vías dentro del sector (arterial, residencial o vía rápida) con el fin de que al finalizar los seis días se contara con información para todas las horas de cada uno de los sectores y de los tres tipos de vías

en estos. La información recolectada con cámaras de video se recolectó siguiendo el mismo cronograma asignado a uno de los vehículos. Las filmaciones se realizaban filmando los primeros 20 minutos cada hora.[C4]

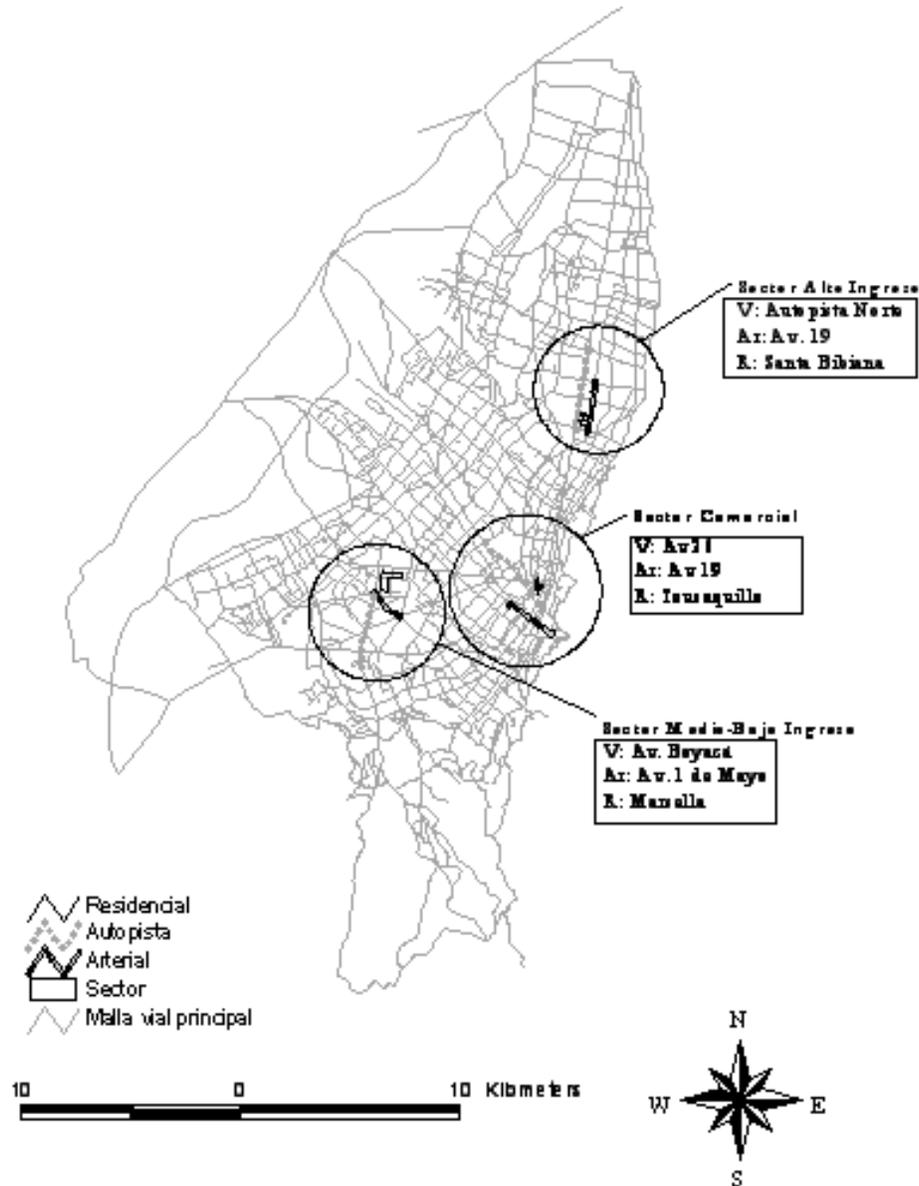


Figura 2. Sectores seleccionados para la campaña de medición
V= Vía rápida; Ar= Arterial; R= Residencial

4.1.2 Aforos Vehiculares Utilizando Cámaras de Video

Para efectuar las mediciones con cámaras de video se seleccionaron tres sectores de la ciudad como se mencionó en la sección anterior. Se ubicaron dos cámaras de video en las vías seleccionadas y se realizó la filmación del flujo vehicular durante seis días en el transcurso de siete horas, en las cuales se filmaron los primeros veinte minutos de cada hora.

Los aforos vehiculares se realizaron utilizando lectores de video y revisando en cámara lenta cada una de las filmaciones. En la Figura 3 se puede apreciar la labor de filmación en campo y la edición que se realizó posteriormente.

Esta actividad generó información sobre el número y tipo de vehículos que circulan por las diferentes vías de la ciudad.



Figura 3. Filmación del flujo vehicular en diferentes vías de Bogotá

4.1.3 Encuestas en Parqueaderos de la Ciudad

Las encuestas en parqueaderos se realizaron con el fin de obtener la distribución tecnológica de vehículos de pasajeros. En estas encuestas se recolectó información en quince parqueaderos de la ciudad ubicados en diferentes sectores socio-económicos. Se

visitaron parqueaderos de centros comerciales, de universidades, de empresas privadas entre otros. En esta actividad se contaba con el apoyo de dos mecánicos los cuales realizaban una inspección visual de los vehículos y recolectaban información como el modelo, el tipo de combustible, el kilometraje, el cilindraje, la presencia de equipos de control de emisiones (convertidor catalítico), el estado de mantenimiento del vehículo, entre otras variables.

Se recolectó información para 1044 VP y 68 taxis. En la Figura 4 se puede observar la manera como se realizaba la inspección visual de diferentes vehículos.



Figura 4: Encuestas en parqueaderos de la ciudad de Bogotá

4.1.4 Patrones de Conducción Utilizando GPS

Se recolectó información con sistemas de posicionamiento global GPS en tres vehículos privados (6 días de medición en cada uno), tres taxis (6 días de medición en cada uno), dos motocicletas (6 días de medición en cada uno), dos camiones (6 días de medición en cada uno), aproximadamente 50 buses convencionales (1 hora de medición en cada uno) y cuatro buses articulados del sistema Transmilenio (1 hora de medición en cada uno). La Figura 5 presenta imágenes de las mediciones en diferentes vehículos.

La información de posición en tiempo real recolectada en esta actividad permitió estimar la velocidad de los vehículos y las pendientes de las diferentes vías que recorrían. Este tipo de información es necesaria para determinar el patrón de conducción de cada uno de los vehículos.

Es importante conocer las velocidades medias, el número de aceleraciones y desaceleraciones, así como la cantidad de tiempo que un vehículo pasa detenido, ya que este tipo de parámetros afectan las emisiones de manera significativa. Un vehículo que acelere demasiado está forzando más el motor que uno que no lo haga tanto, y así generando un mayor consumo de combustible y como consecuencia de esto una mayor cantidad de emisión de contaminantes.

Las mediciones con GPS en VP se realizaron en tres sectores de la ciudad cada uno representativo de un nivel socio-económico diferente. En cada uno de estos sectores se llevaron a cabo mediciones en tres tipos de vías: vías residenciales, vías arteriales y vías rápidas. Cada VP dotado con un GPS, siguió un cronograma que consistía en recorrer durante seis días, tres en horas de la mañana (7:00-13:00) y tres en horas de la tarde (14:00-21:00), los sectores seleccionados.



Figura 5. Recolección de información utilizando GPS.

4.1.5 Recolección de Información sobre el Número de Veces que se Enciende un Vehículo Particular

Se repartieron 80 unidades VOCE (Vehicle Occupancy Characteristics Enumerator) el día Martes 18 de Enero y se recolectaron el día Jueves 27 de Enero completando así nueve días de mediciones en cada uno de los vehículos voluntarios. La Figura 6 presenta la forma como se instalaron los VOCE en uno de los vehículos.



Figura 6. Recolección de información utilizando unidades VOCE.

Cada una de estas unidades recolectó información sobre el número de veces que el vehículo fue encendido, lo cual permitió conocer la actividad y uso de cada uno de los vehículos en los que se conectó el equipo. Es importante saber cada cuanto se enciende el vehículo ya que esto permitirá conocer el número de veces que el motor parte en frío y en caliente, lo cual es importante en términos de emisiones.

4.2 Estimación del Inventario de Emisiones

Una vez se realizó la campaña de medición se llevo a cabo el procesamiento de la información recolectada en campo. Secundariamente se recolectó información adicional necesaria como el número total de vehículos de cada categoría, los kilómetros recorridos al día, la distribución tecnológica de las categorías de buses, motos y camiones y características meteorológicas de la ciudad como la temperatura y la humedad. Para esta labor se consultaron diferentes bases de datos disponibles en la ciudad, dos de la más importantes fueron la base de datos de los vehículos matriculados hasta Julio del 2004 en

Bogotá de la Secretaría de Tránsito de Bogotá (STT) y la base de datos de los certificados de emisión de gases emitidos en el 2004 por los centros de diagnóstico autorizados por el DAMA, CDRs. El Anexo A cuenta con el resultado de la consulta de estas bases de datos.

Luego de contar con la información necesaria, esta se ingresó al modelo y se estimaron las emisiones provenientes de las diferentes categorías vehiculares.

La estimación del inventario de emisiones además de generar información sobre la cantidad de contaminantes emitidos por las diferentes categorías vehiculares permitió realizar la identificación de variables relevantes y de esta manera seleccionar escenarios de posibles estrategias enfocadas hacia la reducción de los niveles de emisión de contaminantes en la ciudad.

4.3 Selección y Descripción de los Escenarios Evaluados

Durante esta parte del proyecto, se utilizó el modelo IVE como herramienta de evaluación y se estudiaron diferentes escenarios con el fin de realizar un análisis de sensibilidad de las variables más importantes en la determinación del inventario de emisiones de fuentes móviles en Bogotá. Del mismo modo, el estudio de escenarios nos permitió evaluar la eficiencia de algunas medidas que afectarían las características de la flota vehicular de la ciudad.

Los escenarios fueron planteados con base en las necesidades que presenta actualmente la ciudad y en la posibilidad de encontrar estrategias que pueden llegar a ser medidas eficientes para la reducción de los niveles de emisiones vehiculares.

La Figura 7 es una representación esquemática que resume los 10 escenarios evaluados durante este trabajo. Estos escenarios evaluaron los efectos en el inventario de emisiones debido al cambio en los combustibles utilizados por diferentes vehículos, a la modificación de las características de las categorías vehiculares y a la renovación de la flota vehicular entre otros.

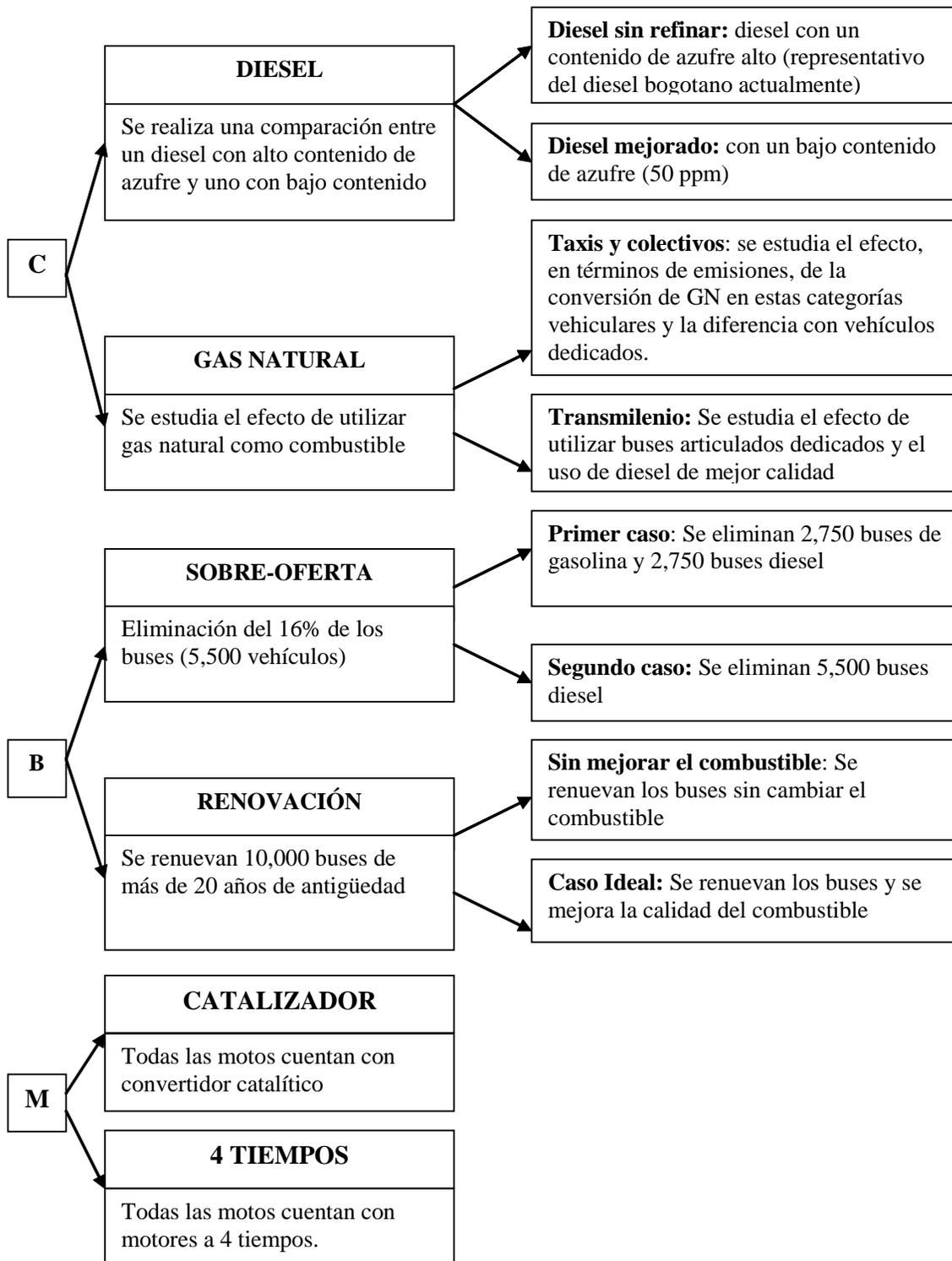


Figura 7. Resumen de los escenarios analizados.

C= escenarios involucrando la calidad de los combustibles; B= escenarios involucrando la categoría vehicular de los buses; M= escenarios involucrando la categoría vehicular de las motos.

5. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante este proyecto, en primer lugar se presentan los resultados para cada una de las actividades realizadas en campo, en segundo lugar los resultados de la estimación del inventario de emisiones y por último los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios analizados.

5.1 Distribución Tecnológica de Vehículos de Pasajeros

Durante la campaña de campo se recolectó información válida para 1,044 VP y 68 taxis. La Tabla 2 presenta un resumen de esta información. Dentro de los resultados obtenidos, a partir de la base de datos dinámica construida en este estudio, se encontró que alrededor del 53% de los VP en la ciudad cuentan con convertidor catalítico.

La Tabla 2 muestra que el combustible más utilizado en Bogotá sigue siendo la gasolina tanto para VP como para taxis, sin embargo para estos últimos se ve una tendencia reciente hacia la utilización de motores duales (convertidos) de gas natural y gasolina.

Tabla 2. Distribución tecnológica de vehículos de pasajeros

| Categoría | Tipo de combustible* | Sistema de aire acondicionado | Tipo de Transmisión | Convertidor Catalítico (CC) |
|------------------------|----------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Vehículos Particulares | 98% Gasolina | 44% con A/C | 90% Mecánicos | 47% sin CC |
| | 1% Diesel | 56% sin A/C | 9% Automáticos | 53% con CC |
| Taxis | 81% Gasolina | 19% con A/C | 100% Mecánicos | 28% sin CC |
| | 15% Gas Natural** | 80% sin A/C | 0% Automáticos | 72% con CC |

* Vehículos de pasajeros: 0.3% gas natural y gasolina (motores duales). Taxis: 5.9% diesel. **Se refiere a vehículos con motores duales de gasolina y gas natural. Son vehículos que han sido fabricados para operar con gasolina y luego son convertidos a motores duales. Nota: resultados obtenidos a partir de una base de datos dinámica construida a partir de encuestas en diferentes parqueaderos de la ciudad.

Dentro de la información recolectada se encuentra la presencia/ausencia de aire acondicionado. Aunque en términos de emisiones este es un parámetro relativamente importante, en Bogotá no es tan relevante debido a que típicamente no se presentan temperaturas altas que motiven el uso de estos sistemas.

De la información recolectada se estimó que aproximadamente el 50% de los VP que circulan por la ciudad son de años modelo mayores a 1998. Los años que registran la mayor cantidad de VP son en orden de mayor a menor 1998, 1997 y 2001 (ver Figura 8)

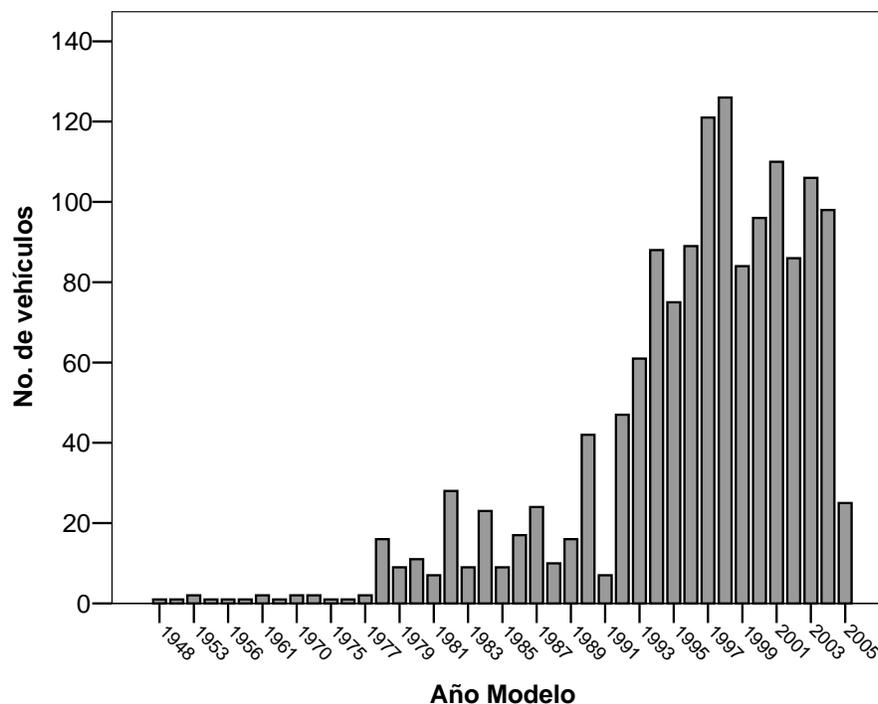


Figura 8. Distribución de vehículos de pasajeros por año modelo.

Comparando los resultados obtenidos para Bogotá y otras ciudades, se presentó una similitud en la distribución tecnológica de los vehículos de pasajeros (particulares y taxis) entre Bogotá y Lima, en donde se presentan fracciones similares de vehículos sin catalizador y con catalizador de 3 vías como se muestra en la Tabla 3.

La edad media de los VP en Bogotá se estimó en 9 años. Este es un valor alto comparado con otras ciudades Latino-Americanas como Santiago de Chile, Sao Paulo y Ciudad de México donde se encuentra alrededor de los 6 años (Lents et al., 2004). De nuevo se

presenta una similitud con la situación en Lima, donde la edad media de la flota vehicular es de 11 años.

En el caso de los taxis, la edad media estimada en Bogotá fue de 5 años. Este resultado coincide con un estudio realizado anteriormente en la ciudad en el cual se determinó que la edad de esta categoría vehicular pasó de 8 años en el 2002 a 6 años en el 2004 (Ibáñez, 2004).

Tabla 3. Comparación de la distribución tecnológica de vehículos de pasajeros en Bogotá con otras ciudades del mundo.

| Ciudad | Control de Aire/Combustible | | Catalizador | | |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------|------------|------------|
| | Carburador | Inyección Electrónica | Sin | 2 vías | 3 vías |
| Almaty, Kazakhstan | 45% | 51% | 89% | 0% | 7% |
| Lima, Peru | 44% | 56% | 53% | 6% | 40% |
| Los Angeles, USA | 6% | 94% | 1% | 3% | 96% |
| Ciudad de México, México | 18% | 82% | 20% | 0% | 80% |
| Nairobi, Kenya | 60% | 32% | 100% | 0% | 0% |
| Pune, India | 42% | 32% | 29% | 35% | 11% |
| Santiago, Chile | 17% | 80% | 17% | 3% | 77% |
| Sao Paulo, Brasil | 17% | 83% | 19% | 0% | 81% |
| Bogotá, Colombia | 36% | 64% | 46% | 3%* | 50% |

Fuente: Lents, 2004. Estudio de la actividad vehicular en Sao Paulo.

* Este número se obtuvo al hacer una clasificación de los vehículos que estaban equipados con convertidor catalítico pero que no contaban con inyección electrónica.

5.2 Factor de Actividad para Vehículos de Pasajeros

A la fecha no hay información oficial acerca del kilometraje típico recorrido por los vehículos que hacen parte de la flota bogotana, información fundamental en el cálculo de emisiones (ver Ecuación 1).

Las encuestas realizadas en los diferentes parqueaderos permitieron recolectar información de kilometraje para 540 vehículos, la Figura 9 ilustra la información correspondiente al kilometraje promedio para vehículos de un mismo año modelo. Según nuestros resultados el kilometraje recorrido por un vehículo es de aproximadamente 17,000 km en el primer año de uso con una tasa de reducción anual de alrededor del 2%

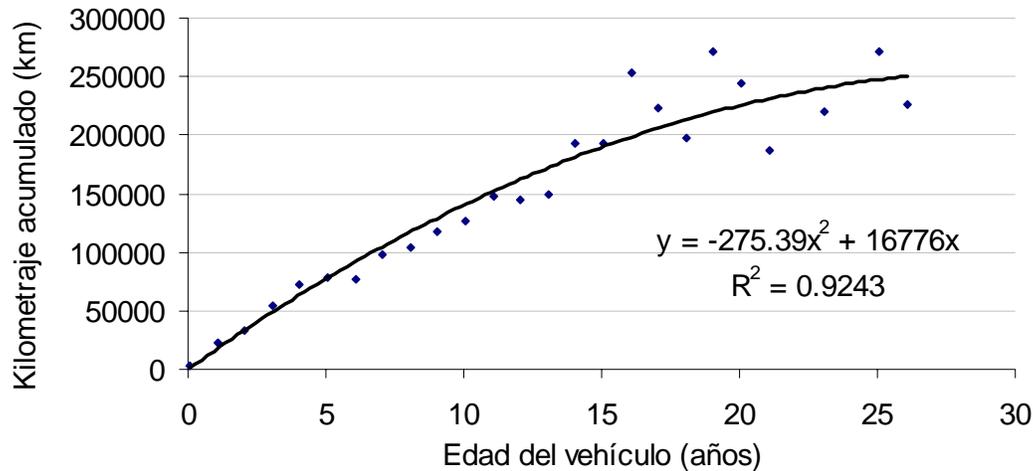


Figura 9. Actividad de vehículos particulares en los primeros 25 años de uso

En algunos estudios de movilidad en la ciudad, la Secretaría de Tránsito de Bogotá (STT), utiliza valores entre 15,000 y 18,000 kilómetros al año para vehículos de pasajeros. Otros estudios realizados en la Universidad de Los Andes, reportan tasas de actividad de 18,000 km para el primer año con una tasa de reducción anual de 2.8% (Behrentz, 2004). Los resultados obtenidos en otras ciudades donde se ha implementado el modelo IVE presentan tendencias similares a las obtenidos en Bogotá.

Para la categoría taxis se estimó un factor de actividad de 58,000 km por año con una tasa de reducción anual de 4.1%.

5.3 Aforos Vehiculares Utilizando Cámaras de Video

Se recolectó información para 800 minutos (13.3 horas) de filmación durante seis días hábiles en diferentes zonas de la ciudad. La información se analizó para toda la ciudad, para los diferentes sectores socio-económicos estudiados (alto ingreso, medio-bajo

ingreso y comercial) y adicionalmente se realizó una comparación de los resultados obtenidos en Bogotá con los resultados para otras ciudades.

5.3.1 Ocupación Relativa de las Vías en Bogotá

Los aforos vehiculares en las vías mencionadas anteriormente (sección 4.1.1), permitieron estimar la participación relativa de las diferentes categorías vehiculares en la ciudad. En las figuras 10 y 11, se presenta el comportamiento, en términos de ocupación relativa y número de vehículos en las vías, de las diferentes categorías vehiculares para cada hora entre las 6:00 y las 21:00 horas.

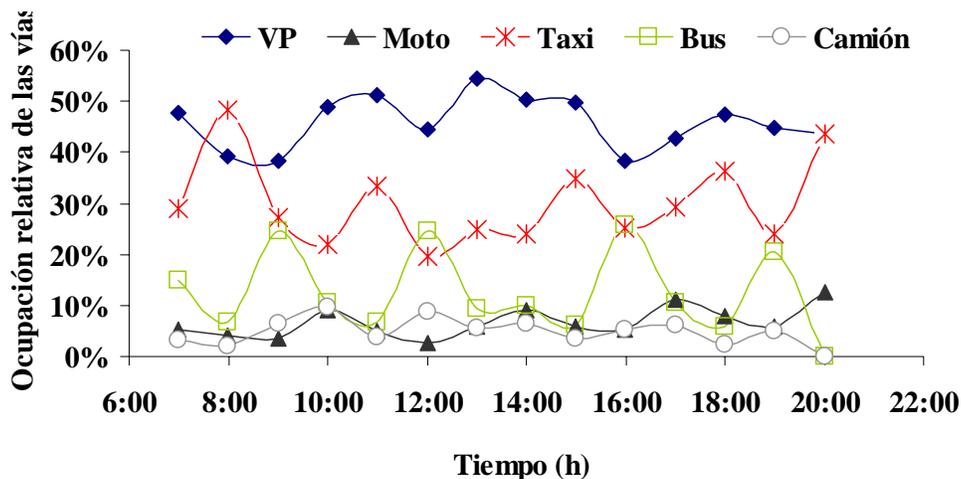


Figura 10. Porcentaje de ocupación de las vías de las diferentes categorías vehiculares

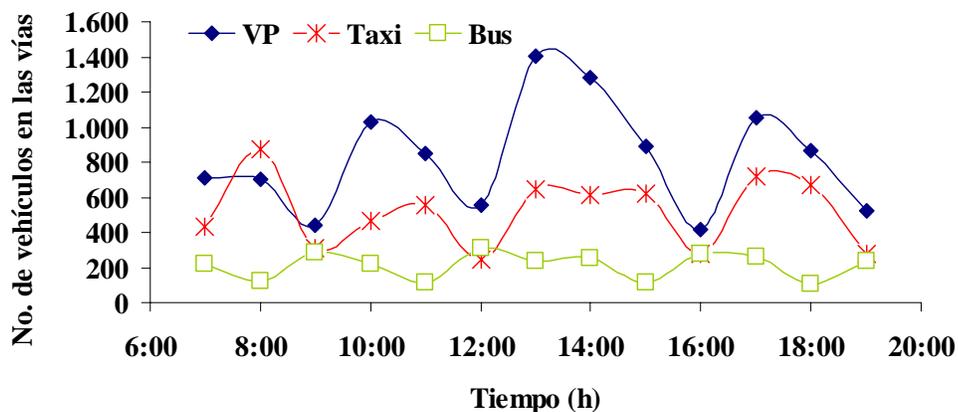


Figura 11. Aforos de las principales categorías vehiculares en diferentes sectores de la ciudad.

Es claro que la categoría vehicular que se encuentra en un mayor porcentaje en la ciudad es la de VP lo cual concuerda con la información disponible en el registro oficial de vehículos de la ciudad, en donde esta categoría representa alrededor del 85% del total de vehículos.

Los taxis representan una participación importante de ocupación en las vías. Como se puede observar en la Figura 10, estos vehículos representan desde un 20% hasta un 50% de los vehículos en las calles en las diferentes horas del día. Este es un resultado interesante si se tiene en cuenta que para esta categoría tan solo se encuentran registrados 50,000 vehículos, lo que corresponde a alrededor del 5% del total de la flota de la ciudad (el número total de vehículos en la ciudad es de aproximadamente 950,000 vehículos).

Las horas en las que se registró un mayor número de vehículos para la categoría de VP como se muestra en la Figura 11, fueron las 8:00, las 10:00, entre las 13:00 y las 14:00, y las 17:00 horas. Son resultados coherentes con las actividades típicas de la población en un día laboral. El pico de las 10:00 horas se puede explicar debido al efecto de la medida de restricción vehicular en la ciudad que no permite la circulación de ciertos vehículos entre las 6:00 y las 9:00.

5.3.2 Ocupación Relativa de las Vías en Bogotá Dependiendo del Sector Socio-Económico

Otra variable importante para la determinación del inventario de emisiones, es el sector socio-económico. La Figura 12 resume los resultados obtenidos para los tres tipos de sectores analizados en horas de la mañana y en horas de la tarde.

Los resultados obtenidos demuestran que los vehículos de mayor participación en los tres sectores socio-económicos analizados son los vehículos de pasajeros (particulares y taxis). Los buses y camiones presentan una mayor participación en sectores de medio-bajo ingreso y comercial, que en sectores de alto ingreso. Los resultados presentados en la Figura 12 también muestran que no se presentan diferencias significativas entre las

horas de la mañana y las de la tarde para todas las categorías analizadas a excepción de la categoría motos. En horas de la tarde en los tres sectores analizados, se presentan porcentajes mayores de motos. Este resultado puede ser debido a la tendencia que existe en diversas entidades a recolectar la correspondencia en horas de la tarde.

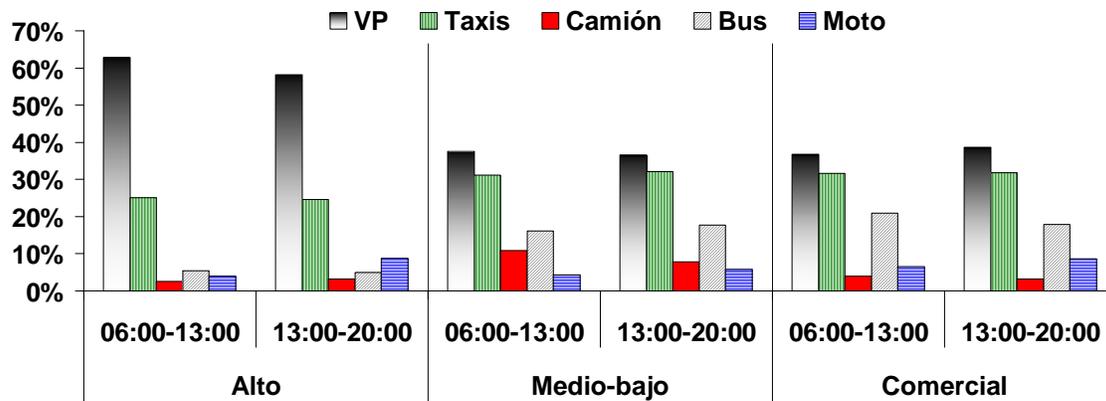


Figura 12. Distribución de la flota vehicular en diferentes sectores socio-económicos de la ciudad en horas de la mañana y de la tarde

5.3.3 Comparación de los Resultados Bogotanos con Otras Ciudades

Se realizó una comparación de los resultados obtenidos en Bogotá con otras ciudades donde se ha realizado el proyecto IVE. La Tabla 4 presenta información correspondiente a 8 ciudades incluida Bogotá.

Dentro de las ciudades estudiadas por el proyecto IVE, Bogotá presenta el mayor número de taxis en las vías. En este punto es importante aclarar que la información recolectada durante la campaña de medición se refiere a información dinámica, lo que está teniendo en cuenta no sólo el número de vehículos sino el factor de actividad. Por esta razón el valor registrado para el porcentaje de taxis en las vías está representando que esta categoría de vehículos tiene un factor de actividad bastante alto comparado con otras categorías. Para entender mejor este concepto de flota dinámica se utilizó la información del total de vehículos registrados hasta Julio del 2004 en la base de datos de la STT y consultando la opinión de expertos en el tema de Transportes, se obtuvieron valores de

kilometraje recorrido al día por cada una de las categorías. Los resultados de esta consulta se presentan en el Anexo C.

Tabla 4. Comparación del porcentaje de las categorías vehiculares en diferentes ciudades.

| Ciudad | VP | Moto | Taxis | Bus | Camión | No- Motorizado |
|-------------------------|------------|-----------|------------|------------|-----------|-------------------|
| Almaty, Kazakhstan | 83% | 0% | 0% | 12% | 5% | 1% |
| Lima, Peru | 52% | 1% | 3% | 18% | 6% | 0% |
| Los Angeles, USA | 95% | 0% | 0% | 1% | 4% | 0% |
| México City, México | 74% | 2% | 15% | 3% | 5% | 0% |
| Nairobi, Kenya | 88% | 2% | 1% | 4% | 5% | 1% |
| Pune, India | 12% | 55% | 0% | 1% | 1% | 17% |
| Santiago, Chile | 79% | 1% | 8% | 6% | 6% | 0% |
| Sao Paulo, Brasil | 75% | 10% | 5% | 5% | 5% | 0% |
| Bogotá, Colombia | 46% | 6% | 29% | 13% | 6% | 0% |

Fuente: Lents, 2004. Estudio de la actividad vehicular en Sao Paulo

No-motorizados: medios de transporte que no cuentan con motor (vg., bicicletas, patinetas, caballos). VP = vehículo particular.

El número de taxis observados en las vías de Bogotá es un valor muy superior al de las otras ciudades donde se ha realizado el estudio IVE. Sin embargo, es necesario considerar que no todas las ciudades cuentan con un sistema de transporte público individual tan organizado como en Bogotá, en donde la identificación de los taxis es sencilla dado su color y letrero representativo. En otras ciudades el más difícil proceso de identificación puede haber causado errores durante los aforos de los vehículos.

Por otro lado, el elevado número de taxis en la ciudad, podría estar explicado por resultados de estudios previos (Ibáñez, 2004), en donde se determinó que en Bogotá existe una sobre-oferta de taxis (entre 45% y 55%). El valor recomendado a nivel mundial es de 3 taxis por cada 1,000 habitantes, mientras en Bogotá este número es de 5.2 taxis por cada 1,000 habitantes (Ibáñez, 2004).

5.4 Patrones de Conducción

Los patrones de conducción recolectados utilizando equipos GPS y siguiendo la metodología mencionada con anterioridad fueron clasificados teniendo en cuenta la potencia del motor en cada momento del recorrido y el tipo de “estrés” al cual estaba sometido el vehículo. En el modelo IVE se presentan 60 categorías que representan 20 diferentes estados de potencia en el vehículo y 3 diferentes estados de “estrés”. Potencias negativas como ir bajando por una pendiente, reducir la velocidad o una combinación de estas corresponden a las categorías del número 1 al 11. Situaciones de cero o muy bajos niveles de potencia como esperar en un semáforo, corresponden a la categoría 12 y las categorías del 13 al 20 representan situaciones de potencia positiva como manejar a velocidad constante, acelerar, ir subiendo una pendiente o alguna combinación de estas.

La combinación de estos 20 diferentes estados de potencia con los tres estados de “estrés” a los cuales puede estar sometido el vehículo conforman un total de 60 categorías en las que se puede clasificar la información recolectada con GPS. Los tres estados de “estrés” se denominan “bajo”, “medio” y “alto”. Un estado de estrés “bajo”, representa condiciones en las cuales el vehículo luego de los último 20 segundos de operación tiene valores de velocidad y aceleración bajos al igual que la revolución del motor. El estado de estrés alto ocurre a velocidades y aceleraciones altas luego de los más recientes 20 segundos y la revolución del motor es alta. El Anexo B cuenta con información detallada sobre esta clasificación para cada una de las categorías vehiculares evaluada.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada una de las categorías analizadas en este estudio.

5.4.1 *Patrones de Conducción de Vehículos Particulares*

La información recolectada para VP demuestra la importancia del tipo de vía en los patrones de conducción. En la Figura 13 se presenta un ejemplo del comportamiento de la velocidad en función del tiempo en tres tipos de vías diferentes. Estos datos corresponden

a un recorrido de treinta minutos (7:00 am a 7:30 am) realizado durante tres días. Cada día se recorrió un tipo de vía diferente a la misma hora del día anterior.

Las velocidades promedio durante este periodo para los tres tipos de vía fueron: 44 kph, 20 kph y 22 kph respectivamente para vía rápida, arterial y residencial.

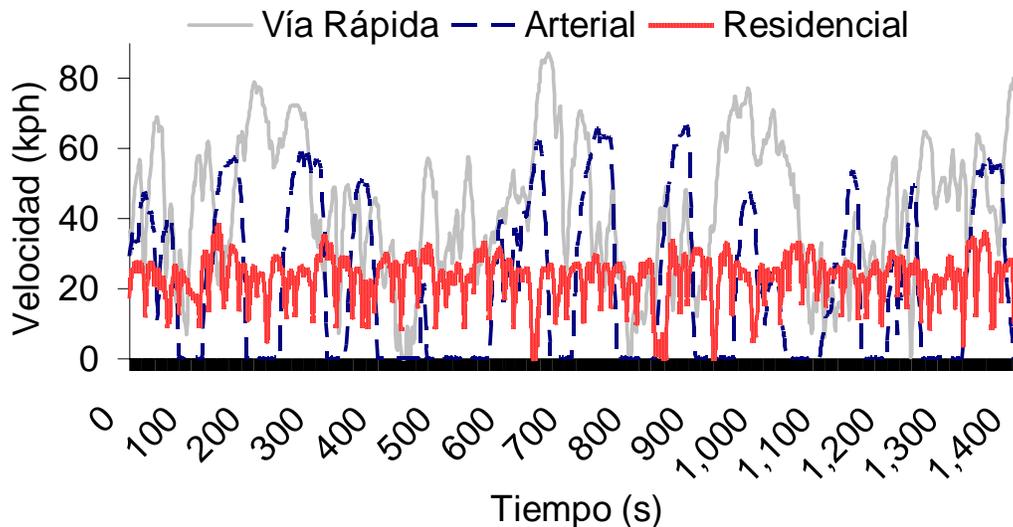


Figura 13. Comparación de los patrones de conducción para tres tipos de vías en un sector de nivel socio-económico alto.

Aunque las velocidades promedio en la vía arterial y la residencial son similares, en la Figura se puede observar que el patrón de conducción es diferente, ya que mientras en la residencial no se presentan tantos cambios dramáticos de velocidad ni numerosos momentos de detención, en la arterial estas situaciones son las que más se presentan. Estos cambios constantes de aceleración y detención están relacionados con la presencia de cruces y semáforos en las vías de tipo arterial.

La Tabla 5 presenta las velocidades promedio para diferentes segmentos horarios en cada una de las vías recorridas. Las velocidades promedio para cada hora independientemente del tipo de vía y de sector son un parámetro importante en el momento de determinar las horas de mayor congestión en la ciudad.

Como era de esperarse las vías en las cuales la velocidad promedio es mayor son las vías rápidas. Las vías arteriales y residenciales presentan promedios de velocidad similares lo que coincide con lo presentado en el ejemplo analizado anteriormente.

Tabla 5. Velocidades promedio durante el día para VP en tres tipos de vías.

| Hora | Vía rápida (kph) | Arterial (kph) | Residencial (kph) |
|-------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 5:30-7:30 | 41 | 26 | 19 |
| 7:30-9:30 | 41 | 26 | 19 |
| 9:30-11:30 | 34 | 25 | 18 |
| 11:30-13:30 | 34 | 16 | 22 |
| 13:30-15:30 | 37 | 22 | 23 |
| 15:30-17:30 | 32 | 23 | 22 |
| 17:30-19:30 | 37 | 21 | 19 |
| 19:30-21:00 | 30 | 19 | 20 |

Aunque conocer la velocidad promedio es un aspecto importante al momento de determinar el factor de emisión, este parámetro no es un buen indicador de la demanda de potencia en el vehículo. Acelerar el vehículo consume energía considerablemente en un proceso en el que se pueden presentar niveles elevados de emisiones de distintas especies contaminantes. Los niveles de aceleración no se pueden determinar a partir de la velocidad promedio. Por esta razón, los cálculos fueron basados en una clasificación de la información en la que se presentan, como se mencionó con anterioridad, 60 categorías que representan diferentes condiciones de estrés y demanda de potencia del vehículo.

Con la clasificación de la información en las 60 categorías (ver Anexo B), se estimó que el número de veces que un vehículo está detenido o en velocidades casi nulas, es más alto en las vías arteriales que en las vías rápidas. No se observaron situaciones de alto estrés y alta demanda de potencia (aceleraciones fuertes luego de detenciones en calles poco congestionadas) en ninguna de las tres vías. Adicionalmente se estimó que la mayoría del tiempo los VP se encuentran detenidos o con velocidades cercanas a cero así como en situaciones de potencia positiva como manejar a velocidad constante, transitar por caminos con pendientes positivas o alguna combinación de estas. Esta situación no es la ideal en términos de emisiones de contaminantes, ya que las situaciones de potencia positiva generan una demanda de energía significativa que involucra un mayor consumo de combustible generando un mayor número de emisiones. Sin embargo debido a que Bogotá se encuentra ubicada en una meseta, las pendientes en las calles no son tan importantes. Adicionalmente al no presentarse situaciones de aceleraciones fuertes luego

de detenciones se están evitando las peores situaciones en términos de generación de emisiones contaminantes.

Es importante recordar que las mediciones se realizaron en Enero, el cual no es un mes representativo de todo el año, pues es una temporada donde muchas personas están en su periodo de vacaciones.

5.4.2 Patrones de Conducción de Motos, Taxis, Buses y Camiones

Los vehículos evaluados en este punto, fueron dotados con unidades GPS durante seis días en los cuales recorrieron las calles de la ciudad como lo hacen normalmente. Al igual que en el caso de vehículos particulares se realizó la clasificación de la información en las 60 categorías de estrés y potencia, estos resultados se presentan en el Anexo B.

La Tabla 6 presenta un resumen de las velocidades promedio para cada una de las categorías evaluadas. Estos datos corresponden a mediciones en diferentes tipos de vías de tal manera que representan condiciones reales de operación.

Tabla 6. Velocidades promedio durante el día para cuatro categorías vehiculares.

| Hora | Motos (kph) | Taxis (kph) | Buses (kph) | Camiones (kph) |
|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|
| 05:30 | 25 | 25 | 33 | 12 |
| 07:30 | 25 | 21 | 22 | 7 |
| 09:30 | 30 | 21 | 20 | 12 |
| 11:30 | 23 | 21 | 21 | 9 |
| 13:30 | 28 | 20 | 23 | 11 |
| 15:30 | 16 | 17 | 22 | 13 |
| 17:30 | 21 | 24 | 25 | 13 |
| 19:30 | 18 | 22 | 24 | 13 |

[C9]

Son evidentes las bajas velocidades de los camiones con respecto al resto de categorías. Sin embargo, debido a que se evaluaron sólo dos camiones durante la campaña de medición, es posible que el patrón de conducción de estos vehículos no sea representativo de todos los camiones en la ciudad debido a las diversas actividades en las que puede estar involucrado el servicio de este tipo de vehículo.

Los buses son la categoría vehicular que alcanza la velocidad más alta en horas de la madrugada en donde al igual que los taxis y los camiones presentan el mayor valor de velocidad del día. Este resultado es favorable en términos de calidad del aire debido a que en Bogotá se presenta un fenómeno de inversión térmica en hora de la noche y la madrugada que genera una acumulación de los contaminantes emitidos. Debido a que a velocidades bajas se generan mayores emisiones de contaminantes, es favorable que en horas de la mañana los vehículos transiten a mayores velocidades ya que cuando el sol empieza a calentar la superficie se logra el rompimiento de la inversión térmica y no se produce una acumulación de los contaminantes.

Sin embargo, al igual que en el caso de los camiones, existen varias clases de buses (Transmilenio, colectivos, busetas, ejecutivos, alimentadores) que presentan patrones de conducción totalmente diferentes entre sí, por lo que no se recomienda tomar los valores de velocidad presentados en la Tabla 6 como representativos de todas las clases de buses, ya que las mediciones se hicieron sólo en seis días y aunque se recolectó información de aproximadamente 50 buses estos no eran representativos de todas las categorías vehiculares y la información presentada en la Tabla 6 no esta discriminada por categoría.

5.5 Patrones de Encendido de los Vehículos de Pasajeros

Se recolectó información válida para 58 VP (de un total de 82 unidades) durante 7 días para cada vehículo, sumando un total de aproximadamente 314 días de información. Se estimó que el número de veces por día en promedio que se enciende un vehículo para la muestra analizada es de 5 veces. Este valor es bajo con respecto a los valores encontrados para otras ciudades que varían entre 6 y 8.

La Tabla 7 y la Figura 14 presentan un resumen de los resultados obtenidos. Se estimó que las horas en la que las personas encienden una mayor cantidad de veces sus vehículos son entre las 12:00 y las 14:00. La mayor fracción de encendidas en frío (después de 6 horas de detención) se encuentra en las horas de la mañana como era de esperarse (4:00 a 10:00) y también son importantes durante el periodo entre las 16:00 y

las 20:00 horas. Estos resultados eran esperados debido a que la mayoría de personas dejan su vehículo quieto durante toda la noche y lo encienden por la mañana (4:00 a 10:00). De igual forma los vehículos cuando llegan por la mañana a su destino permanecen apagados durante todo el día hasta que es hora de volver al lugar de origen. Los resultados de mayor cantidad de encendidas entre las 16:00 y las 20:00 horas no tienen una razón tan clara pero podrían explicarse debido a que en muchas ocasiones las personas salen de su sitio de trabajo o estudio y no se dirigen directamente a su hogar haciendo que el número de encendidas aumente.

En la Tabla 7 se puede observar también que el número de veces que se enciende el vehículo luego de una detención menor a 15 minutos representa alrededor del 27% del total de la muestra, seguido por las encendidas luego de 1 y 2 horas de detención. Estos resultados podrían estar representando situaciones como sacar el vehículo del garaje y apagarlo mientras se cierra la puerta, o el hecho de tener que apagar el vehículo para poder ser requisado a la entrada de un parqueadero, hasta situaciones en las que las personas debido a la congestión en las vías apagan sus vehículos mientras vuelve el tráfico a la normalidad. Agrupando las encendidas en frío después de una detención de más de 6 horas, sumarían el 28% del total del número de encendidas de toda la muestra.

Tabla 7. Patrones de encendido de los vehículos particulares en la ciudad

| Hora del día | Tiempo detenido | | | | | | | | | | Total |
|--------------|-----------------|--------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|-------|
| | 15 min | 30 min | 1 hr | 2 hr | 3 hr | 4 hr | 6 hr | 8 hr | 12 hr | +18 hr | |
| 24:00-01:59 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 1% |
| 02:00-03:59 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 1% |
| 04:00-05:59 | 1% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 1% | 1% | 4% |
| 06:00-7:59 | 2% | 1% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 2% | 3% | 8% |
| 08:00-09:59 | 3% | 1% | 0% | 1% | 0% | 0% | 0% | 0% | 1% | 3% | 10% |
| 10:00-11:59 | 4% | 2% | 2% | 2% | 1% | 0% | 0% | 0% | 0% | 1% | 12% |
| 12:00-13:59 | 5% | 2% | 3% | 2% | 0% | 1% | 1% | 0% | 0% | 2% | 15% |
| 14:00-15:59 | 4% | 1% | 2% | 2% | 1% | 0% | 1% | 1% | 1% | 1% | 13% |
| 16:00-17:59 | 3% | 2% | 2% | 1% | 1% | 1% | 1% | 0% | 1% | 1% | 12% |
| 18:00-19:59 | 4% | 1% | 2% | 1% | 1% | 1% | 1% | 0% | 1% | 1% | 14% |
| 20:00-21:59 | 2% | 1% | 1% | 1% | 1% | 0% | 1% | 0% | 0% | 0% | 7% |
| 22:00-23:59 | 1% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 3% |
| Total | 27% | 11% | 12% | 11% | 6% | 4% | 5% | 2% | 8% | 13% | 100% |

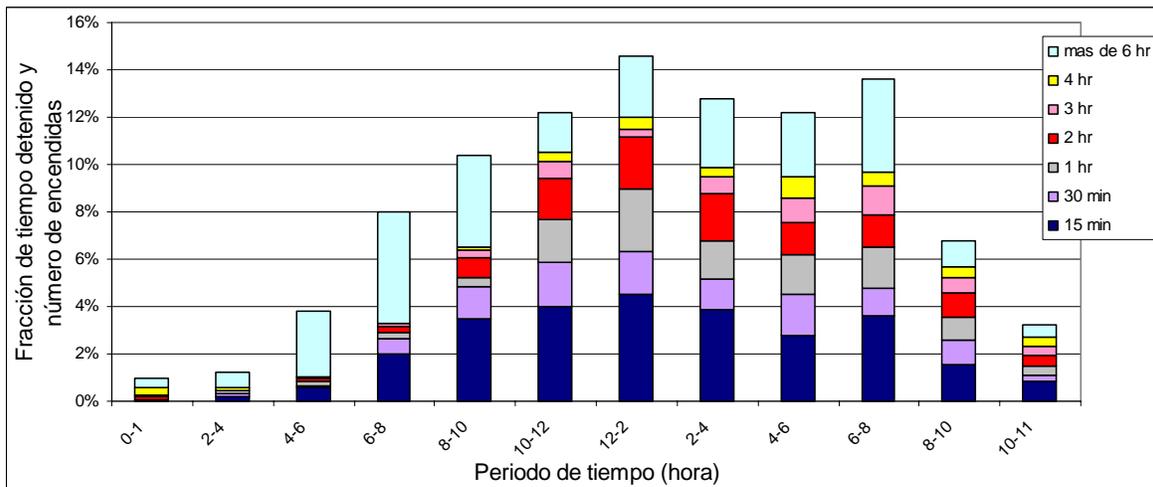


Figura 14. Patrón de encendido de vehículos particulares en Bogotá.

5.6 Resultados del Inventario de Emisiones de Fuentes Móviles para Bogotá Según el Modelo IVE

El inventario desarrollado durante este estudio contiene información sobre diferentes contaminantes y sobre el aporte de cada categoría vehicular (VP, Taxi, Moto, Bus y Camión) a las emisiones totales en la ciudad. La Tabla 8 resume los resultados obtenidos para los contaminantes considerados en este proyecto, y la Figura 15 presenta el aporte de las diferentes categorías vehiculares a las emisiones totales. En el Anexo D se encuentra información sobre las emisiones en frío y en caliente de los diferentes contaminantes.

Tabla 8. Emisiones totales de diversos contaminantes provenientes de fuentes móviles en la ciudad de Bogotá.

| | km d ⁻¹ | CO | COV | NO _x | SO _x | PM ₁₀ | B | A | F | CO ₂ | Be | N ₂ O | CH ₄ | NH ₃ |
|--------------|--------------------|--------------|------------|-----------------|-----------------|------------------|------------|------------|----------|-----------------|----------|------------------|-----------------|-----------------|
| VP | 20,000,000 | 1,000 | 70 | 40 | 1 | 0.20 | 0.1 | 0.2 | 0 | 5,600 | 3 | 0.2 | 15 | 1 |
| Motos | 2,300,000 | 90 | 45 | 0 | 0 | 1 | 0.1 | 0.7 | 3 | 65 | 1 | 0.0 | 10 | 0 |
| Taxi | 13,000,000 | 270 | 25 | 20 | 1 | 0.3 | 0.05 | 0.1 | 0 | 3,500 | 1 | 0.1 | 8 | 1 |
| Bus | 4,000,000 | 700 | 35 | 60 | 3 | 3 | 0.1 | 0.3 | 1 | 3,200 | 1 | 0.0 | 5 | 0 |
| Camión | 1,400,000 | 500 | 30 | 30 | 1 | 1 | 0.1 | 0.2 | 1 | 1,650 | 1 | 0.0 | 5 | 0 |
| Total | 40,000,000 | 2,500 | 200 | 150 | 7 | 6 | 0.5 | 1.5 | 5 | 14,000 | 7 | 0.3 | 42 | 3 |

Las unidades utilizadas son Ton día⁻¹. VP= vehículos particulares; B = butadieno; A = acetaldehído; F = formaldehído; Be= Benceno; Nota= totales pueden no coincidir por causa de la reducción de cifras significativas.

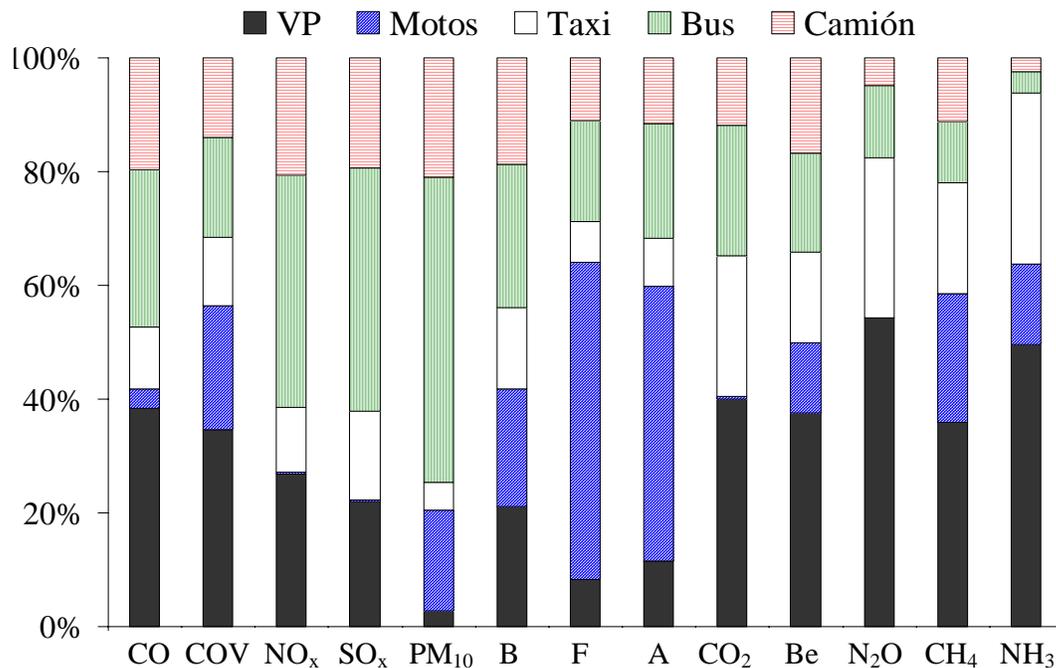


Figura 15. Aporte de las principales categorías vehiculares a las emisiones.
VP= vehículos particulares; B = butadieno; A = acetaldehído; F = formaldehído; Be = benceno.

La categoría de VP tiene una participación importante en las emisiones de contaminantes tales como CO, CO₂, NO_x, SO_x y COV. El aporte de esta categoría al inventario total de emisiones de la flota vehicular Bogotana fue de alrededor del 40% para CO, 40% para CO₂, 35% para COV, 30% para NO_x y 20% para SO_x. Estos resultados eran esperados al considerar que esta categoría representa alrededor del 85% de los vehículos en la ciudad y que el combustible de mayor uso para estos vehículos es la gasolina.

La categoría vehicular que presentó los resultados más críticos, con respecto a su aporte a las emisiones totales en la ciudad, fue la de los buses. Esta categoría es responsable de un alto porcentaje de la mayoría de contaminantes: alrededor de 30% de las emisiones de CO, 40% de las emisiones de NO_x, 40% de las emisiones de SO_x, 50% de las emisiones PM₁₀ y 20% de las emisiones de CO₂. Estos aportes son aún más importantes si se tiene en cuenta que los buses representan menos del 5% de la flota vehicular en la ciudad.

La gran participación de esta categoría en las emisiones de CO (30%) es el reflejo de la presencia de un número importante de buses que utilizan gasolina como combustible. Es

común en muchos países que la mayoría de vehículos en esta categoría utilice diesel como combustible (Sawyer et al., 2000; Gertler, 2005).

Es de vital importancia reconocer la participación que los buses tienen en las emisiones totales de PM_{10} en la ciudad, representando la mitad del total de emisiones. El PM_{10} es ampliamente reconocido como uno de los contaminantes más importantes en términos de salud pública (Neuberger et al., 2004; Kan et al., 2004).

Sin embargo, es fundamental aclarar que el problema real está relacionado con la calidad de los combustibles diesel disponibles en la ciudad. El diesel bogotano cuenta con un contenido de azufre de 1500 ppm, que aún siendo el contenido de azufre más bajo del país (en el resto del territorio nacional es de 4500 ppm) es un contenido demasiado alto comparado con otras ciudades como Santiago de Chile, en donde el diesel contiene tan solo 50 ppm de azufre. Estudios reportados en la literatura científica (v.g Durbin et al., 2003; Saiyasetpanich et al., 2005) han encontrado una relación directa entre el contenido de azufre en el diesel y las emisiones de PM_{10} , lo que demuestra la importancia de mejorar la calidad del diesel en Bogotá y el resto del país.

Otro resultado interesante se presenta en el caso de la categoría de las motos, las cuales de acuerdo a nuestros resultados, son responsables de alrededor del 18% de las emisiones de PM_{10} y 20% de las emisiones de COV. Esta categoría vehicular no está sujeta actualmente a ninguna reglamentación en el país en relación con sus emisiones de agentes contaminantes, a pesar de que los aportes al inventario de emisiones para contaminantes como el material particulado son similares a aquellos relacionados con la categoría de los camiones. De esta manera, los factores más relevantes para el inventario de emisiones en la ciudad están relacionados con la calidad de los combustibles y el gran número de motos con motores de dos tiempos y sin sistemas de control de emisiones.

5.7 Inventario de Emisiones de Fuentes Móviles para Bogotá Bajo Diferentes Escenarios

Como se mencionó anteriormente, el modelo IVE fue utilizado como herramienta de cálculo, no solo para la determinación del inventario actual de emisiones sino para un ejercicio de análisis de sensibilidad de los factores que intervienen en este inventario. El

objetivo de este ejercicio fue el de evaluar posibles estrategias encaminadas a una reducción de las emisiones en la ciudad. En la Figura 7 se presenta un esquema donde se resumen los escenarios evaluados en esta sección.

5.7.1 Escenarios Mejorando la Calidad del Diesel

Los combustibles más utilizados en Bogotá son la gasolina y el diesel. Como se mencionó anteriormente, en el caso de vehículos de pasajeros más del 90 % de los vehículos tienen motores que operan con gasolina. Para vehículos de carga, refiriéndose a las categorías vehiculares de buses y camiones, se presenta una distribución más uniforme de vehículos operando con gasolina y con diesel. De estos vehículos, aproximadamente 45% son de gasolina y 55% de diesel [C11] (buses matriculados en Bogotá STT, 2004; camiones registrados en la base de datos de los centros de diagnóstico autorizados por el DAMA, 2004). Es importante mencionar que en los últimos años, debido a una serie de incentivos establecidos por las autoridades de tránsito y transporte, se ha presentado una tendencia a la conversión de vehículos pesados de gasolina para que operen con combustible diesel. Estas medidas muy seguramente generarán que en el mediano-corto plazo el porcentaje de vehículos de carga que utilizan gasolina disminuirá de manera significativa.

El escenario de mejoramiento de combustibles tiene como objetivo evaluar el efecto en las emisiones de contaminantes en Bogotá relacionado con un cambio en la calidad del combustible diesel.

La Figura 16 resume los resultados encontrados para las emisiones de contaminantes criterio en la situación actual (e.d., utilizando un diesel con un alto contenido de azufre) así como para el escenario en el que se supuso la utilización de un combustible diesel con un bajo contenido de azufre. Para evaluar este escenario, se seleccionó la opción “Biodiesel 100%” al interior del modelo IVE ya que la versión actual de este modelo aun no permite reducir los niveles de azufre de los combustibles diesel al momento de efectuar los cálculos de las emisiones.

Los resultados en la Figura 16 y muestran una reducción en las emisiones de PM_{10} de 45% y de 65% en las emisiones de SO_x utilizando un diesel con un bajo contenido de

azufre. Este resultado es consistente con estudios previos (v.g., Crookes et al., 1996) que demuestran la reducción de material particulado al utilizar un combustible con un bajo contenido de azufre como el biodiesel.

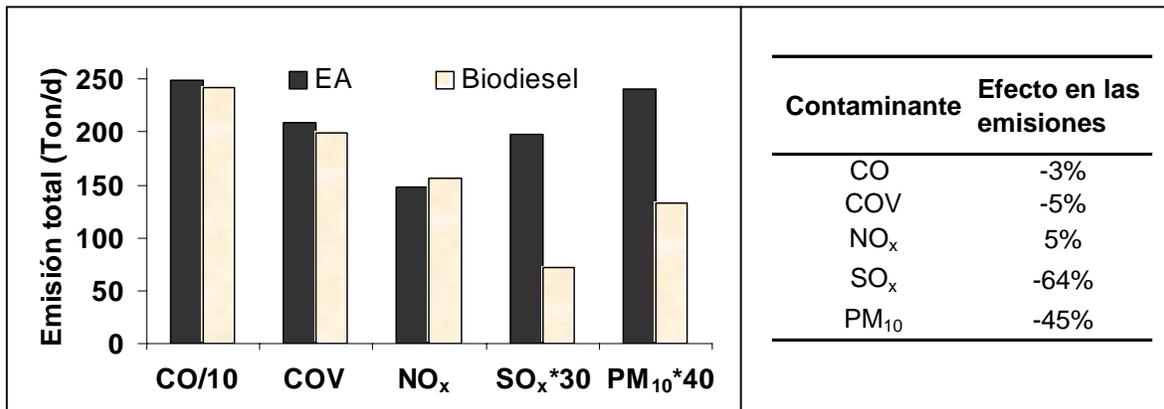


Figura 16. Emisiones totales utilizando diferentes calidades de diesel.

Basados en estos resultados, se podría afirmar que un mejoramiento de los combustibles que se vienen utilizando en la ciudad podría generar un beneficio ambiental muy importante en términos de las emisiones de PM₁₀.

Sin embargo, es necesario realizar estudios más profundos acerca de este tema, ya que la gran mayoría de las medidas de protección ambiental representan ventajas y desventajas. Un ejemplo de esto es el caso del biodiesel, el cual aunque reduce las emisiones de PM₁₀, aumenta las emisiones de NO_x en 5%, una sustancia promotora del fenómeno de smog fotoquímico. Por esta razón, la determinación de cambiar un combustible por otro, debe estar acompañada de diversos estudios que evalúen las necesidades de la población y los beneficios relativos de los diferentes combustibles.

5.7.2 Escenarios Considerando Eliminación de la Sobreoferta Actual de Buses

Estudios realizados en la ciudad de Bogotá han estimado que actualmente se presenta una sobreoferta del transporte público colectivo (buses) que oscila entre el 11% y el 22% (Ibáñez, 2004).

En esta parte del estudio, el modelo IVE fue utilizado para cuantificar el efecto que produciría la eliminación de una sobreoferta de buses de modelos antiguos (con edades mayores a 20 años) del 16% (punto medio entre 11% y 22%), equivalente a aproximadamente 5,500 vehículos.

De acuerdo a lo esperado, la reducción en el número de buses (equivalente a una sobreoferta de 16%) generó una disminución importante en las emisiones estimadas por el modelo (Figura 17). Las reducciones más significativas se presentaron para las emisiones de PM_{10} , con un porcentaje de reducción del 15%, seguida por una reducción de alrededor del 10% para las emisiones de CO, NO_x y SO_x . Estos resultados son aún más interesantes al considerar que los 5,500 buses eliminados durante los cálculos, equivalen a menos del 1% de la flota vehicular Bogotana.

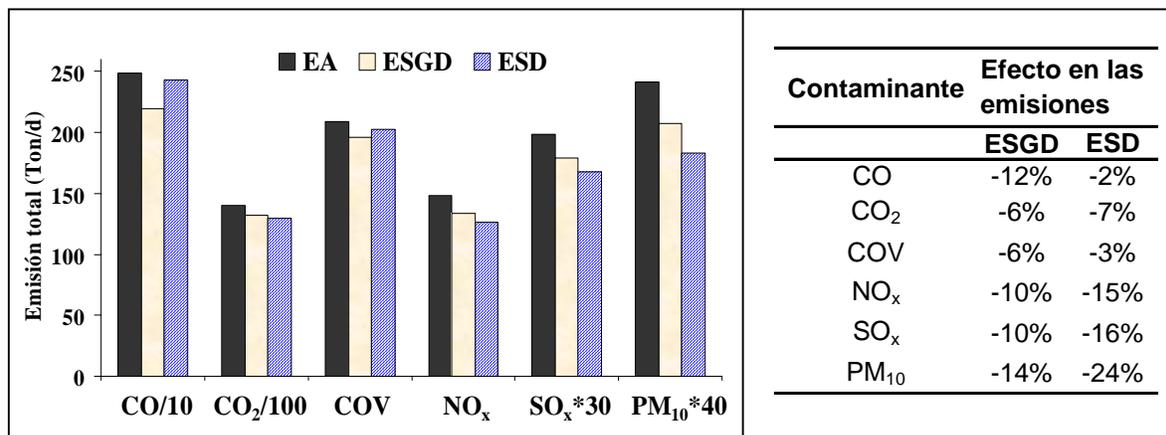


Figura 17. Emisiones totales para los casos de sobreoferta y sin sobreoferta de buses de gasolina y diesel en la ciudad.

EA = estado actual; ESGD = eliminación de sobreoferta de 16% de buses (gasolina y diesel); ESD = eliminación de sobreoferta de 16% de buses diesel.

Una medida como la presentada en el escenario ESGD de la Figura 17, en el cual se consideró una reducción del 16% de la flota de buses utilizando diesel y gasolina estaría encaminada al mejoramiento de las condiciones ambientales en la ciudad, pero no estaría enfocada hacia el problema principal que se presenta actualmente en Bogotá, los altos niveles de emisiones de material particulado. Por esta razón, el escenario ideal sería una eliminación de la sobreoferta de buses que operen con combustible diesel (ver escenario ESD en la Figura 17).

La reducción en las emisiones de PM₁₀ en el caso de una eliminación de 5,500 buses operando con diesel es de 25% comparada con 15% al eliminar buses diesel y a gasolina en partes iguales. Esta reducción es bastante considerable ya que se estarían reduciendo las emisiones en un valor equivalente al aporte actual de todos los camiones y todos los vehículos de pasajeros.

Aunque en este escenario la sobreoferta sólo reduce la cantidad de vehículos diesel, se logran reducciones en las emisiones de todos los contaminantes criterio. Por esta razón, una recomendación plausible para las autoridades ambientales y de tránsito sería una chatarrización selectiva enfocada a los buses que operen con motores diesel.

5.7.3 Escenarios Renovando Parte de la Flota de Buses Incluyendo Mejoramiento de la Calidad del Diesel

El total de buses de tamaño mediano y grande en la ciudad (las categorías seleccionadas para este escenario) es de aproximadamente 22,000 vehículos, para los cuales cerca de 10,000 son de modelos menores o iguales a 1985 (20 años de antigüedad). Los vehículos de modelos antiguos además de no contar con equipos de control de emisiones, suelen presentar una degeneración en distintas partes del motor y del sistema de alimentación de combustibles que los hacen propensos a presentar mayores factores de emisión (e.d., cantidad de contaminante emitido por unidad de distancia recorrida). El modelo IVE fue utilizado para estimar las emisiones resultantes al renovar 10,000 buses de años modelo menores e iguales a 1985 por buses nuevos de mejor tecnología y que cuentan con sistemas de control de emisiones. Adicionalmente, se evaluó el efecto que tendría llevar a cabo una renovación de este tipo en conjunto con un mejoramiento de la calidad del combustible. La Figura 18 presenta los resultados obtenidos para estos escenarios.

La medida de renovación de buses sin mejorar la calidad del diesel es una medida que presenta, según nuestros resultados, una reducción relativamente significativa para las emisiones de PM₁₀ (6%), CO (17%), COV (8%) y NO_x (13%). Generalmente, el objetivo de llevar a cabo una renovación de vehículos es mejorar y actualizar las diferentes tecnologías de control de emisiones además de utilizar motores más eficientes. Sin

embargo, las nuevas tecnologías requieren de ciertas condiciones necesarias para funcionar adecuadamente. Una de ellas es la mejora en la calidad de los combustibles. Por esta razón la mejora de los combustibles debe ir de la mano con la actualización de los diferentes motores y tecnologías de equipos de control de emisiones.

Los resultados obtenidos al renovar la flota y mejorar la calidad del combustible (ver escenario RCMC en la Figura 18) confirman lo expuesto en el párrafo anterior. La reducción en las emisiones de PM_{10} en este caso es de 47% comparada con 6% al renovar la flota sin mejorar la calidad del combustible y la reducción en las emisiones de SO_x es de 58% siendo nula en el escenario de renovación sin mejora de los combustibles.

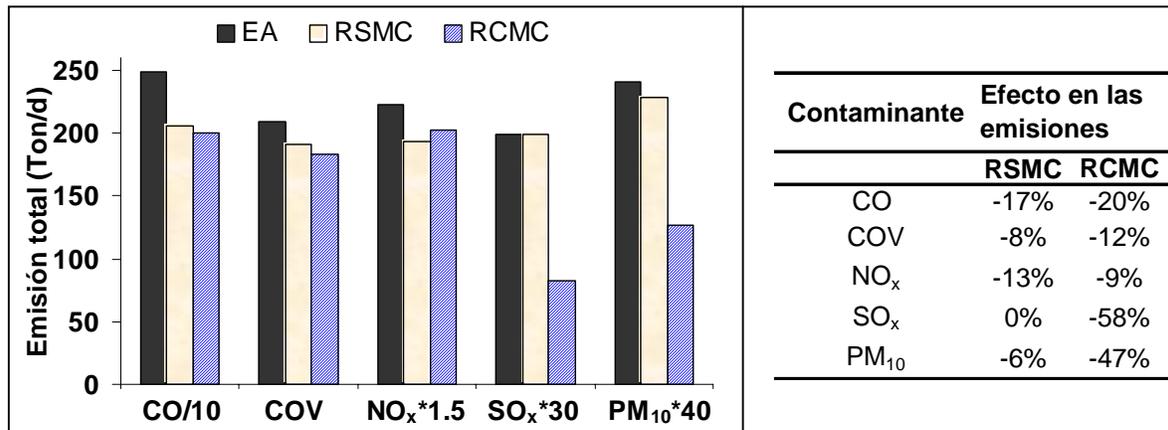


Figura 18. Emisiones totales para la ciudad de Bogotá en el escenario de renovación de buses incluyendo mejoramiento en la calidad del diesel.

EA =estado actual; RSMC = renovación sin mejoramiento de combustible (diesel sin refinar con un alto contenido de azufre); RCMC = renovación con mejoramiento de combustible (Diesel con bajo contenido de azufre como el biodiesel).

5.7.4 Escenario Sobre el Requerimiento de Catalizador Para Todas las Motos de la Ciudad y Caso Hipotético de Motos a 4 Tiempos.

Como se mencionó anteriormente, la categoría motos es responsable de alrededor del 20% de las emisiones totales de PM_{10} y COV. Adicionalmente las motos son responsables de alrededor del 50% de las emisiones totales en la ciudad de acetaldehído y formaldehído. Esta situación se presenta, entre otras razones, debido al gran número de motos con motores de dos tiempos.

Este escenario se enfocó en estudiar cuáles serían los resultados de aplicar alguna normatividad que obligue a todas las motos de la ciudad a contar con un convertidor catalítico y a estudiar cuales serían los resultados en el caso hipotético en el que todas las motos contarán con motores de 4 tiempos.

Los resultados obtenidos (ver escenario catalizador en la Figura 19) demuestran la efectividad de contar con convertidores catalíticos en todas las motos en donde se lograría una reducción importante en contaminantes criterio como el PM_{10} (10%) y los COV (15%). Adicionalmente, la reducción en emisiones de compuestos tóxicos, de los cuales hasta el momento en la ciudad se tiene poco conocimiento, como lo son el acetaldehído y el formaldehído, fue significativa. La medida de implementar el uso de convertidor catalítico para las motos en la ciudad podría llegar a reducir en aproximadamente 40% las emisiones de formaldehído y en 30% las de acetaldehído. Estos compuestos son de gran importancia en términos de calidad del aire ya que, además de ser especies altamente tóxicas, en conjunto con los NO_x son contribuyentes importantes a la formación de ozono troposférico, causante del conocido smog fotoquímico.

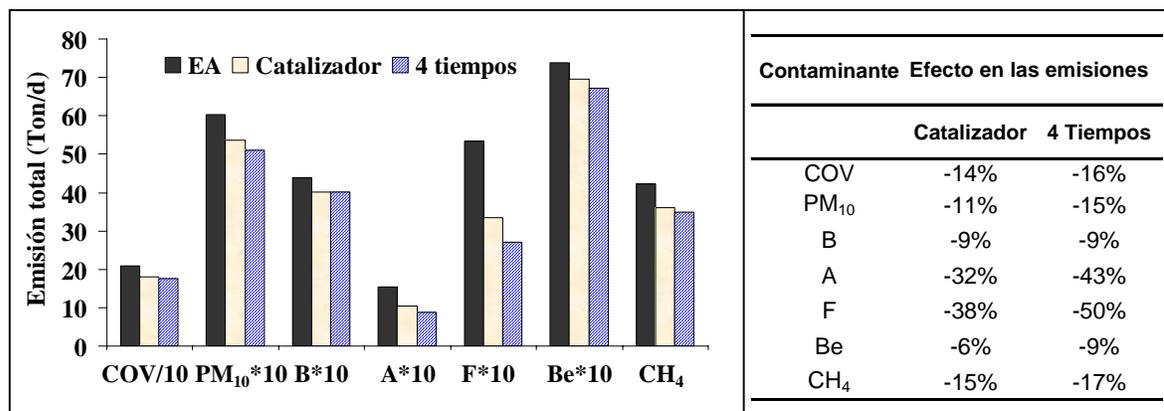


Figura 19. Emisiones totales para la ciudad de Bogotá en los escenarios de motos con catalizadores y motos a 4 tiempos.

EA= estado actual (motos sin catalizador); Catalizador = caso en el que todas las motos cuentan con convertidor catalítico; 4 tiempos= caso hipotético en el que todas las motos cuentan con motores de 4 tiempos; B = butadieno; A = acetaldehído; F = formaldehído; Be= benceno

Las reducciones obtenidas por el eventual uso de catalizadores en las motos de la ciudad, toman aún más importancia si se tiene en cuenta que estos vehículos representan menos del 4% de la flota Bogotana.

Los resultados obtenidos en el caso hipotético en el que todas las motos fueran de 4 tiempos (ver escenario 4 tiempos en la Figura 19), muestran una reducción de las emisiones ligeramente mayor a la obtenida con el uso de catalizador en estos vehículos. Las emisiones de PM_{10} se reducen en un 15% comparado con 10% al utilizar catalizador. La mayor diferencia se presentó en la reducción de las emisiones de formaldehído con un porcentaje de reducción de 50% comparado con 40% en el caso de que todas las motos contarán con catalizador. Por esta razón una recomendación plausible para las autoridades ambientales es incentivar la renovación de la flota de motos de la ciudad que utilizan motores de dos tiempos hacia motores de cuatro tiempos.

5.7.5 Escenario del Cambio de Taxis y Colectivos a Gas Natural: Comparación Vehículos Duales y Vehículos Dedicados de Gas Natural

En los últimos años, en Bogotá y el resto del país, se ha venido presentando una tendencia entre vehículos de las categorías taxis y colectivos (buses pequeños con una capacidad aproximada de 15 pasajeros), en la que estos vehículos se han modificado para operar con motores duales que le permiten al motor utilizar gasolina o gas natural. En este escenario se evaluó la diferencia que se presenta, en términos del inventario de emisiones de fuentes móviles, cuando se utiliza gas natural como combustible en vehículos diseñados desde la fábrica para operar con este combustible (vehículos dedicados) y en vehículos que inicialmente eran de gasolina y son convertidos en vehículos duales con la capacidad de operar usando gas natural o gasolina.

Se evaluaron dos escenarios: el primero realiza la estimación de emisiones teniendo en cuenta que todos los taxis y colectivos utilizan gas natural como combustibles en motores duales. El segundo es suponiendo que se cambiaran todos los motores a motores diseñados para operar con gas natural (dedicados). Estos escenarios se comparan con la situación hipotética en la que todos los taxis y colectivos operan con gasolina. Para los tres casos (gasolina, dual y dedicado) se supone que los vehículos no tienen ningún

sistema de control de emisiones. Las figuras 20 y 21 resumen los resultados de este ejercicio.

En el caso de las emisiones de CO, provenientes de las categorías de taxi y colectivo, los motores duales no presentan ningún beneficio en término de reducción de emisiones de este contaminante, más aún las emisiones se incrementan aproximadamente en un 10% (ver escenario dual en la Figura 20). Este resultado contrasta con el caso de motores originales de gas natural donde se presenta una reducción de las emisiones de CO, provenientes de taxis y colectivos, de alrededor del 25% (ver escenario gas natural en la Figura 20). Es un resultado esperado debido a que los motores duales al no encontrarse diseñados para operar con gas natural, realizan un proceso de combustión que no necesariamente es el más eficiente.

Los resultados obtenidos para las emisiones de COV, SO_x y benceno, generadas por los taxis y colectivos, presentaron una reducción importante y similar para los motores duales y los motores dedicados (20% COV, 15% SO_x, 35% benceno).

Las emisiones de NO_x, y PM₁₀ no son disminuidas al suponer que todos los vehículos son duales. Los motores fabricados para operar con gas natural presentarían una reducción de las emisiones de taxis y colectivos de aproximadamente 90% para PM₁₀ (el contaminante más importante) y 20% para NO_x.

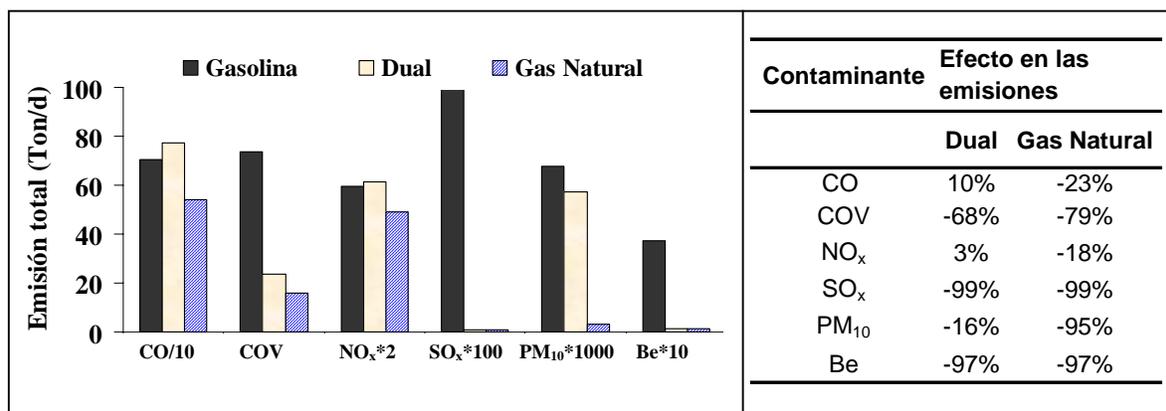


Figura 20. Emisiones para las categorías de taxi y colectivo operando con gasolina, gas natural y motores duales.

Gasolina = se supone que todos los taxis y colectivos operan con gasolina; Be = Benceno; Para los tres escenarios se supone que los vehículos no tienen ningún sistema de control de emisiones.

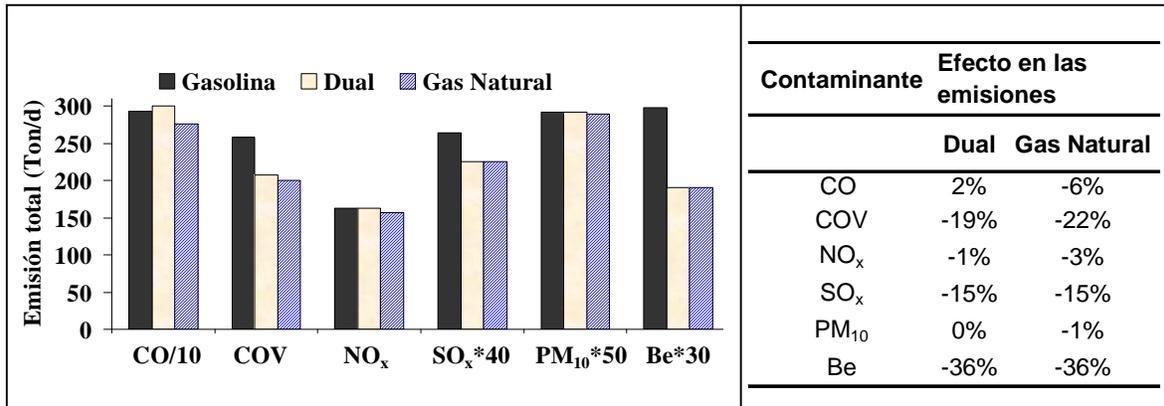


Figura 21. Emisiones totales para la ciudad de Bogotá en los escenarios con taxis y colectivos operando con gasolina, gas natural y motores duales.

Gasolina = se supone que todos los taxis y colectivos operan con gasolina; Be = Benceno; Para los tres escenarios se supone que los vehículos no tienen ningún sistema de control de emisiones.

Si se tienen en cuenta los aportes de la categoría de taxi y colectivo al total de las emisiones (ver Figura 21) se puede apreciar que el uso de gas natural, bien sea en vehículos duales o en motores dedicados, no presenta una disminución importante en las emisiones de los contaminantes más relevantes para la ciudad, debido a que los taxis y colectivos son vehículos livianos que no son verdaderamente importantes para el inventario de emisiones en la ciudad (ver Figura 10). Por lo tanto convertir los taxis y colectivos a gas natural traería, probablemente, un beneficio económico para los propietarios de estos vehículos pero no representaría un beneficio en términos ambientales.

5.7.6 Escenario Considerando el Cambio de Combustible de Transmilenio de Diesel a Gas Natural

Desde el año 2001, en la ciudad de Bogotá viene operando el sistema de transporte masivo Transmilenio (TM), para el cual ha sido propuesto el cambio de combustible para los buses articulados que componen el sistema. Actualmente todos los buses excepto por un prototipo experimental, operan con combustible diesel y se ha considerado la posibilidad de reemplazar parte de esta flota por vehículos dedicados a gas.

El escenario discutido en esta sección está enfocado en cuantificar el efecto en el inventario de emisiones de PM_{10} de la ciudad que tendría el mejoramiento del combustible diesel en la ciudad y el cambio de combustible diesel a gas natural en los buses articulados que hacen parte del sistema TM.

La Figura 22 resume los resultados obtenidos para este escenario. Durante este ejercicio se supone que los buses articulados del sistema TM operan actualmente como buses sin ningún sistema de control de emisiones. Esta suposición fue basada en el fenómeno de envenenamiento por azufre (Matsumoto et al., 2000; Neyestanaki et al., 2004) relacionado con la mala calidad de nuestros combustibles que no permite sacar provecho de los avanzados sistemas de control de emisiones que eran funcionales cuando estos vehículos estaban nuevos. De esta manera, el escenario aquí propuesto representa un enfoque conservador y posiblemente sobreestima las emisiones de los buses que hacen parte de TM.

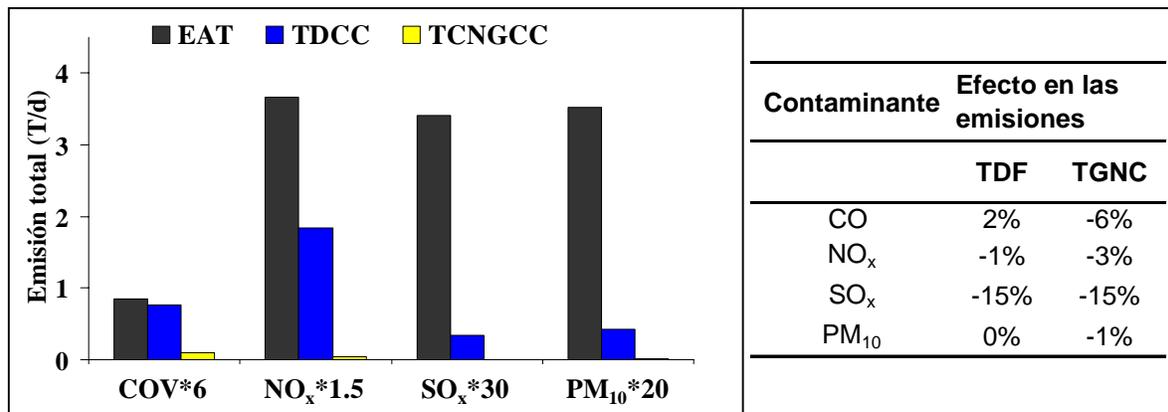


Figura 22. Emisiones para Transmilenio en la ciudad de Bogotá utilizando diesel y gas natural como combustible.

EAT = estado actual de Transmilenio, equivalente a buses articulados con motores de diesel con alto contenido de azufre y sin equipos de control de emisiones; TDF = buses operando con un diesel con bajo contenido de azufre y con filtro de partículas. TGNC= buses operando con gas natural y con catalizador. Nota: ver Tabla 9 para una comparación de estas emisiones con respecto al total de la flota vehicular bogotana.

En este escenario, se realizó una comparación suponiendo una mejora en el combustible diesel con alto contenido de azufre a un diesel con un bajo contenido de azufre y suponiendo que los buses articulados cuentan con inyección electrónica y filtro de control de partículas (el cual es posible incorporar gracias a la reducción del contenido de azufre

en el diesel). La segunda comparación se realizó suponiendo un cambio de los buses articulados por buses fabricados para operar con gas natural (dedicados), equipados con sistemas de alimentación de combustible tipo inyección electrónica y catalizadores de 3 vías.

Nuestros resultados muestran una reducción importante en la mayoría de contaminantes criterio relacionados con el diesel (PM_{10} , NO_x y SO_x), tanto en el caso de mejora en la calidad del diesel como en el caso de uso de gas natural en buses con motores dedicados. La disminución en las emisiones de contaminantes como el PM_{10} y el SO_x es muy similar para buses articulados que utilizan un diesel de buena calidad y que cuentan con filtro de partículas, al compararlas con los buses articulados utilizando gas natural y catalizador de 3 vías. La reducción en las emisiones de PM_{10} para buses articulados que utilizan un diesel de buena calidad y que cuentan con equipos de control de emisiones es de alrededor del 95% comparado con 99% para buses articulados utilizando gas natural y catalizador de 3 vías. Las reducciones en las emisiones de SO_x son de 90% y 99% para buses articulados que utilizan un diesel de buena calidad y que cuentan con filtro de partículas y para buses articulados utilizando gas natural y catalizador de 3 vías, respectivamente.

Sin embargo, es necesario contextualizar el caso de TM en términos de su contribución al inventario de emisiones para toda la ciudad. Debido al número reducido de buses articulados que conforman este sistema (587 a Julio 2004) la participación en el inventario de emisiones es bastante baja. La Tabla 9 resume el aporte actual de TM al inventario de emisiones y el aporte que este sistema tendría suponiendo mejoras en el diesel y un cambio de combustible hacia la opción de gas natural.

Estos resultados muestran que a nivel de la ciudad el sistema TM no es una de las fuentes principales de contaminación, con aportes de 3% y 2% para PM_{10} y NO_x respectivamente. Sin embargo, es necesario tener presente que el sistema TM probablemente será muy importante en 20 años cuando se haya implementado por completo en la ciudad.

Tabla 9. Aporte de buses articulados de Transmilenio al inventario de emisiones de la ciudad bajo diferentes escenarios.

| | CO | VOC | NO _x | SO _x | PM ₁₀ |
|-------------|-------|-------|-----------------|-----------------|------------------|
| Total Flota | 2500 | 200 | 150 | 7 | 6 |
| EAT | 1 | 0.1 | 2 | 0.1 | 0.2 |
| Aporte | 0.03% | 0.1% | 2% | 2% | 3% |
| TDF | 1 | 0.1 | 0.1 | 0.01 | 0.02 |
| Aporte | 0.03% | 0.1% | 0.1% | 0.2% | 0.4% |
| TGNC | 1 | 0.02 | 0.03 | 0 | 0.001 |
| Aporte | 0.04% | 0.01% | 0.02% | 0% | 0.01% |

Las unidades de las emisiones son Ton día⁻¹. Total flota = emisiones totales incluyendo todas las categorías; EAT= Estado actual, equivalente a buses articulados con motores diesel con alto contenido de azufre y sin equipos de control; TDF = buses articulados operando con un diesel con bajo contenido de azufre y con filtro de partículas. TCNGCC= buses articulados operando con gas natural y con catalizador.

Una posible recomendación para las autoridades ambientales es enfocar sus esfuerzos hacia categorías que actualmente presentan aportes significativos al inventario total de emisiones de la ciudad. Adicionalmente, realizar estudios de evaluación a la exposición de las emisiones de categorías como TM que permitan determinar si en este aspecto esta categoría representa una fuente de emisión de contaminantes importante.

6. COMPARACIÓN DEL INVENTARIO DE EMISIONES CON ESTUDIOS PREVIOS

Para contextualizar los resultados obtenidos en este estudio, se realizó una comparación con estudios realizados anteriormente en la ciudad. La Tabla 10 presenta los resultados de las emisiones de los principales contaminantes obtenidas en cuatro proyectos diferentes.

Las emisiones de CO para tres de los cuatro estudios realizados son similares. El estudio realizado por la Universidad de Los Andes (Uniandes) en el 2004, parece subestimar las emisiones de CO.

Tabla 10. Resultados de diversos estudios

| | DAMA- UNAL, 2001 ¹ | DAMA- Uniandes, 2004 ² | START- Uniandes, 2005 ³ | Este estudio ^{***} |
|---------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------|
| No. de vehículos | 812,363 | 869,613 | 1'100,000 | 930,000 |
| CO | 1'045,387 | 291,212 | 230,000* | 820,000 |
| PM ₁₀ | N/A | 1,552 | N/A | 2,000 |
| SO _x | 3,947** | 2,171** | N/A | 2,200 |
| NO _x | 27,100 | 13,004 | 12,000* | 49,000 |
| COV | N/A | 45,557 | N/A | 69,000 |
| THC | 73,554 | N/A | 25,000* | N/A |
| CO ₂ | N/A | 1'780,896 | 3'000,000 | 4'600,000 |
| N ₂ O | N/A | N/A | 90 | 110 |
| CH ₄ | N/A | 477 | 1,400 | 14,000 |

Las unidades de todos los valores son Ton año-1

1. Plan de gestión del aire para el Distrito Capital 2001-2009, Universidad Nacional-DAMA 2001.

2. Modelo de calidad del aire para Bogotá. Uniandes-DAMA 2004.

3. Estimación de contaminantes y gases efecto invernadero de fuentes móviles en la ciudad. Start-Uniandes 2005.

* Resultados para vehículos livianos de gasolina únicamente. **Este resultado es sólo para SO₂. ***Todos los valores de emisiones presentados en esta sección se obtienen de multiplicar las emisiones diarias por 329 días año-1.

Los valores de PM₁₀ son similares para este estudio y el estudio de Uniandes en el 2004 al igual que las emisiones de SO_x. Los resultados para las emisiones de NO_x presentan diferencias importantes para todos los estudios que reportan este valor, la misma situación se presenta para las emisiones reportadas de COV y CH₄.

Aunque en general se presentan valores del mismo orden de magnitud para la mayoría de los contaminantes, se presentan diferencias importantes en algunos de los resultados lo que indica la necesidad de seguir realizando estudios encaminados a la determinación de emisiones provenientes de fuentes móviles en la ciudad.

7. INCERTIDUMBRE Y REPRESENTATIVIDAD

En esta sección del documento se mencionan diferentes aspectos que pudieron afectar la representatividad de los resultados obtenidos.

En primer lugar, es necesario mencionar que el modelo IVE a pesar de ser un modelo diseñado para suplir las necesidades de países que no cuentan con un modelo de estimación de emisiones propio, utiliza factores de emisión desarrollados bajo condiciones que no necesariamente son representativas de cada ciudad donde se utiliza este modelo.

Adicionalmente, la forma como se desarrolla la campaña de medición para recolectar la información necesaria presenta algunos inconvenientes que pueden afectar la validez de los datos recolectados. Por ejemplo, en Bogotá la selección de los sectores donde se realizaron las mediciones se vio afectada por el factor de seguridad, ya que considerando los costos de los equipos utilizados en las mediciones, los sectores utilizados para la campaña no podían ser zonas que se consideraran peligrosas

Las encuestas realizadas en diversos parqueaderos de la ciudad pudieron estar sesgadas hacia vehículos relativamente nuevos y en buen estado. Los altos precios de los parqueaderos en Bogotá podrían influir en la decisión de usar estos servicios por parte de los usuarios de los mismos.

La información recolectada con las unidades GPS para buses y camiones en este estudio no se considera representativa de todas las categorías existentes en la ciudad, debido a que cada una de ellas está compuesta por diversas clases de vehículos. Por ejemplo, los buses están conformados por Transmilenio, colectivos, busetas, ejecutivos, entre otros. Utilizar un solo valor de actividad vehicular para la categoría de buses no es la mejor alternativa ya que cada una de las clases que conforman esta categoría presenta patrones de conducción muy diferentes entre sí.

Otra variable que pudo afectar la representatividad de la información recolectada en campo fueron las fechas en las que se realizaron las mediciones: Enero 17 al 28. Esta época del año es reconocida por su relativo bajo nivel de actividad vehicular en Bogotá.

Debido a la falta de información sólida en términos de emisiones de la ciudad de Bogotá así como al gran número de suposiciones y simplificaciones utilizadas en nuestros cálculos, consideramos el inventario de emisión de fuentes móviles presentado en este documento como una aproximación de primer orden que proporciona, en el mejor de los casos, el orden de magnitud de las emisiones para las diferentes categorías vehiculares consideradas. Todos los resultados presentados requieren ser confirmados y validados, una vez se cuente con más y mejor información de la flota vehicular bogotana.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio de actividad vehicular realizado bajo el contexto del proyecto IVE en Bogotá generó información importante que permitió estimar de manera económica y efectiva, el inventario de emisiones de fuentes móviles en la ciudad. Este modelo se considera una excelente herramienta para evaluar el efecto y las tendencias de diversas medidas enfocadas hacia la prevención y el control de la contaminación atmosférica. Sin embargo se recomienda seguir realizando investigaciones que mejoren y actualicen los resultados obtenidos durante este estudio.

Se estimaron las emisiones totales para contaminantes criterio obteniendo resultados de 6 Ton d⁻¹ para PM₁₀, 2,500 Ton d⁻¹ para CO, 150 Ton d⁻¹ para NO_x, 7 Ton d⁻¹ para SO_x y 200 Ton d⁻¹ para COV.

Se estimaron los aportes de cada categoría vehicular al inventario total de emisiones, siendo los buses la categoría de mayor relevancia, al aportar el 50% de las emisiones de PM₁₀ a pesar de representar menos del 5% del total de la flota de vehículos en la ciudad.

El ejercicio de análisis de escenarios evidenció el problema asociado con la masiva presencia de motos con motores de dos tiempos y sin ningún sistema de control de emisiones en la ciudad. Esta categoría de vehículos es responsable de alrededor del 20% de las emisiones de PM₁₀ y COV, convirtiéndola en una de las categorías de mayor relevancia en términos de emisiones demostrando la importancia de implementar medidas que controlen esta situación.

Los aforos vehiculares en las diferentes vías de la ciudad permitieron estimar la participación de cada categoría vehicular en la ocupación de las vías. Los taxis presentaron altos porcentajes (entre 20% y 50%) confirmando el hecho de la sobreoferta existente para esta categoría (entre 45% y 55%). Sin embargo, en términos de emisiones, los taxis no representan aportes significativos al total de emisiones de contaminantes en la ciudad.

Al igual que en el caso de los taxis, las emisiones de contaminantes provenientes del sistema de transporte masivo Transmilenio, no son muy relevantes en términos del inventario total de emisiones de la ciudad. Por lo tanto aunque el uso de gas natural en TM tendría un impacto significativo en las emisiones de este sector, esta estrategia no se reflejaría en los niveles de emisión de contaminantes en toda la ciudad.

En contraste con los taxis, la eliminación de la sobreoferta actual de buses (entre 11% y 22%) generaría una disminución importante en los niveles de emisión de contaminantes en la ciudad. Las reducciones para las emisiones de PM_{10} estarían entre 15% y 25% dependiendo si se eliminan buses operando a gasolina y diesel, o sólo buses de motores diesel.

El proceso de chatarrización de buses en la ciudad es una estrategia efectiva en términos de reducción de emisiones contaminantes, pero debería estar enfocada hacia vehículos que operen con diesel para garantizar una mayor reducción en las emisiones de material particulado.

Los taxis y buses presentan las actividades vehiculares más altas en la ciudad a pesar de representar una fracción pequeña del número total de vehículos registrados. Por esta razón las medidas encaminadas a mejorar la movilidad deberían estar enfocadas a estas categorías.

Las emisiones de material particulado, el contaminante más importante en términos de salud pública, provienen fundamentalmente de la flota vehicular de carga pesada (buses y camiones) y de las motos. Por esta razón, las medidas de protección ambiental deberían estar enfocadas hacia estos vehículos.

A partir de los análisis realizados se determinó que el mejoramiento de la calidad de los combustibles diesel, es la mejor estrategia para la reducción de las emisiones de material particulado en Bogotá.

Se recomienda realizar estudios que complementen los resultados obtenidos en este proyecto y que permitan evaluar la efectividad de las medidas encaminadas hacia la disminución de los niveles de emisión de contaminantes propuestas desde la perspectiva económica.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Bekir Omursal, Surhid P. Gautman, 1997. *Contaminación atmosférica por vehículos automotores Experiencias recogidas en siete centros urbanos de América Latina*. Documento técnico del Banco Mundial, Número 373S, 1997
- Behrentz, Eduardo, 2004. *Estimación de contaminantes y gases efecto invernadero de Fuentes móviles en la ciudad*. Universidad de Los Andes.
- Crookes, R., 1996. Systematic assessment of combustion characteristics of biofuels and emulsions with water for use as diesel engine fuels. *PII: S0196-8904 00202-6*.
- Durbin, T., 2003. The effects of diesel particulate filters and a low-aromatic, low-sulfur diesel fuel on emissions for medium-duty diesel trucks. *Atmospheric Environment* 37 2105–2116.
- Gertler, A., 2005. Diesel vs. gasoline emissions: Does PM from diesel or gasoline vehicles dominate in the US?. *Atmospheric Environment* 39 2349–2355.
- Ghose, M., 2004. Assessment of the impacts of vehicular emissions on urban air quality and its management in Indian context: the case of Kolkata (Calcutta). *Environmental Science & Policy* 7 345–351.
- Ibáñez, Martha, 2004. *Evaluación y caracterización del parque automotor de transporte público individual y colectivo en Bogotá D.C y confrontación con la flota necesaria para satisfacer la demanda actual de viajes en este modo*. Tesis especialización en transportes. Universidad Nacional de Colombia.
- International Vehicle Emissions Modelling (IVE): Design and Measurements. 2002. University of California Riverside
- International Vehicle Emissions Modelling (IVE): Manual del usuario version 1.1.1. 2004. Centro Internacional de Investigación de Sistemas Sostenibles (ISSRC). Información disponible en:
<http://www.gssr.net/ive/index.html>
- Kan, H., 2004. Particulate air pollution in urban areas of Shanghai, China: health-based economic assessment. *Science of the Total Environment* 322 71–79.
- Lents, J., 2004. *Estudio de la actividad vehicular en Sao Paulo*. Internacional Sustainable Systems Research: California. USA.
- Matsumoto, S., 2000. NO_x storage-reduction catalyst for automotive exhaust with improved tolerance against sulfur poisoning. *Applied Catalysis B: Environmental* 25 115–124.
- Ministerio de Transporte. 2003. Estadísticas del parque automotor. Available at www.mintransporte.gov.co/Servicios/Estadisticas/Transporte_Automotor
- Neuberger, M., 2004. Acute effects of particulate matter on respiratory diseases, symptoms and functions: epidemiological results of the Austrian Project on Health Effects of Particulate Matter (AUPHEP). *Atmospheric Environment* 38 3971–3981.

Neyestanaki, A., 2004. Deactivation of postcombustion catalysts, a review. *Fuel* 83 395-408.

Saiyasitpanich, P., 2005. The effect of diesel fuel sulfur content on particulate matter emissions for a nonroad diesel generator. *Journal of the Air & Waste Management Association* 55 993-998.

Sawyer, R., 2000. Mobile sources critical review: 1998 NARSTO assessment. *Atmospheric Environment* 34 2161–2181.

Schifter, I., 2005. Fuel-based motor vehicle emission inventory for the metropolitan area of Mexico City. *Atmospheric Environment* 39 931–940.

Secretaria de Tránsito y Transporte de Bogotá (STT). Información disponibles en: <http://www.transitobogota.gov.co/>

STT Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá (STT). Base de Datos Parque Automotor, Julio 2004.

Zárate, E.M., Belalcázar, L.C., Echeverry, D., Clappier, A. 2004. *Diseño e implementación de un modelo de calidad de aire para Bogotá. Informe semestral No. 6: Inventario de emisiones para Bogotá y la región 2002*. Estudio presentado para el Departamento Técnico Administrativo Del Medio Ambiente. Uniandes.

ANEXO A: Análisis Descriptivo de Diferentes Bases de Datos

Como se mencionó anteriormente (sección 4.2) se recolectó información necesaria, para la estimación del inventario de emisiones, como el número total de vehículos de cada categoría, los kilómetros recorridos al día, la distribución tecnológica de las categorías de buses, motos y camiones y características meteorológicas de la ciudad como la temperatura y la humedad. Para esta labor se consultaron diferentes bases de datos disponibles en la ciudad, dos de la más importantes fueron la base de datos de los vehículos matriculados hasta Julio del 2004 en Bogotá de la Secretaría de Tránsito de Bogotá (STT) y la base de datos de los certificados de emisión de gases emitidos en el 2004 por los centros de diagnóstico autorizados por el DAMA, CDRs.

A.1. Base de Datos de la STT

La base de datos de la STT además de contar con información sobre el número de vehículos registrados o matriculados en la ciudad de Bogotá cuenta con información sobre el modelo, la marca, el cilindraje y el tipo de combustible de los diferentes vehículos. Esta información fue utilizada para conocer la distribución tecnológica de las categorías de buses, motos y camiones debido a que durante la campaña de medición se recolectó este tipo de información únicamente para vehículos particulares y taxis.

La tabla A.1 presentan el total de vehículos por categoría con matrícula de Bogotá registrados hasta Julio del 2004.

Tabla A.1. Distribución de vehículos por categoría en Bogotá

| Categoría | No. vehículos |
|------------------------|----------------|
| Vehículos particulares | 431,004 |
| Taxis | 50,672 |
| Camioneta | 97,778 |
| Campero | 77,407 |
| Moto | 32,055 |
| Bus | 13,212 |
| Bus articulado | 587 |
| Buseta | 8,520 |
| Colectivo | 12,364 |
| Camión | 18,214 |
| Otros | 4,591 |
| TOTAL | 746,404 |

Otros = Ciclomoto, Maquinaria industrial y agrícola, tractores, Trolebús, y otros vehículos livianos.

La distribución tecnológica de buses y camiones se realizó clasificando los diferentes vehículos según su año modelo y tamaño del motor. Las tablas A.2 y A.3 presentan el resultado de este trabajo.

Tabla A.2. Distribución tecnológica de la categoría de Buses en Bogotá.

| BUSES | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------|-------------|------------------|-----------------|---------------------|---------------------|-------------|--------------|------------------|----------------|--------------|
| Tipo de combustible | Estándar | Año Modelo | Tamaño del motor | # de vehículos | % | Tipo de combustible | Estándar | Año Modelo | Tamaño del motor | # de vehículos | % |
| GASOLINA | CONV. | <1996 | Sin info. | 210 | | CONV. | <1996 | | Sin info. | 6 | |
| | | | <=3L | 5748 | 17.3% | | | | <=3L | 847 | 2.46% |
| | | | 3L--6L | 3441 | 10.0% | | | | 3L--6L | 4933 | 14.4% |
| | | | >=6L | 3386 | 9.9% | | | | >=6L | 5029 | 14.7% |
| | | | Subtotal | 12785 | 37.2% | | | | Subtotal | 10815 | 31.5% |
| | EURO I | 1997 - 2000 | Sin info. | 0 | | EURO I | 1997 - 2000 | Sin info. | 0 | | |
| | | | <=3L | 1260 | 3.67% | | | <=3L | 618 | 1.80% | |
| | | | 3L--6L | 97 | 0.28% | | | 3L--6L | 1948 | 5.67% | |
| | | | >=6L | 21 | 0.06% | | | >=6L | 226 | 0.66% | |
| | Subtotal | 1378 | 4.01% | Subtotal | 2792 | 8.12% | | | | | |
| | EURO II | 2001 - 2005 | Sin info. | | | EURO II | 2001 - 2005 | Sin info. | 0 | | |
| | | | <=3L | 192 | 0.56% | | | <=3L | 1634 | 4.75% | |
| | | | 3L--6L | 30 | 0.09% | | | 3L--6L | 3976 | 11.6% | |
| | | | >=6L | 15 | 0.04% | | | >=6L | 747 | 2.17% | |
| | Subtotal | 237 | 0.69% | Subtotal | 6357 | 18.5% | | | | | |
| EURO III | | Sin info. | | | EURO III | | Sin info. | | | | |
| | | <=3L | | | | | <=3L | | | | |
| | | 3L--6L | | | | | 3L--6L | | | | |
| | | >=6L | | | | | >=6L | | | | |
| Subtotal | 0 | | Subtotal | 0 | | | | | | | |
| Total Gasolina | | | 14400 | 41.9% | Total Diesel | | | 19964 | 58.1% | | |

Tabla A.3. Distribución tecnológica de la categoría de camiones en Bogotá.

| CAMIONES | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------|-------------|------------------|----------------|---------------------|---------------------|-------------|--------------|------------------|-----------------|-------|
| Tipo de combustible | Estándar | Año Modelo | Tamaño del motor | # de vehículos | % | Tipo de combustible | Estándar | Año Modelo | Tamaño del motor | # de vehículos | % |
| GASOLINA | CONV. | <1996 | Sin info. | 245 | | DIESEL | CONV. | <1996 | Sin info. | 2 | |
| | | | <=4L | 1129 | 6.2% | | | | <=4L | 404 | 2.22% |
| | | | 4L--8L | 11147 | 62.5% | | | | 4L--8L | 1703 | 9.3% |
| | | | >=8L | 1535 | 8.4% | | | | >=8L | 752 | 4.1% |
| | | | Subtotal | | 14056 | | | | 77.2% | Subtotal | |
| | EURO I | 1997 - 2000 | Sin info. | 0 | | EURO I | 1997 - 2000 | Sin info. | 0 | | |
| | | | <=4L | 88 | 0.48% | | | <=4L | 170 | 0.93% | |
| | | | 4L--8L | 109 | 0.60% | | | 4L--8L | 154 | 0.85% | |
| | | | >=8L | 13 | 0.07% | | | >=8L | 29 | 0.16% | |
| | Subtotal | | 210 | 1.15% | Subtotal | | 353 | 1.94% | | | |
| | EURO II | 2001 - 2005 | Sin info. | 0 | | EURO II | 2001 - 2005 | Sin info. | 0 | | |
| | | | <=4L | 39 | 0.21% | | | <=4L | 123 | 0.68% | |
| | | | 4L--8L | 99 | 0.54% | | | 4L--8L | 330 | 1.8% | |
| | | | >=8L | 10 | 0.05% | | | >=8L | 121 | 0.66% | |
| | Subtotal | | 148 | 0.81% | Subtotal | | 574 | 3.2% | | | |
| | EURO III | | Sin info. | | | EURO III | | Sin info. | | | |
| | | | <=4L | | | | | <=4L | | | |
| | | | 4L--8L | | | | | 4L--8L | | | |
| | | | >=8L | | | | | >=8L | | | |
| | Subtotal | | 0 | | Subtotal | | 0 | | | | |
| Total Gasolina | | | 14414 | 79.1% | Total Diesel | | | 3788 | 20.8% | | |

A.2. Bases de Datos de la Categoría de Camiones en Bogotá

Debido a que en la ciudad circulan diversos vehículos con matrículas de otras ciudades, la base de datos de la STT debe ser complementada por bases de datos dinámicas. Para el caso de vehículos particulares y de camiones es mayor la necesidad de encontrar información complementaria, a diferencia de las categorías de taxis y buses, en donde por ley todo vehículo de este tipo que preste su servicio en la ciudad debe tener matrícula de Bogotá.

En el caso de vehículos particulares se recolectó información durante la campaña de medición de este proyecto que permitió complementar la información obtenida de la base de datos de la STT. En el caso de la categoría de camiones los resultados obtenidos en cuanto a la distribución de combustible de la base de datos de la STT, evidenciaron la necesidad de buscar información complementaria.

Según la información procesada de la base de datos de la STT alrededor del 80% de los camiones matriculados en Bogotá operan con motores a gasolina y tan sólo un 20% opera con motores Diesel. Consultando la opinión de expertos, se pudo determinar que estos porcentajes no representaban la situación real por lo que se buscaron otras fuentes de información.

Se consultó el documento “Parque Automotor de Carga en Colombia” del Ministerio de Transporte¹ (MT) y la base de datos de los centros de diagnóstico (CDRs) autorizados por el DAMA en la ciudad en el 2004, los cuales generan para todos los vehículos el certificado de emisión de gases obligatorio. Adicionalmente se realizó una encuesta a 56 camiones de la ciudad.

La consulta del estudio del ministerio de transporte arrojó que el 51% de los vehículos de carga en Colombia consumen Diesel, el 48% utilizan la gasolina como combustible y un 1% utiliza gas natural.

La consulta a la base de datos de los CDRs arrojó que el 45% de los vehículos de carga registrados utilizan gasolina como combustible y 55% utilizan diesel.

Finalmente la encuesta realizada a 56 camiones arrojó que el 78% de camiones encuestados utilizan diesel como combustible, el 20% utiliza gasolina y un 2% utiliza gas natural.

Debido a las diferencias que se presentan en las cuatro fuentes de información consultadas en el caso de los camiones, se decidió utilizar los resultados obtenidos por el estudio del MT ya que coinciden con los resultados obtenidos de la consulta a la base de datos de los CDRs. De esta manera se consideró que un 51% de los camiones utilizan diesel, un 48% gasolina y un 1% utiliza gas natural como combustible.

¹ http://www.mintransporte.gov.co/Servicios/Biblioteca/documentos/PDF/Analisis_Parque_Automotor.pdf

Es necesario realizar estudios que generen información confiable para esta categoría vehicular.

A.3. Comparación Base de Datos de la STT y de los CDR´s

La base de datos de los centros de diagnóstico de Bogotá autorizados por el DAMA, CDR´s, se considera una base de datos de la flota activa en la ciudad es decir una base de datos dinámica. Sin embargo el número total de vehículos registrados no corresponde al total de vehículos circulando en la ciudad. La razón puede estar relacionado con la existencia de un número importante de vehículos que no están cumpliendo lo reglamentado en el artículo 28 de la Ley 769 de 2002 por la cual se expidió el Nuevo Código Nacional de Tránsito Terrestre, que dispone: "Para que un vehículo pueda transitar por el territorio nacional, debe garantizar como mínimo (...) cumplir con las normas de emisiones de gases que establezcan las autoridades ambientales". Adicionalmente se debe tener en cuenta que los vehículos nuevos se someterán a la primera revisión de gases al cumplir dos (2) años a partir del año de su matrícula.

El total de vehículos registrados en la base de datos de CDR´ se encuentra en la Tabla A.4.

Tabla A.4 Distribución de vehículos por categoría en Bogotá según los CDR´s 2004

| Categoría | No vehículos |
|------------------|---------------------|
| Automóvil | 256,846 |
| Bus | 6,172 |
| Buseta | 5,054 |
| Camioneta | 56,234 |
| Camión-Volqueta | 9,424 |
| Campero | 36,476 |
| Ejecutivo | 109 |
| Microbús | 6,814 |
| Otro | 671 |
| Tractomula | 204 |
| TOTAL | 378,004 |

Se realizó una comparación del total de vehículos registrados en la base de datos de la STT y en la base de datos de los CDR´s. Los resultados se presentan en la Tabla A.5

Tabla A.5 Distribución de vehículos por categoría en Bogotá según las bases de datos de la STT y los CDR´s 2004.

| Categoría | CDR´s | STT |
|------------------|----------------|----------------|
| Automóvil | 198,040 | 481,676 |
| Camioneta | 43,102 | 97,778 |
| Campero | 28,341 | 77,407 |
| Bus | 4,921 | 13,212 |
| Ejecutivo | 97 | |
| Buseta | 3,653 | 8,520 |
| Microbus | 5,295 | 12,364 |
| Moto | | 32,055 |
| Camión | | 18,214 |
| Camión-Volqueta | 7,172 | |
| Otro | 475 | 4,441 |
| Tractomula | 175 | |
| Tractocamión | | 737 |
| TOTAL | 291,271 | 746,404 |

Se puede apreciar que tan solo un 40% de los vehículos registrados en la base de la STT se encuentran registrados en la base de los CDR´s. Esto responde a las razones dadas anteriormente donde se mencionaba que la base de datos de los CDR´s es una base de datos dinámica que además responde a un requerimiento legal que en muchas ocasiones no es cumplido.

A.3.1 Análisis del Uso de Combustible

Se realizó el análisis del combustible utilizado por las diferentes categorías vehiculares registradas en las bases de datos de la STT y de los CDR´s. Las tablas A. 6 y A.7, presentan los resultados para cada una de las bases de datos respectivamente.

Tabla A.6 Distribución de vehículos por tipo de combustible en Bogotá según la base de dato de los CDR's 2004.

| Categoría | GASOLINA | DIESEL |
|------------------|-----------------|---------------|
| Automóvil | 197,465 | 579 |
| Bus | 229 | 4,694 |
| Buseta | 555 | 3,104 |
| Camioneta | 41,845 | 1,268 |
| Camión-Volqueta | 3,279 | 3,912 |
| Campero | 27,969 | 373 |
| Ejecutivo | 92 | 5 |
| Microbus | 2,767 | 2,535 |
| Otro | 309 | 166 |
| Tractomula | 35 | 140 |
| TOTAL | 274,545 | 16,776 |

Tabla A.7 Distribución de vehículos por tipo de combustible en Bogotá según la base de dato de a STT.

| | Total | Gasolina | Diesel | Gas | Gashol | Otro |
|-----------------|--------------|-----------------|---------------|------------|---------------|-------------|
| Automóvil | 481676 | 480623 | 1005 | 30 | 17 | 1 |
| Bus | 13212 | 4105 | 9083 | 12 | 12 | |
| Bus Articulado | 587 | 3 | 583 | 1 | | |
| Buseta | 8520 | 2259 | 5944 | 155 | 162 | |
| Camión | 18214 | 14414 | 3788 | 9 | 3 | |
| Camioneta | 97778 | 96272 | 1493 | 9 | 4 | |
| Campero | 77407 | 77008 | 391 | 8 | | |
| Ciclomoto | 9 | 9 | | | | |
| Doble Troque | 31 | 9 | 22 | | | |
| Maq. Agrícola | 35 | 26 | 9 | | | |
| Maq. Industrial | 480 | 412 | 65 | 3 | | |
| Micro bus | 12364 | 8010 | 4348 | 1 | 5 | |
| Minibus | 28 | 26 | | | | |
| Minitractor | 11 | 11 | | | | |
| Minivan | 3 | 2 | 1 | | | |
| Motocarro | 225 | 225 | | | | |
| Motocicleta | 32055 | 32034 | 4 | 17 | | |
| Motoneta | 173 | 173 | | | | |
| Sin información | 2312 | 2312 | | | | |
| Tractocamión | 737 | 235 | 501 | 1 | | |
| Tractor | 20 | 13 | 7 | | | |
| Trolebus | 335 | 2 | | | | 333 |

Los resultados obtenidos de la distribución de las diferentes categorías según el tipo de combustible utilizado para las dos bases de datos analizadas fueron similares en el caso de vehículos livianos. Sin embargo, se presentó una diferencia importante en el caso de las categorías de vehículos pesados (buses y camiones), siendo el caso de los camiones el más crítico. La Figura A.1 presenta los resultados de este análisis.

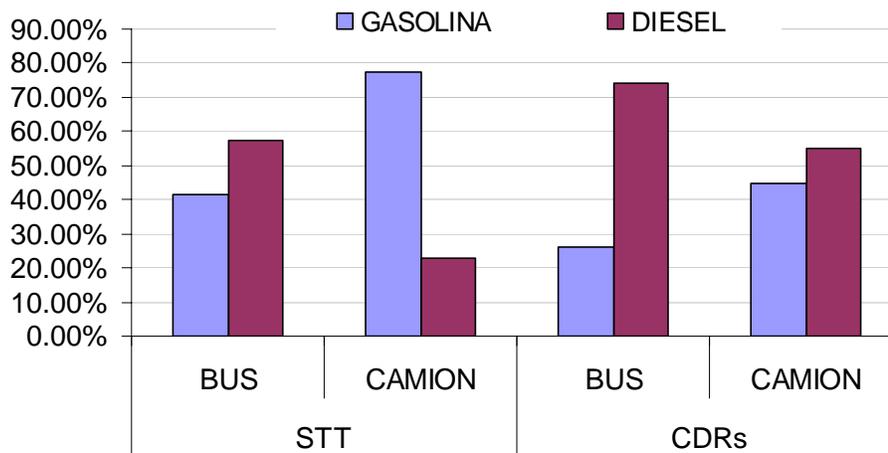


Figura A.1. Comparación de la distribución de buses y camiones según el tipo de combustible utilizado según la base de datos de la STT y la de los CDR's.

ANEXO B: Distribución de los Patrones de Conducción Según la Clasificación de Esfuerzo y Potencia de IVE.

Los patrones de conducción recolectados utilizando equipos GPS y siguiendo la metodología mencionada en el capítulo 5 fueron clasificados teniendo en cuenta la potencia del motor en cada momento del recorrido y el tipo de “estrés” al cual estaba sometido el vehículo. En el modelo IVE se presentan 60 categorías que representan 20 diferentes estados de potencia en el vehículo y 3 diferentes estados de “estrés”. Potencias negativas como ir bajando por una pendiente, reducir la velocidad o una combinación de estas corresponden a las categorías del número 1 al 11. Situaciones de cero o muy bajos niveles de potencia como esperar en un semáforo, corresponden a la categoría 12 y las categorías del 13 al 20 representan situaciones de potencia positiva como manejar a velocidad constante, acelerar, ir subiendo una pendiente o alguna combinación de estas.

La combinación de estos 20 diferentes estados de potencia con los tres estados de “estrés” a los cuales puede estar sometido el vehículo conforman un total de 60 categorías en las que se puede clasificar la información recolectada con GPS. Los tres estados de “estrés” se denominan “bajo”, “medio” y “alto”. Un estado de estrés “bajo”, representa condiciones en las cuales el vehículo luego de los último 20 segundos de operación tiene valores de velocidad y aceleración bajos al igual que la revolución del motor. El estado de estrés alto ocurre a velocidades y aceleraciones altas luego de los más recientes 20 segundos y la revolución del motor es alta.

A continuación se presenta la clasificación de los patrones de conducción de cada categoría vehicular según el estado de potencia y estrés del motor.

B.2. Motos

Tabla B.4: Distribución de los patrones de conducción de motos según la potencia y el estrés del motor

| Grupo de estrés | Clasificación según la potencia del motor | | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Bajo | 0.03% | 0.01% | 0.01% | 0.02% | 0.03% | 0.10% | 0.22% | 0.60% | 1.29% | 2.98% |
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| | 7.28% | 51.02% | 14.16% | 15.01% | 5.76% | 0.95% | 0.09% | 0.03% | 0.01% | 0.01% |
| Medio | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Alto | 0.01% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.11% | 0.15% | 0.04% | 0.02% | 0.05% |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |

B.3. Taxis

Tabla B.5: Distribución de los patrones de conducción de taxis según la potencia y el estrés del motor

| Grupo de estrés | Clasificación según la potencia del motor | | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Bajo | 0.02% | 0.01% | 0.03% | 0.05% | 0.08% | 0.17% | 0.36% | 0.75% | 1.59% | 3.45% |
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| | 8.42% | 49.51% | 15.69% | 11.27% | 5.78% | 1.68% | 0.28% | 0.08% | 0.02% | 0.01% |
| Medio | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Alto | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.01% | 0.01% | 0.24% | 0.31% | 0.10% | 0.03% | 0.02% |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |

A.4. Buses

Tabla B.6: Distribución de los patrones de conducción de buses según la potencia y el estrés del motor

| Grupo de estrés | Clasificación según la potencia del motor | | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Bajo | 0.01% | 0.00% | 0.01% | 0.02% | 0.05% | 0.14% | 0.33% | 0.68% | 1.43% | 2.77% |
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| | 5.76% | 47.98% | 20.51% | 15.95% | 3.75% | 0.35% | 0.07% | 0.03% | 0.01% | 0.03% |
| Medio | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.01% | 0.02% | 0.03% | 0.01% | 0.01% | 0.02% |

ANEXO C: Distribución por Categorías Vehiculares en Bogotá a Partir de una Base de Datos Dinámica y una Estática.

Como se mencionó en la sección 5.3.3 la información recolectada durante la campaña de medición, realizada en este proyecto, se refiere a información dinámica, lo que está teniendo en cuenta no sólo el número de vehículos sino el factor de actividad. Para entender mejor este concepto de flota dinámica se utilizó la información del total de vehículos registrados hasta Julio del 2004 en la base de datos de la STT y consultando la opinión de expertos en el tema de Transportes, se obtuvieron valores de kilometraje recorrido al día por cada una de las categorías.

Con esta información se realizó el cálculo de la distribución por categorías en las vías, multiplicando el número de vehículos por su factor de actividad, y se comparó con los resultados obtenidos con la metodología utilizada durante el proyecto IVE. Las tablas C.1 y C.2 presentan los resultados de esta comparación.

Tabla C.1 Kilómetros recorridos por las diferentes categorías de vehículos según la base de datos de la secretaría de tránsito de Bogotá

| Categoría | Vehículos pasajeros | Motos | Taxis | Buses | Camión Grande y Mediano | Camión pequeño | Todos |
|--------------------------------------------------|---------------------|-----------|------------|-----------|-------------------------|----------------|------------|
| Número de vehículos | 788,000* | 32,000 | 50,000 | 35,000 | 15,000 | 3,000 | 925,000 |
| Kilómetros recorridos (km/veh/d) | 25 | 70 | 200 | 180 | 70 | 100 | 43 |
| Kilómetros recorridos por categoría (km/d) | 20'000,000 | 2'240,000 | 10'100,000 | 6'300,000 | 1'060,000 | 296,000 | 40'000,000 |
| Fracción Kilómetros recorridos por categoría (%) | 50% | 6% | 25% | 16% | 3% | 1% | 100% |

*Este valor en la base de datos de la STT es de aproximadamente 600,000 sin embargo, debido a que esta base de datos contiene los vehículos registrados en Bogotá se supone que un 30% de los vehículos de pasajeros que circulan por la ciudad tienen matrículas de otras ciudades.

Tabla C.2. Comparación de la información de kilómetros recorridos por las diferentes categorías de vehículos en Bogotá utilizando la base de datos de la STT y la de IVE.

| Tipo de vehículo | Fracción Kilómetros recorridos, IVE | Fracción Kilómetros recorridos, STT |
|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Vehículo pasajero | 46% | 50% |
| Taxi | 29% | 25% |
| Moto | 6% | 6% |
| Bus | 13% | 16% |
| Camión | 6% | 3% |
| Total | 100% | 100% |

Los resultados presentados en la Tabla C.2 muestran que los valores para la mayoría de las categorías son similares en las dos fuentes de información. Se presenta una diferencia importante en la categoría de camiones al ser el valor obtenido a partir de la base de datos de la STT la mitad del valor obtenido del análisis de los datos en IVE. Es un resultado que puede ser explicado al pensar que existe un número importante de camiones que circulan por la ciudad pero no se encuentran registrados en la base de datos de la secretaría debido a que cuentan con matrículas de otros lugares lo cual puede ser la razón de un valor bajo en los datos de la STT. Estos resultados demuestran la importancia de trabajar con bases de datos dinámicas que presentan la información de los vehículos circulando por la ciudad.

ANEXO D: Emisiones en Frío y en Caliente de los Diferentes Contaminantes.

Tabla D.1. Emisiones en frío y en caliente de diferentes contaminantes en la ciudad de Bogotá.

| | Ton/d | | |
|------------------|---------|-------------|-------|
| | En frío | En caliente | Total |
| CO | 585 | 1899 | 2485 |
| VOC | 29 | 180 | 209 |
| NO _x | 17 | 132 | 149 |
| SO _x | 0.3 | 6 | 7 |
| PM ₁₀ | 0.4 | 6 | 6 |
| B | 0.0 | 0.4 | 0.4 |
| A | 0.1 | 1 | 1.5 |
| F | 0.4 | 5 | 5 |
| NH ₃ | 0.2 | 3 | 3 |
| Be | 0.3 | 7 | 7 |
| CO ₂ | 412 | 13603 | 14015 |
| N ₂ O | 0.0 | 0.3 | 0.3 |
| CH ₄ | 6 | 36 | 42 |

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi familia y a Dios que siempre me han apoyado incondicionalmente.

Quiero agradecer a todas las entidades que nos colaboraron y sin las cuales no hubiera sido posible recolectar la información necesaria para este proyecto: DAMA, Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá, Ministerio de Transporte, Gas Natural Vehicular, Servientrega y ECOPETROL.

Quiero agradecer a todas las personas que participaron en la campaña de medición ya que gracias a su entusiasmo y buena voluntad fue todo un éxito.

Quiero dar las gracias al Centro Internacional de Investigación de Sistemas Sostenibles (ISSRC), a la Universidad de California, a la Universidad de Chile y a la Universidad de Los Andes por dejarme formar parte de este proyecto y por facilitarme todas las herramientas necesarias para el desarrollo de esta tesis.

Quiero agradecer a Arturo Ardila, Néstor Rojas y Eduardo Uribe por su apoyo y comentarios que fueron de gran importancia para el cumplimiento de los objetivos de este proyecto.

A Maria Carolina Pulido y Tatiana Suárez gracias por su apoyo y acompañamiento durante este proceso.

A Diego Echeverry quiero agradecerle especialmente por todo su apoyo y enseñanzas.

A Mauricio Osses quiero darle las gracias de manera especial por confiar en mí y por transmitirme no sólo conocimientos técnicos sino la mejor de las energías.

Y finalmente quisiera agradecer de manera muy especial a Eduardo Behrentz por ser un excelente y el mejor de los profesores, por haber sido un apoyo permanente e incondicional durante este proceso, por enseñarme cómo piensa un investigador y por ser un ejemplo a seguir. Eduardo muchísimas gracias por todo, haber trabajado contigo ha sido de las cosas que más me han hecho crecer como profesional y como persona. Gracias

-
- ii Martha Patricia Ibáñez. "Evaluación y caracterización del parque automotor de transporte público individual y colectivo en Bogotá D.C y confrontación con la flota necesaria para satisfacer la demanda actual de viajes en este modo.
- iii Estimación de contaminantes y gases efecto invernadero de fuentes móviles en la ciudad. Universidad de Los Andes, 2004.
- iv Martha Patricia Ibáñez. "Evaluación y caracterización del parque automotor de transporte público individual y colectivo en Bogotá D.C y confrontación con la flota necesaria para satisfacer la demanda actual de viajes en este modo
- v Martha Patricia Ibáñez. "Evaluación y caracterización del parque automotor de transporte público individual y colectivo en Bogotá D.C y confrontación con la flota necesaria para satisfacer la demanda actual de viajes en este modo
- vi Según la base de datos estática de vehículos registrados en la ciudad de la STT.
- vii Base de datos centros de diagnósticos autorizados para Bogotá. Informe de vehículos de carga en Colombia. Ministerio de transporte, 2004
- viii Martha Patricia Ibáñez. "Evaluación y caracterización del parque automotor de transporte público individual y colectivo en Bogotá D.C y confrontación con la flota necesaria para satisfacer la demanda actual de viajes en este modo"
- viii Estudio de la Actividad Vehicular en Sao Paulo. James Lents et al. 2004
- viii Martha Patricia Ibáñez. "Evaluación y caracterización del parque automotor de transporte público individual y colectivo en Bogotá D.C y confrontación con la flota necesaria para satisfacer la demanda actual de viajes en este modo.
- viii Estimación de contaminantes y gases efecto invernadero de fuentes móviles en la ciudad. Universidad de Los Andes, 2004.
- viii Martha Patricia Ibáñez. "Evaluación y caracterización del parque automotor de transporte público individual y colectivo en Bogotá D.C y confrontación con la flota necesaria para satisfacer la demanda actual de viajes en este modo
- viii Martha Patricia Ibáñez. "Evaluación y caracterización del parque automotor de transporte público individual y colectivo en Bogotá D.C y confrontación con la flota necesaria para satisfacer la demanda actual de viajes en este modo
- viii Según la base de datos estática de vehículos registrados en la ciudad de la STT.
- viii Base de datos centros de diagnósticos autorizados para Bogotá. Informe de vehículos de carga en Colombia. Ministerio de transporte, 2004
- viii Martha Patricia Ibáñez. "Evaluación y caracterización del parque automotor de transporte público individual y colectivo en Bogotá D.C y confrontación con la flota necesaria para satisfacer la demanda actual de viajes en este modo"