

ESTIMACIÓN DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE LAS FUENTES MÓVILES DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ

V. Manzi*; L.C. Belalcazar**; E. Giraldo***; E. ZARATE****; A. CLAPPIER*****

RESUMEN

Se seleccionó, adaptó y aplicó una metodología práctica y económica para determinar las emisiones del parque automotor de la ciudad de Bogotá. La metodología está basada en mediciones de calidad de aire, parámetros meteorológicos, conteos de vehículos y la aplicación inversa de un modelo de calidad de aire. Se presentan los resultados de un estudio de trazadores con el cual se validó la aplicación del modelo empleado. Se reportan los factores de emisión promedio de los contaminantes evaluados para vehículos livianos, pesados y para todos los vehículos. Las emisiones de los vehículos pesados son considerablemente mayores a las de los vehículos livianos.

ABSTRACT

An economical and practical methodology was selected, adapted and applied to determine emissions from the actual vehicular fleet of Bogotá city. The methodology is based on air quality and meteorological measurements, traffic counts and inverse application of an air quality model. Results from a tracer study are presented here, which were used to validate the application of air quality model. The emission factors from light duty, heavy duty and for all vehicles are presented here for all the pollutants evaluated. Emissions from heavy duty vehicles are higher than those from light duty vehicles.

Palabras clave: Contaminación del aire, emisión vehicular, modelación inversa, Bogotá

1. INTRODUCCIÓN

Al igual que la gran mayoría de las ciudades del mundo, la ciudad de Bogotá afronta problemas por la contaminación atmosférica. Debido a esto, y con el fin de implementar medidas que

permitan solucionar definitivamente este problema, a principios del año 2001 la Universidad de los Andes en convenio con el DAMA y la Escuela Politécnica Federal de Suiza (EPFL), iniciaron el desarrollo de un inventario de emisiones para la ciudad de Bogotá. Este inventa-

* Estudiante del Magíster, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
e-mail: v-manzi@uniandes.edu.co

** Ingeniero Investigador, CIAA, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
e-mail: lbelaca@uniandes.edu.co

*** Profesor Investigador, CIAA, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

**** PhD candidate, Escuela Politécnica Federal de Lausona (EPFL- Suiza) , e-mail: erika.zarate@epfl.edu.ch

***** Profesor investigador, Escuela Politécnica Federal de Lausona (EPFL- Suiza) , e-mail: alain.clappier@epfl.edu.ch

rio forma parte del proyecto *Modelo de Calidad del Aire para Bogotá*. El objetivo de este inventario de emisiones es identificar a las fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos. Una vez las fuentes sean identificadas, la autoridad ambiental podrá enfocar mejor los esfuerzos y empleará mejor los recursos disponibles.

Las metodologías disponibles para el desarrollo de los inventarios de emisiones se basan en factores de emisión que son válidos solamente para los países en donde fueron obtenidos. En la mayoría de los países en desarrollo (incluyendo a Colombia) aún no se han estimado los factores de emisión, esto se debe principalmente a que no se cuenta con los recursos técnicos y económicos que se requieren para tal fin. Algunas ciudades Latinoamericanas han desarrollado inventarios de emisiones adoptando los factores de emisión de otros países. A pesar de que estos inventarios son aproximados, los resultados indican que los vehículos automotores emiten cantidades significativas de contaminantes a la atmósfera [1], [2]. En la ciudad de Bogotá se realizaron inventarios preliminares de emisiones que arrojaron resultados similares [3], [4], [5].

Por todas estas razones se hace necesario estimar los factores de emisión de fuentes móviles (FE) empleando una metodología que se adapte a los recursos disponibles en las ciudades de países en desarrollo como Bogotá. Al evaluar las diferentes metodologías disponibles se encontró que aunque existen diferentes procedimientos experimentales para la estimación de los FE, la mayoría de dichos procedimientos son costosos y los resultados que se obtienen no son del todo satisfactorios. Sin embargo, recientemente se desarrolló una metodología que se conoce como *aplicación inversa de modelos de dispersión* y que permite estimar los FE de manera práctica y económica. La aplicación inversa de modelos de dispersión se ha usado en ciudades como Copenhague – Dinamarca [6], Córdoba – Argentina [7], San Petersburgo – Rusia [8], entre otras. Se llegó a la conclusión que la aplicación inversa de un

modelo de dispersión es una alternativa viable para la estimación de los FE en ciudades en donde no se dispone de los recursos para aplicar otras metodologías. En este artículo se presentan los resultados obtenidos empleando esta metodología para la estimación de los FE del parque vehicular de la ciudad de Bogotá.

2. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

La aplicación inversa de modelos de dispersión puede hacerse para diferentes ambientes urbanos: en calles cerradas, cañones urbanos “Street Canyon SC” [6], [7], [8] o en calles abiertas y autopistas [9]. Para cada una de estas configuraciones se han desarrollado modelos que simulan el transporte y la dispersión de los contaminantes generados en la vía. En este estudio se utilizó la configuración de calle conocida como *cañón urbano* (*street canyon* o SC). Los SC’s son calles conformadas por edificios a ambos lados, los cuales le otorgan una configuración de cañón. La dispersión de contaminantes en un SC depende de factores tales como: velocidad y dirección del viento predominante, aspectos geométricos como la orientación, la altura de los edificios, y el ancho de la calle, etc [10]. Esta configuración facilita la modelación por cuanto los edificios minimizan las interacciones del ambiente que se encuentra confinado dentro del cañón con sus alrededores.

Los modelos de calidad del aire inicialmente se desarrollaron para estimar las concentraciones de los contaminantes dentro de los SC, a partir de las variables relacionadas con su origen y dispersión (tráfico, meteorología, geometría de la calle). La estimación de las emisiones por medio de la modelación inversa se logra midiendo las concentraciones de los contaminantes en el interior del cañón urbano y alimentando el modelo con la información de las otras variables involucradas.

Si se tiene en cuenta que los contaminantes a esta escala espacial y temporal se consideran poco reactivos, las concentraciones de los con-

taminantes en la calle se pueden relacionar con los fenómenos implicados en la dispersión y con la cantidad emitida de contaminantes (emisiones) por medio de la siguiente ecuación general:

$$C_h = F_{h(\text{modelo})} E_h + C_{h \text{ base}} \quad (1)$$

En esta expresión, C_h corresponde a la concentración promedio de un contaminante cualquiera en el interior del SC para un periodo de tiempo o una hora h [M/L^3]; E_h es la cantidad del contaminante emitido por un vehículo promedio (Veh) que transitan por la calle en la hora h [$M/L \cdot \text{veh.}$]; $C_{h \text{ base}}$ corresponde a la concentración de contaminantes presente dentro y fuera del SC en la hora h y que proviene de fuentes diferentes a los vehículos que circulan por el SC [M/L^3]. $F_{h(\text{modelo})}$ es una función que describe el proceso de dispersión del contaminante emitido (Veh/L^2). Este parámetro se estima alimentando el modelo con la información de las variables involucradas (geometría de la calle, tráfico, meteorología). Por lo tanto, si se miden las concentraciones de contaminantes en el interior del SC (C_h) en una hora h durante varios días, y si al mismo tiempo se registran todas las variables que se requieren para calcular $F_{h(\text{modelo})}$, al graficar C_h Vs $F_{h(\text{modelo})}$, la pendiente de la recta que mejor represente a los datos corresponderá a la emisión (E_h) y el intercepto a la concentración base $C_{h \text{ base}}$ (figura 1)

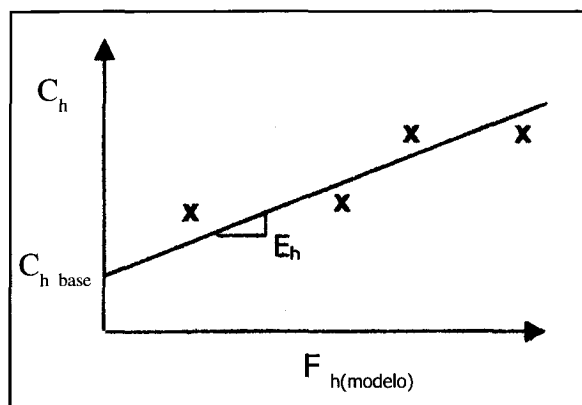


Figura 1. Cálculo de la emisión horaria empleando la metodología inversa
 E_h es la emisión generada por un vehículo de

una categoría promedio. El factor de emisión para una categoría específica se estima a partir de E_h y de conteos detallados de vehículos. Si se consideran dos categorías de vehículos, livianos y pesados, para una hora específica, E_h se relaciona con el número de vehículos de cada categoría que circulan durante esa hora y con los factores de emisión de esa categoría de la siguiente manera:

$$E_h * N_h = N_{Lh} * F_l + N_{Ph} * F_p \quad (2)$$

N_{Lh} y N_{Ph} corresponde al número de vehículos livianos y pesados que pasaron por el SC en la hora h , N_h es el número total de vehículos que pasaron por el SC en la hora h ($N_{Lh} + N_{Ph}$); F_l y F_p corresponden a los factores de emisión de cada categoría. Desarrollando la ecuación (2) para varios periodos de tiempo se tendrán tantas ecuaciones como periodos de tiempo, en este caso con al menos dos ecuaciones linealmente independientes se obtendrían los factores de emisión para las dos categorías de interés. La ecuación (2) podría plantearse para un número mayor de incógnitas, la condición para el éxito en la solución de las ecuaciones es que los vehículos de diferentes categorías tengan una variación diurna diferente en el flujo del tráfico para garantizar que las ecuaciones sean linealmente independientes. Como se explica más adelante, en esta investigación solamente fue posible obtener los FE para las dos categorías mencionadas.

Como se observa, es posible determinar los FE de fuentes móviles si se recolecta la información relacionada con las variables involucradas (meteorología, tráfico, concentración de contaminantes en el interior y fuera del SC, etc). Por lo tanto, para estimar los FE de las fuentes móviles de Bogotá se realizó una campaña de medición en el mes de diciembre del año 2002. En esta campaña se monitorearon las variables involucradas y adicionalmente se desarrolló un experimento de trazadores por medio del cual se seleccionó el modelo de dispersión que mejor representa los fenómenos que ocurren en el interior del SC seleccionado.

3. CAMPAÑA DE MEDICIÓN

El sitio en el cual se realizaron las mediciones es el SC ubicado en la carrera 7 entre calle 13 y avenida Jiménez. En este punto la carrera séptima es una vía constituida por tres carriles de un sólo sentido y de alto flujo vehicular, por donde pasa un parque automotor representativo de la ciudad.

Geometría de la calle: El SC seleccionado presenta las siguientes características (figura 2): ancho de la calle (W) de 23 m; altura promedio de los edificios (H) de 35 m; orientación de la calle con respecto al norte: 60°.

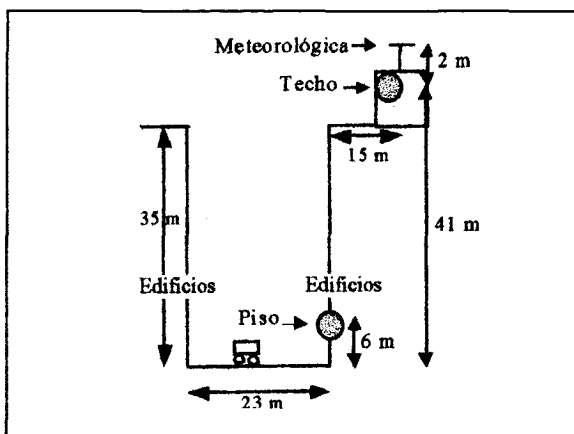


Figura 2. Características del SC y ubicación de las estaciones de medición piso y techo.

Meteorología: La variable meteorológica que más incide en la dispersión de contaminantes en un SC es el viento. Por esta razón, durante la campaña de medición se midió la dirección y velocidad de viento 2 m por encima de la estación techo. Estas mediciones se realizaron usando un anemómetro automático de copas de dos direcciones.

Tráfico: Con el fin de conocer las características del tráfico vehicular que circuló por el SC, durante toda la campaña en las horas de más alta intensidad vehicular (6:00 AM – 8:00 PM) se realizaron mediciones manuales de volumen, composición y velocidad de los vehículos. Los registros se clasificaron en dos categorías de acuerdo al combustible empleado por los vehí-

culos así: vehículos livianos o a gasolina (motocicletas, automóviles, taxis, colectivos, busetas, utilitarios); vehículos pesados o a diesel (buses y camiones).

Concentraciones de contaminantes: Para estimar los FE se realizaron mediciones de calidad del aire de 5 contaminantes: CO, SO₂, NO_x, material particulado (PM10) y compuestos orgánicos volátiles (COV) (estaciones piso y techo, figura 2). CO, SO₂ y NO_x se monitorearon durante toda la campaña empleando equipos analizadores automáticos. Por otro lado, debido al alto costo del monitoreo de COV y PM10, estos contaminantes se monitorearon durante periodos más cortos, se cuenta con concentraciones de COV promedio horarias para dos días, y concentraciones promedio de 6 horas para PM10 durante cuatro días.

Estudio de trazadores: Este estudio se desarrolló para seleccionar el modelo que mejor represente el transporte y la dispersión de los contaminantes emitidos en el SC y para calibrar el modelo seleccionado. El experimento consistió en emitir una tasa conocida de un gas trazador inerte (SF₆) y medir la concentración resultante de dicha emisión en el punto de medición piso, no fue necesario medir la concentración en el techo por cuanto en el aire ambiente no existe este compuesto [11].

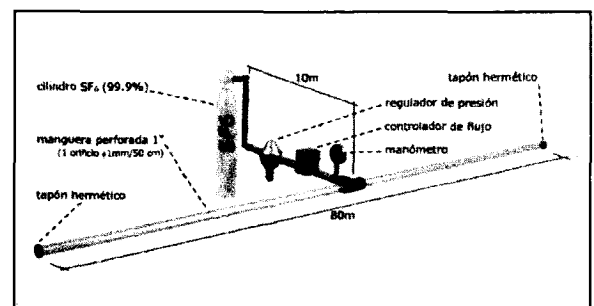


Figura 3. Sistema de emisión empleado en el estudio de trazadores

Para el estudio de trazadores se montó el sistema que aparece en la figura 3. Este montaje se diseñó para simular la emisión de contaminan-

tes generada por los vehículos en el SC. Este sistema tenía un cilindro que contenía almacenado el gas trazador; el cilindro se conectó a una tubería a la cual se le abrieron perforaciones de 1 mm de diámetro cada 50 cm. El sistema estaba provisto de un controlador de flujo con el cual se fijó la tasa de emisión deseada. El SF₆ se emitió durante dos horas continuas a una tasa de $1.217 \times 10^{-3} \text{ gm}^{-1}\text{s}^{-1}$. En el punto de medición se recolectaron muestras de aire con bolsas tedlar cada hora. La concentración del trazador presente en la muestra se determinó por cromatografía de gases. Para fijar esta tasa de emisión, antes del experimento se alimentaron algunos modelos para SC con información meteorológica y de tráfico proveniente de estudios previos y con las concentraciones esperadas del trazador en el punto de muestreo, estas concentraciones se definieron con base en los límites de detección del cromatógrafo.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Meteorología: La dispersión de los contaminantes en el interior de un SC depende en gran medida de la velocidad y dirección del viento predominantes. Los registros meteorológicos revelaron que la velocidad del viento medida a nivel de techo fue menor que 1 m/s el 90% de las veces; la dirección del viento en la mayoría de los casos fue paralela al eje de SC. De acuerdo a esto se considera que predominaron los vientos en calma (< 1m/s), en esta condición es poco significativa la influencia de la dirección del viento en la dispersión de los contaminantes.

Tráfico: Uno de los aspectos más importantes en la estimación de los FE para fuentes móviles, es el tamaño de la muestra de vehículos y su representatividad del parque automotor de la ciudad. Los resultados de los conteos de vehículos mostraron que durante todo el período de medición se registró un volumen total de 359.000 vehículos, este volumen es bastante significativo si se compara con los tamaños de muestra empleados en estudios donde se utilizaron metodologías tradicionales, en dichos

estudios el tamaño de la muestra llega a ser 1 a 2 % del parque automotor [12]. Con las metodologías tradicionales es difícil evaluar un número mayor de vehículos por cuanto las pruebas experimentales son bastante costosas.

Por otro lado, en el periodo de medición se registraron velocidades de circulación menores a 60 Km/h con un promedio de 30 Km/h. Las metodologías tradicionales a pesar de que emplean tamaños de muestra menores, permiten estimar los factores de emisión para diferentes velocidades. En esta investigación se reportan los FE para un rango de velocidades (de 0 a 60 Km/h). Debido a esto, cuando se emplee la modelación inversa para estimar los FE se debe prestar especial atención a la selección del sitio de muestreo por cuanto éste debe representar adecuadamente las condiciones predominantes en la ciudad.

Estudio de trazadores y selección del modelo:

Aunque existe una gran variedad de modelos de dispersión para SC, en este estudio se probaron los tres modelos más reconocidos: Modelo de Caja [13], OSPM [14] y STREET [15]. Los modelos seleccionados se alimentaron con la información meteorológica y de tráfico presente en el SC durante el estudio de trazadores, y se estimaron las concentraciones de SF₆ en el punto de medición. Estos resultados se compararon con los valores obtenidos durante el estudio de trazadores (figura 4)

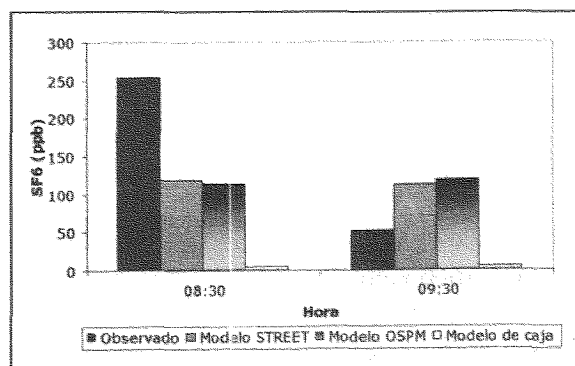


Figura 4. Comparación de las concentraciones de SF₆ estimadas con los modelos STREET, OSPM y de caja, con los resultados observados durante el estudio de trazadores.

En la figura 4 se observa que el modelo de caja no reproduce adecuadamente los fenómenos presentes en el SC y por eso fue descartado. Por otro lado, a pesar de que con el modelo OSPM se estiman concentraciones que están en el rango de los valores medidos, cuando se intentó estimar la emisión E_h empleando la metodología descrita anteriormente (figura 1), se encontró que las rectas que mejor se ajustaban a los datos presentaban bajos coeficientes de correlación (R), mientras que al emplear el modelo STREET los coeficientes de correlación eran significativamente mayores. Por lo tanto, el modelo seleccionado para la estimación de los FE de la manera propuesta en esta investigación fue el STREET. A pesar de que el modelo STREET fue desarrollado hace ya varios años y que es un modelo simplificado, aún está vigente y es ampliamente utilizado. En la referencia [15] se describe en detalle la deducción de este modelo.

Los resultados del estudio de trazadores también se utilizaron para calibrar este modelo. El proceso de calibración consistió en ajustar el coeficiente de dispersión que emplea el modelo STREET. La diferencia entre el coeficiente de dispersión estimado y el empleado por STREET fue de apenas un 9 %. Esta pequeña diferencia indica que el modelo STREET re-

presenta bien la dispersión de contaminantes en cualquier cañón urbano.

Factores de emisión: Con base en la información recolectada se estimaron los factores de emisión según lo descrito en el apartado 2. Los coeficientes de correlación obtenidos al graficar C_h Vs $F_{h(\text{modelo})}$ para los diferentes contaminantes en general estuvieron entre 0.7 y 0.8. Sin embargo, para algunas horas del día estos coeficientes fueron inferiores a 0.7; al parecer en estas horas predomina la influencia de variables que no se incluyen en el modelo STREET y por eso las correlaciones son más bajas.

En este estudio se reportan los FE para dos categorías, vehículos livianos y vehículos pesados. No fue posible obtener FE para más categorías de vehículos debido a que cuando se plantearon ecuaciones como la (2) pero incluyendo más categorías, los sistemas de ecuaciones obtenidos no se pudieron resolver o al resolverlos se obtenían FE negativos. En la Tabla 1 se presentan los FE de las fuentes móviles vehiculares de la ciudad de Bogotá, obtenidos mediante la aplicación inversa del modelo STREET. Los FE se comparan con los obtenidos en otras investigaciones, se incluye también los resultados obtenidos mediante una metodología tradicional en Santiago de Chile (dinamómetro).

Tabla 1 FE estimados para la ciudad de Bogotá empleando la modelación inversa y comparación con otros estudios ($g\ km^{-1}\ veh^{-1}$)

Ciudad	Categoría	CO	NO _x	SO ₂	COV	PM10	Método	Fuente
Bogotá (C)	Todos	15.47 ± 2.84	0.41 ± 0.09	0.10 ± 0.02	5.58	0.35 ± 0.08	Inverso	Esta investigación
	Livianos	8.27 ± 1.96	0.11 ± 0.02	0.06 ± 0.02	-	0.27		
	Pesados	385.2 ± 142.3	18.9 ± 0.37	2.82 ± 1.12	-	2.38		
Córdoba (A)	Todos	21.7 ± 0.3	0.94 ± 0.02	-	-	-	Inverso	[7]
San Petersburgo (R)							Inverso	[8]
	Livianos	-	0.63	-	-	-		
	Pesados	-	5.33	-	-	-		
Copenhague (D)	Todos	11 ± 2	1.3 ± 0.2	-	-	-	Inverso	[9]
Santiago de Chile								
	Livianos*	3.5 ± 3.9	0.6 ± 0.8	-	-	-	Dinamómetro	[16]
	Livianos**	28.2 ± 15.5	3 ± 1.1	-	-	-		

* Vehículos con catalizador; ** Vehículos sin catalizador

Como se observa en la tabla 1, aunque las emisiones generadas por los vehículos pesados son mucho mayores que las generadas por los vehículos livianos, estas cantidades no influyen significativamente en el FE promedio de todos los vehículos, esto se debe a que el volumen de vehículos pesados registrado durante la campaña fue mucho menor que el de vehículos livianos. Aún así, las emisiones generadas por los vehículos pesados son muy significativas. Esto indica de manera preliminar hacia donde se deben enfocar los esfuerzos para mitigar la contaminación atmosférica de Bogotá. De todas maneras para obtener conclusiones definitivas es necesario estimar la emisión total generada en Bogotá por las diferentes fuentes, esto se logrará cuando se finalice el inventario de emisiones.

Los FE de los vehículos livianos de la ciudad de Bogotá son relativamente inferiores a los que se reportan en los otros estudios; por el contrario, los FE de vehículos pesados en el caso de los NO_x son mucho mayores que los que se reportan en San Petersburgo. Se advierte que la ciudad de Bogotá presenta una mayor diferencia entre los FE de vehículos livianos y pesados que la que se reporta en otras ciudades del mundo.

Las desviaciones estándar de los resultados obtenidos mediante la aplicación inversa de modelos de dispersión son significativamente inferiores a las reportadas en el estudio de Santiago de Chile. Esta diferencia se debe al tamaño de la muestra que se emplea en las diferentes metodologías; mientras en esta investigación el tamaño de la muestra fue de casi 400 mil vehículos, en el estudio de Santiago solo se muestrearon 166 automóviles.

5. CONCLUSIONES

- Se logró seleccionar, aplicar y adaptar exitosamente una metodología práctica y económica para la estimación de los FE de la ciudad de Bogotá, involucrando de manera sencilla un tamaño de muestra altamente represen-

tativo para esta determinación, sobrepasando de esta manera una de las grandes limitaciones de las metodologías tradicionales.

- El experimento de trazadores demostró que la estimación de los FE mediante la modelación inversa puede lograrse utilizando un modelo simplificado como el modelo STREET.

- Los vehículos pesados o a diesel de la ciudad de Bogotá emiten cantidades significativas de contaminantes en comparación con los vehículos livianos o a gasolina. El impacto real de cada una de las diferentes fuentes se determinará una vez se finalice el inventario general de emisiones de la ciudad de Bogotá.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Secretaría del Medio Ambiente de México, D.F, 1998. Inventario de emisiones, Zona Metropolitana del Valle de México.
2. Toro, V. 2001. Emission inventory in Medellin (Colombia) city; an approximation. 3rd International Conference on Urban Air Quality & 5th SATURN Workshop. Loutraki (Greece).
3. Agencia de Cooperación Internacional del Japón JICA. 1992. Plan para el control de la polución del aire en el área de la ciudad de Santafé de Bogotá.
4. DAMA. 2001. Plan de gestión del aire para el Distrito Capital 2000-2009.
5. UNIANDES. 2002. Inventario Preliminar de Emisiones para la Ciudad de Bogotá. Informe semestral III. Proyecto diseño e implementación de un modelo de calidad de aire para Bogotá.
6. Palmgren, F., Berkowicz, R., Ziv, A., y Hertel, O. 1999. Actual car fleet estimated from urban air quality measurements and street pollution models. *The Sciences of the Total Environment* 235. 101-109.
7. Olcese, L. E., Palancar, G. G. y Toselli, B. M. 2001. An inexpensive method to estimate CO and NO_x emissions from mobile sources. *Atmospheric Environment* 35: 6213-6218.
8. Ziv, A., Berkowicz, R., Genikhovich, E., Palmgren, F., Iakovleva, E. 2001. Analysis of the St. Petersburg traffic data using the OSPM model. Subproyecto SATURN. International.
9. Gramotnev, G., Brown, Z., Ristovski, Z., Hitchins, J., Morawska, L. 2003. Determination of average emission factors for vehicle on a busy road. *Atmospheric Environment*. 37:465-474.

10. Vardoulakis, S. Fisher, B. 2002. Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment* 37 (2003)155 –182
11. Seinfeld, J. 1998. *Atmospheric chemistry and physics*. Wiley-Interscience.
12. Ando A., Harrington, W., MaConnel, V. 1999. Estimating full IM240 emissions from partial test results evidence from arizona. *J. Air & Waste management Association*. 49: 1153-1167.
13. Coppalle, A. y Abart, B. 2001. A screening model for the calculation of pollutant accumulation in street canyons. *7th Int. Conf. On harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes, mayo 2001*.
14. Berkowicz, R., Hertel., O., Larsen, S.E., Sorensen, N.N. y Nielsen, M. 1997. *Modelling traffic pollution in streets*. Ministry of Environmental Research Institute. Denmark.
15. Ludwig, F. *Selecting sites for carbon monoxide monitoring*. Environmental Protection Agency. 1975.
16. Corvalán, R. & Urrutia, C. 2000. Emission factors for gasoline light-duty vehicles: experimental program in Santiago, Chile. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 50: 2102-2111.