

Revisión de inventarios de emisiones con fines de modelización de calidad del aire en Bogotá

Nelson E. Peñaloza¹, Néstor Y. Rojas, Luis C. Belalcázar

1. Hospital de Fontibón, E-mail: nepenalozap@gmail.com

2. Grupo de Investigación en Calidad del Aire, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Universidad Nacional de Colombia, Calle 44 45-67, Bloque B5 Oficina 407. E-mail: nyrojasr@unal.edu.co.

Introducción

Una de las herramientas empleadas para el estudio de la contaminación atmosférica en centros urbanos son los inventarios de emisión, ya que proporcionan información en un tiempo determinado sobre las cantidades de contaminantes que liberan a la atmósfera las diferentes fuentes de emisión ubicadas en un área geográfica. Con la información obtenida en un inventario de emisiones se puede evaluar el estado de la calidad del aire, estudiar los problemas de la contaminación atmosférica, evaluar la eficacia de las políticas de contaminación del aire y alimentar modelos de calidad de aire (USEPA, 1999). Los estudios de calidad del aire realizados mediante modelos de dispersión requieren información sobre la cantidad de contaminantes en cada punto de un área bajo estudio en intervalos temporales definidos, de tal manera que los inventarios de emisión estimados con fines de modelación de la calidad del aire deben ser agregados en el espacio y en el tiempo.

En este trabajo, se describen brevemente diversas experiencias de distribución espacial y temporal de inventarios de emisiones con fines de modelación, tanto en el escenario internacional como en Colombia.

Inventarios de emisiones y su desagregación espacial y temporal

Un inventario de emisiones es una lista completa actualizada, por fuente, de las emisiones de contaminantes del aire, y cubre un área geográfica específica para un intervalo de tiempo específico. La información obtenida de un inventario de emisión es usada para diferentes fines, como por ejemplo: evaluar el estado de la calidad del aire, estudiar los problemas de contaminación del aire, evaluar la eficacia de las políticas de contaminación del aire. (USEPA; 1999). Los inventarios de emisión constituyen un dato de entrada básico en los estudios de calidad del aire realizados por medio de modelos fotoquímicos de dispersión.

Se encuentran dos aproximaciones para el desarrollo de los inventarios de emisiones: top-down (arriba-abajo) y bottom-up (abajo-arriba). La aproximación bottom-up o a microescala requiere un conocimiento detallado de los parámetros referidos a cada actividad emisora en cada celda (tipo de uso del suelo, aforos de tráfico, consumo de combustible, densidad de población, etc.), con el objetivo de estimar su contribución a las emisiones totales. Mientras

que la aproximación top-down o a macroescala, calcula el total de las emisiones referidas a ciertas unidades administrativas para las cuales se dispone de datos relevantes y se distribuye entre las celdas haciendo uso de patrones locales de distribución apropiados (densidad de población, industriales o de tráfico, etc.).

Las emisiones se estiman generalmente mediante la aplicación de factores de emisión, los cuales estiman la tasa a la que es liberado un contaminante a la atmósfera, como un resultado de alguna actividad productiva. Para lo cual se emplea la ecuación 1.

$$E = FE \times A \quad (1)$$

En donde: E son las emisiones, FE es el factor de emisión y A es la tasa de actividad.

Los factores de emisión se pueden obtener de bases de datos, como por ejemplo la base de datos COPERT IV (Ntziachristos et al. 2007). En esta base de datos se puede estimar factores de emisión de CO, VOC, NOx y PM para diferentes categorías de vehículos tales como: vehículos livianos, vehículos pesados, carros de pasajeros, buses, camiones, motocicletas, entre otras. Los factores de emisión obtenidos se clasifican en tres categorías: arranque en frío, arranque en caliente y emisiones evaporativas.

Otra base de datos en donde se pueden obtener factores de emisión es la compilación de factores de emisión de contaminantes del aire, referenciada como la base de datos AP-42 (USEPA, 1995). Contiene factores de emisión y la información de los procesos para más de 200 categorías de fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos. Los factores de emisión se desarrollaron y compilaron a partir de las siguientes fuentes de información: pruebas de chequeo, balances de materia y estimaciones de ingeniería. La primera edición del documento AP-42 fue publicada en enero del año 1995. En los diferentes capítulos del documento en mención se encuentran los factores de emisión, principalmente para las fuentes fijas y de área, tales como: fuentes de combustión externa, combustión interna de fuentes fijas, disposición final de residuos sólidos, fuentes biogénicas, entre otras.

Adicionalmente a las bases de datos descritas anteriormente, se encuentra el modelo IVE. Este modelo se desarrolló con el fin de generar no solo una serie de factores de emisión que fuesen representativos para las condiciones de países en vía de desarrollo, sino también para diseñar y aplicar una metodología de medición de emisiones en ruta (mediciones a bordo), que pudiera ser replicada de forma estándar en varias ciudades. Por medio del modelo IVE se pueden estimar las emisiones de contaminantes criterio, gases de efecto invernadero y sustancias tóxicas; provenientes de diferentes categorías vehiculares, tales como: vehículos de pasajeros, motocicletas, buses y camiones. Este modelo se ha empleado en ciudades como Beijing y Shanghai, China (Nicole et al., 2005; Wang et al., 2006).

Los inventarios de emisión constituyen una entrada fundamental en los estudios de calidad del aire realizados por medio de modelos fotoquímicos de dispersión. Para emplear las emisiones con fines de modelación de la calidad del aire, previamente es necesario distribuirlas en el espacio y en el tiempo. Para tal fin existen herramientas denominadas modelos de emisiones. En el contexto de la modelación de la calidad del aire, la modelación de emisiones es el proceso por medio del cual las emisiones estimadas son preparadas para usarlas como datos

de entrada en un modelo de calidad del aire. En términos generales, el modelo de emisiones es el conjunto de herramientas informáticas que llevan incorporadas las herramientas para calcular las emisiones de distintas fuentes. Son usadas para estimar y posteriormente, distribuir en el espacio y en el tiempo, las emisiones generadas por las fuentes de emisión localizadas en el área a estudiar (Wilkinson, J. 2003).

Como ejemplos de modelos de emisiones se encuentran: el modelo EMS-95 (*Emissions Modeling Systems*) (Wilkinson, 2003) y el modelo SMOKE (*Sparse Matrix Operator Kernel Emissions*) (Houyoux, 1998). Cada modelo posee la capacidad de estimar las emisiones generadas por las fuentes de emisión; y prepararlas para el uso de ciertos modelos de calidad del aire, como por ejemplo: el modelo CAMx (*Comprehensive Air Quality Model*) (Zhang et al., 2005) y el modelo CMAQ (*Community Multiscale Air Quality*) (Byun & Ching, 1999).

Otro ejemplo de estas herramientas es el software AIREMIS (ACIR-ST, 2002), desarrollado por la empresa francesa ACRI, el cual estima las emisiones horarias de 7 contaminantes principales (NO, NO₂, SO₂, CO, CO₂, COV y PS), generadas por transporte (tráfico vehicular y aéreo), producción de servicios (industrias), calefacción y ambiente natural. Esta herramienta se empleó en Bogotá con el fin de preparar las emisiones como dato de entrada al modelo de calidad del aire de Bogotá, pero actualmente no existe más soporte para esta herramienta.

Otro paso en la modelación de inventarios es la especiación, que es el proceso de desagregación de los contaminantes estimados en el inventario de emisiones, en cada especie química o en grupos de especies. La necesidad de elaborar una especiación se determina dependiendo del propósito del inventario. Los inventarios que principalmente requieren de una especiación son los que se emplearán para fines de modelación fotoquímica, inventarios de compuestos tóxicos, entre otros. De acuerdo con lo anterior, el inventario puede incluir la especiación de los siguientes compuestos: Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Óxidos de Sulfuro (SO_x), Monóxido de Carbono (CO), Partículas Suspendidas Totales (PST), PM10 ó Amonio (NH₃). Adicionalmente, para algunos modelos, las emisiones de NO_x pueden ser necesarias como Óxido de Nitrógeno (NO) y Dióxido de Nitrógeno (NO₂).

Experiencias internacionales

Baldasano y Toll (2000), emplearon el modelo EIM-LEM para calcular el inventario de emisiones provenientes de las fuentes antropogénicas localizadas en el área de Barcelona España. Para tal fin los investigadores definieron un dominio de 80 x 80 km² con resolución de celdas de 2 km². Los investigadores estimaron el inventario de emisiones con el fin de estudiar el origen de la contaminación fotoquímica empleando el modelo fotoquímico de dispersión MARS. Las emisiones totales estimadas para el 5 de agosto fueron: 130.793 kg de COVs, 83.989 kg de NO_x y 43.567 de CO; de las cuales las fuentes móviles poseen la mayor participación en el inventario con las siguientes participaciones: 51% de COVs, 88% de NO_x y 98% de CO. La distribución horaria de COVs y NO_x indica que las mayores concentraciones generadas por las fuentes móviles se presentan a las 12:00 y 19:00 horas, cuando el volumen de tráfico se incrementa. Las emisiones de las fuentes móviles se concentran en las áreas urbanas, principalmente en Barcelona.

Wang et al. (2005) desarrollaron para el año 2000 un inventario de emisiones de alta resolución provenientes de las fuentes antropogénicas (puntuales, de área, móviles) y fuentes biogénicas, ubicadas en la región este de China. Para la estimación de las emisiones referentes a las fuentes antropogénicas emplearon factores de emisión que fueron calculados considerando la calidad de los combustibles usados por las fuentes bajo estudio. Mientras que para la estimación del inventario proveniente de las fuentes biogénicas hicieron uso del modelo MEGAN (*Model of Emissions of Gases and Aerosol from Nature*). Los investigadores evaluaron el inventario con el modelo CMAQ, para lo cual emplearon el modelo de emisiones SMOKE (*Sparse Matrix Operator Kernel Emissions*), con el fin de distribuirlo espacial y temporalmente. De acuerdo con los resultados obtenidos por el modelo de emisiones, se encuentran altas emisiones de CO, NOx y SO2 en áreas urbanas con altas densidades de habitantes, o lugares en donde se concentra la industria, mientras que las emisiones de fuentes biogénicas corresponden a cubiertas con vegetación y baja densidad de habitantes. Las emisiones superficiales de CO, SO2 y NOx muestran gran variación entre los meses correspondientes al verano (Noviembre – Abril) y meses de invierno (Mayo – Octubre). Las emisiones de COVs generadas por fuentes biogénicas son bajas en enero y se incrementan en julio.

Brulfert et al. (2005) estimaron para el año 2003 dos versiones del inventario de emisiones para el Valle Maurienne, Francia. En la primera versión emplearon factores de emisión CORINAIR (Agencia Ambiental Europea) y en la segunda versión emplearon factores de emisión tomados de BUWAL-OFEFP (Agencia Suiza para el Medio Ambiente, los Bosques y el Paisaje). En este estudio los investigadores definieron un dominio de 74 x 62 km² con resolución espacial de 1 km², en donde estimaron las emisiones de CO, NOx, SO2, NMCOVs y CH₄, generadas por las fuentes antropogénicas (transporte, industrias, calefacción y solventes) y biogénicas. El contaminante que domina el inventario de emisión en el área estudiada es el CO, en donde el 60% de las emisiones provienen de las fuentes móviles y el 31% se genera en los sistemas de calefacción doméstica. Las fuentes móviles son las principales generadoras de NOx, COVs y CO representadas de la siguiente manera: 75% de NOx, 65% de las emisiones antropogénicas de COVs y 28% del total de emisiones de COVs (antropogénicas y biogénicas). En el caso del SO₂, las principales fuentes son las emisiones industriales que representan el 78% de las emisiones totales. Mientras que las emisiones biogénicas de NMCOVs equivalen al 47% de las emisiones totales de COVs. Los mapas elaborados por los investigadores por medio de un Sistema de Información Geográfica (SIG), muestran que estas emisiones se concentran en las carreteras y en las zonas en donde se encuentran las industrias.

Cheng et al. (2007) aplicaron un modelo de calidad de aire acoplado MM5-ARPS-CMAQ para investigar la contribución de varias fuentes de emisión a la concentración ambiente de PM₁₀ en la región metropolitana de Beijing, China. Para proveer la información de emisiones al modelo de calidad de aire construyeron una base de datos en SIG de los contaminantes atmosféricos emitidos en la región, en un dominio de 36 Km x 36 km, con resolución espacial de 4 km². El sistema acoplado fue implementado para predecir la proporción horaria de varias fuentes de emisión de PM₁₀ durante los meses enero, abril agosto y octubre del año 2002. Los resultados del inventario de emisiones muestran que las principales fuentes de emisión de PM₁₀ ubicadas dentro de Beijing son las emisiones fugitivas generadas por fuentes industriales (19.000 ton/año), los sitios de construcción (21.000 ton/año) y el polvo resuspendido de las

carreteras (49.000 ton/año). Estas emisiones representan el 11.0%, 12,1% y 28,3% respectivamente, de las emisiones totales de PM10 generadas en el año 2002. La contribución de las fuentes de emisión en los meses bajo estudio fueron: abril 28,67%, agosto 42.88%, octubre 42.46% y febrero 35,67%.

Con el objetivo de evaluar la calidad del aire en Portugal haciendo uso del modelo tridimensional CTM CHIMERE, Monteiro et al. (2007) obtuvieron un inventario de emisiones para el año 2001 de los contaminantes PM y aerosoles aplicando una distribución espacial top-down. Los investigadores emplearon el programa EMEP (*European Monitoring and Evaluation Programme*) para distribuir espacialmente el inventario en un dominio con resolución horizontal de 50 km. La distribución espacial del inventario fue realizada en 2 pasos: en primer lugar estimaron las emisiones a nivel de municipios usando indicadores estadísticos adecuados para cada actividad del contaminante (tipos de consumo de combustible), posteriormente el inventario fue distribuido de acuerdo a la densidad poblacional. De acuerdo con los resultados obtenidos en el inventario, las fuentes que dominan las emisiones anuales de PM10 son la combustión residencial con el 40%, seguida por las fuentes móviles con el 20% de las emisiones anuales. Este mismo comportamiento se presenta con el inventario de PM2.5 en donde la combustión residencial posee la mayor tasa de emisiones con el 33% y las fuentes móviles poseen una proporción del 19 % de las emisiones anuales de PM. La distribución espacial del PM10 generado por fuentes móviles y no móviles muestra que este contaminante se concentra en la costa oeste de Portugal y principalmente alrededor de las ciudades de Lisboa y Porto. En esta investigación repartieron temporalmente las emisiones de acuerdo con los perfiles diurnos promedio de Europa.

Borge et al. (2008) aplicaron el modelo de emisiones SMOKE en la Península Ibérica y en la región de Madrid España, con el fin de procesar el inventario oficial de emisiones para este país, y proyectarlo para los años 2000 y 2010. Esta herramienta ha sido útil para generar información sobre las emisiones para el modelo CMAQ, como también para proporcionar una valiosa plataforma para el análisis de escenarios de emisiones. En este estudio el modelo SMOKE y el modelo CMAQ fueron implementados en 2 dominios: el primero denominado D1 contó con una resolución espacial de 15 km, centrado en 40° N, 3° W, con una malla de 78 celdas en la dirección este-oeste y 66 celdas en la dirección norte-sur. El dominio interior D2 es un cuadrado de 39 x 39 celdas, con una resolución espacial de 5 km. La distribución horaria de las emisiones anuales fue elaborada a través de la aplicación de 208 perfiles mensuales, 48 perfiles semanales y 212 perfiles diarios (lo mismo para el año 2000 y 2010). Los investigadores distribuyeron espacialmente un total de 176 categorías SMOKE de fuentes de área, las emisiones de estas fuentes fueron asignadas a las celdas de la malla a través de códigos de distribución espacial generados para los 2 dominios modelados. En la etapa de distribución temporal los investigadores encontraron que el efecto combinado de las fuentes móviles y la generación de energía tienden a producir el máximo de emisión proveniente de procesos de combustión en los meses de otoño. Las emisiones de COVs son claramente dominadas por las fuentes biogénicas, como consecuencia de las emisiones generadas en el verano, que son aproximadamente el doble de las emisiones generadas en el invierno. El análisis de la distribución espacial elaborado para las fuentes de área, identifican a las fuentes móviles como las fuentes que emiten mayores contaminantes a la atmósfera.

Sowden et al. (2008) emplearon el *Emissions Processing System* (EPS) de la US-EPA, con el fin de desarrollar un inventario de emisiones para la ciudad de Cape Town Sur África, para ser utilizarlo como dato de entrada al *Dynamic Air Pollution Prediction System* (DAPPS) . Tal sistema emplea como modelo fotoquímico de dispersión el modelo CAMx y fue puesto a prueba por los investigadores el 8 de julio del año 2005 en un dominio de 70 x 105 km², con resolución horizontal de grilla de 1 x 1 km². Las fuentes incluidas en el inventario fueron las siguientes: fuentes puntuales, fuentes móviles, emisiones provenientes de los sistemas de calefacción residencial y por último fuentes biogénicas. Los resultados de esta investigación muestran que las fuentes móviles son las que dominan el inventario de emisiones de Cape Town, distribuyéndose de la siguiente manera: 70% de PM, 80% de NO_x, 95% de CO, 25% de COVs y 40% de SO₂. Mientras que las fuentes biogénicas contribuyen en un 79% y un 10% de las emisiones de COVs y NO_x, respectivamente.

Baldasano et al. (2008) aplicaron el *High-Elective Resolution Modelling Emission System* (HERMES) con el fin de estimar el inventario de emisiones de España, requerido para la implementación de un modelo de transporte químico con alta resolución. Los autores tomaron como referencia el año 2004 y estimaron las emisiones generadas por las fuentes antropogénicas y fuentes biogénicas en un dominio de 146 x 146 km, con una resolución temporal de 1 hora y una resolución espacial de 1 km². Las emisiones anuales estimadas en este estudio son las siguientes: 795 kt de NO_x, 1.025 kt de NMCOVs, 1.236 kt de CO, 1.142 kt de SO₂ y 180 kt de PST, las cuales se distribuyen en las áreas grandes de las principales ciudades, autopistas y fuentes puntuales grandes de España. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que las emisiones de NO_x, SO₂ y PM 2.5, presentan una alta relación con la generación de energía por el uso de carbón, alcanzando altos niveles de emisiones durante el verano debido al incremento de la demanda de energía por el uso de los sistemas de aire acondicionado. Las emisiones de NMVOCs presentan una alta relación con la temperatura y radiación solar, logrando las máximas emisiones durante los días que conforman los meses de verano. Las emisiones de CO son principalmente influenciadas por las fuentes móviles, y sus altas emisiones se producen en verano debido al aumento del tráfico promedio diario durante los días festivos. Las fuentes más significativas en el total de emisiones son las fuentes móviles (38%), combustión en plantas de generación de energía (33%), fuentes biogénicas (12%) y la combustión de industrias manufactureras (9%).

Ho. (2010) desarrolló y validó un nuevo modelo denominado EMISENS, para la generación de emisiones provenientes de las fuentes móviles, cuya validación fue realizada en la ciudad de Strasbourg, Francia. Posteriormente, utilizó el mismo modelo para distribuir el inventario de emisiones de fuentes móviles en la ciudad de Ho Chi Minh, Vietnam en un dominio de 34 km x 30 km con resolución espacial de 1 km² (año base 2006), y agregarlo al inventario de las demás fuentes, para las cuales se empleó una aproximación top-down. Los resultados obtenidos por el investigador muestran que las fuentes móviles son las principales fuentes de emisión de la ciudad de Ho Chi Minh: 78% de NO_x, 90% de CO y 89% de NMCOVs. De la flota que circula en la ciudad las motocicletas son las fuentes que dominan el inventario: 94% de CO, 68% de NMCOVs, 61% de SO₂ y 99% de CH₄. Los resultados obtenidos para las fuentes móviles muestran que las principales emisiones de CO se presentan en el centro de la ciudad. Los patrones de emisiones para los NMCOVs y los otros contaminantes son similares a las emisiones de CO. Por su parte, el SO₂ domina el inventario estimado para las fuentes

industriales con el 80,42%, siendo el mes de noviembre la época de año en donde se presentan las mayores emisiones de contaminantes. Su distribución espacial muestra que las industrias se localizan principalmente en el área residencial de la ciudad.

Experiencias en Colombia

La Universidad Pontificia Boliviana desarrolló en el año 2001 el modelo ETROME (Emisión de Tráfico Rodado para Medellín y municipios aledaños), que fue aplicado con el fin de comparar las emisiones generadas por las fuentes móviles operadas con combustibles de baja calidad (escenario 1) y las emisiones generadas empleando combustibles que cumplan la norma europea EURO III (escenario 2). El área de influencia definida por los investigadores para el desarrollo de la investigación posee una superficie de 1.089 km² (33 km x 33 km) correspondiente al área geográfica de la ciudad de Medellín y otras zonas de sus municipios aledaños. En esta investigación el dominio fue dividido en 1089 celdas de 1 km². Para la estimación del inventario de emisiones emplearon factores de emisión CORINAIR 2006 y el modelo internacional IVE, mientras que la definición de variables de transito fueron obtenidas a partir de información primaria correspondientes al plan maestro de movilidad del Valle de Aburrá y las estadísticas del Ministerio de Transporte. Los resultados del inventario de emisiones empleando factores de emisión IVE (International Vehicle Emissions) arrojaron la siguiente participación porcentual de las emisiones generadas en el año 2005: CO 69,57%, NOx 10,18%, COVs 18,31%, TSP 1,28% y SO2 0,66%. Por su parte empleando factores de emisión CORINAIR la distribución de los mismos contaminantes es: 69,68%, 10,20%, 18,34%, 1,12% y 0,66%, respectivamente.

Toro et al. (2001) aplicó el modelo de emisiones atmosféricas para el Valle de Aburrá (MODEMED), con el fin de conocer la formación y el transporte de contaminantes fotoquímicos utilizando un modelo de pronóstico a mesoscala y un modelo de dispersión fotoquímico euleriano en el Valle de Aburrá. El inventario de emisiones se enfocó al estudio de las descargas de especies químicas que provienen de las fuentes antropogénicas (transporte y procesos productivos), así como también las emisiones biogénicas, provenientes de la vegetación. Para la estimación de emisiones emplearon metodologías de la USEPA y de CORINAIR. Los resultados reportados indican que el tráfico rodado domina el inventario de emisiones, siendo el CO el más representativo con el 79% de las emisiones anuales, seguida por los COVs y el NOx con el 17% y 11% respectivamente. Por otro lado, los procesos productivos son los que generan mayor cantidad de Partículas Suspendidas con el 49% y SO2 equivalentes al 27%. La agregación espacial elaborada en este estudio muestra que las emisiones atmosféricas generadas por el tráfico rodado se concentran en la zona central urbana y centro occidental de la ciudad de Medellín, con horario crítico a las 7 y 19 LST.

Toro et al. (2006) determinaron, en un dominio de 360 Km² con resolución espacial de 1 km², las emisiones en caliente de CO, NOx, SO2, TSP y COVs provenientes del tráfico rodado de la ciudad de Medellín, empleando el modelo ETROME y factores de emisión CORINAIR. De acuerdo con los resultados reportados, el CO es el contaminante que domina el inventario de fuentes móviles de Medellín, con una emisión de 104.118 ton/año, seguido por el NOx con 14.779 ton/año. Las gráficas de intensidad de emisión construidas muestran que el centro de

la ciudad representa el área más afectada por el tráfico vehicular, seguida por la región centro-occidental. Los resultados arrojados por el modelo evidencian las mayores emisiones durante las horas pico que se presentan a las 8:00 A.M y a las 7:00 P.M.

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Universidad Pontificia Boliviana actualizaron, en el año 2006, el inventario de emisiones del Área Metropolitana del Valle de Aburrá para el año 2005, empleando el modelo de emisiones atmosféricas para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (MODEAM). Este modelo emplea la aproximación bottom-up para elaborar la distribución espacial de las emisiones de CO, NOX, SO2, PM y COVs generadas por las fuentes fijas, de área, móviles y biogénicas. Para tal fin, definieron un dominio de 60 km x 60 km, con resolución espacial de 1km² y resolución temporal de 1 hora. De acuerdo con los resultados reportados, el tráfico rodado emite 104,117 ton/año de CO, 14,780 ton/año de NOx, 27,627 ton/año de COVs, 989 ton/año de PM y 929 ton/año de SO2. Los contaminantes que más se emiten por las fuentes fijas son (en ton/año): PM y SOx con 31,490.4 y 21,362.7, respectivamente. El centro de la ciudad de Medellín representa el área más afectada por el tránsito vehicular y las industrias, siguiendo en importancia, la región centro oriental y el municipio de Itagüí. Las mayores emisiones se presentan durante las horas de mayor tráfico automotor correspondientes a la 08:00 y a las 18:00. La mayor emisión de contaminantes provenientes de las fuentes biogénicas se presenta en el norte del Valle de Aburrá y la región de Santa Elena.

Experiencias en Bogotá

Fandiño & Behrentz (2009) efectuaron la actualización del inventario de emisiones para el año 2008 provenientes de las fuentes fijas de la ciudad mediante mediciones directas. El inventario de emisiones se llevó a cabo mediante la generación de factores de emisión a partir de muestreos isocinéticos para PM, NOx y SOx. De acuerdo con sus resultados, las fuentes industriales de Bogotá emitieron en el año 1.400, 2.600 y 2.200 toneladas de PM, NOx y SOx, respectivamente. También confirmaron que la producción no tecnificada de ladrillo, seguida de calderas de gran tamaño que usan carbón como combustible, son las fuentes más importantes de PM, representando el 50% y el 25% de las emisiones, respectivamente.

Behrentz y Rodríguez (2009) elaboraron la actualización del inventario de emisiones provenientes de las fuentes móviles por medio de mediciones directas. Realizaron más de 200 mediciones directas del tubo de escape bajo las condiciones reales de operación de los vehículos en la ciudad. Según los resultados obtenidos, las fuentes vehiculares en Bogotá emiten anualmente más de 4.800.000 toneladas de CO₂; 450.000 toneladas de CO; 30.000 toneladas de NOx; 60.000 toneladas de THC y 1,100 toneladas de PM_{2.5}. Finalmente, realizaron pruebas para cuantificar la disminución de emisiones de PM al operar vehículos con ACPM convencional y posteriormente con ACPM de bajo contenido de azufre, encontrando reducciones en las emisiones de PM hasta del 60%.

Manzi (2008) seleccionó y aplicó una metodología para la estimación de los factores de emisión de las fuentes móviles de la ciudad de Bogotá. Estimaron los factores de emisión del parque automotor (vehículos livianos y vehículos pesados) de la ciudad para 5 contaminantes

(CO, NOx, SO2, COV y PM10), haciendo uso de la aplicación inversa del modelo de dispersión STREET SRI, en combinación de las mediciones de las concentraciones de dichos contaminantes en el interior de un cañón urbano de alto flujo vehicular ubicado en el centro de la ciudad (Carrera 7 entre calle 13 y avenida Jiménez). Estos factores de emisión de la flota vehicular de la ciudad fueron empleados para generar el inventario de emisiones requerido por el Modelo de Calidad de Aire de Bogotá.

En 2001, la empresa INAMCO elaboró para el Departamento Administrativo de Medio Ambiente (DAMA) el inventario de fuentes fijas para la ciudad: Para tal fin visitaron cerca de 4.500 establecimientos industriales, con el propósito de recopilar información relacionada con el consumo de combustible y los tipos de tecnología empleados en sus procesos de obtención de energía (INAMCO & DAMA, 2001). A partir de la información recopilada y haciendo uso de factores de emisión obtenidos de la base de datos AP-42 de la USEPA, encontraron que la localidad de Puente Aranda aporta más del 25% de las emisiones totales de PM10 de la ciudad y la localidad de Kennedy es el sector de la ciudad que emite las mayores concentraciones de SOx.

Zarate et al. (2007) emplearon el modelo de emisiones AIREMIS (basado en metodologías CORINAIR), con el fin de preparar el inventario de emisiones requerido por el Modelo de Calidad del Aire de Bogotá. Las fuentes de emisión seleccionadas en este estudio fueron las siguientes: Producción y Servicios (P&S), tráfico aéreo, fuentes biogénicas y tráfico rodado; mientras que los contaminantes modelados fueron: NOX, CO, PM10 NMCOVs, CO2, SO2 y CH4. Emplearon los factores de emisión estimados por Manzi (2008) para determinar las emisiones provenientes de las fuentes móviles, mientras que la estimación de las emisiones generadas por las fuentes fijas se basó en la información recopilada por (INAMCO & DAMA, 2001) y los factores de emisión de la metodología CORINAIR. Para la estimación del inventario de emisiones, se tomó 2.002 como año base, y se definió un dominio de 212 km x 212 km con resolución espacial y temporal de 4kmx4km y 1 hora, respectivamente. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que el tráfico rodado es el que emite las mayores cantidades de CO (840 ton/d), NMCOVs (130.4 ton/d), CO2 (5.133,4) y NOx (37,4 ton/d). Mientras que las emisiones provenientes de las fuentes fijas antropogénicas son: 21,9 ton/d de CO; 3,8 ton/d de NOx; 8,1 ton/d de PM10; 12,1 ton/d de NMVOC; 14,0 ton/d de SO2, 132,7 ton/d de CH4 y 1.095,9 ton/d de CO2. La distribución espacial de las emisiones indica que el centro de Bogotá contribuye con emisiones significativas de CO, PM10, NMCOVs y NOx, que son generadas principalmente por el tráfico y en menor medida por uno de los principales centros industriales de la ciudad, localizado en la localidad de Puente Aranda. También se puede observar una gran contribución de NOx en el corredor industrial localizado en el oeste de la región; mientras que el corredor industrial ubicado al norte de la región contribuye con las mayores emisiones de PM10, NOx, CH4, CO2 y SO2.

Por medio de factores de emisión determinados por pruebas dinamométricas realizadas en California, Behrentz et al. (2005), elaboraron un inventario de emisiones para vehículos livianos que operan con gasolina en la ciudad. Los resultados de este estudio indican que los aportes a la contaminación atmosférica por parte de estos tipos de vehículos son los siguientes: 230.000 ton/año de CO, 3.000.000 ton/año de CO2, 12.000 ton/año de NOx, 25.000 ton/año de THC, 1.400 ton/año de CH4 y 90 ton/año de N2O.

Giraldo (2005) actualizó y validó los inventarios de emisiones para fuentes móviles elaborados hasta el momento empleando el procedimiento propuesto por el proyecto IVE. El inventario de emisiones fue estimado por medio de una campaña de toma de información propia de la ciudad y factores de emisión reportados en la literatura científica. Se cuantificaron así los aportes a la contaminación atmosférica por cada una de las categorías vehiculares definidas en el estudio y se diseñaron, a partir de una evaluación cuantitativa, las estrategias más eficientes para la reducción de las emisiones provenientes de las fuentes móviles. Los resultados mostraron que los buses pertenecientes a la flota del servicio público colectivo, los camiones y las motos dominan el inventario de emisiones de material particulado en la ciudad. Así mismo, la estrategia más eficiente para disminuir las emisiones de este contaminante propuesta era la de mejorar la calidad de los combustibles diesel (reducción del contenido de azufre) distribuidos en la ciudad.

Más recientemente, como parte de los proyectos encaminados a fortalecer las herramientas de modelación de calidad del aire para Bogotá, el Grupo de Investigación en Calidad del Aire de la Universidad Nacional de Colombia desarrolló, con el apoyo de la Secretaría Distrital de Ambiente y Ecopetrol, la desagregación espacial y temporal de los inventarios de emisiones en el perímetro urbano. Peñaloza & Rojas (2012), partieron de las bases de datos y factores de emisión de los inventarios de Fandiño & Behrentz (2009) y de Rodríguez y Behrentz (2009) para recalcular los inventarios de emisiones mediante una aproximación distribuida, utilizando una malla de 55km x 55km centrada en el perímetro urbano y celdas de 1km x 1km, para cada hora durante un día típico laboral.

En este trabajo, las emisiones de fuentes fijas se complementaron con factores de emisión para CO para todas las fuentes y factores de emisión de todos los contaminantes para fuentes que utilizan aceite usado como combustible. Se estimaron, además, variaciones temporales de las fuentes fijas para una jornada de 24 horas. Por su parte, las emisiones de fuentes móviles se complementaron con factores de emisión de material particulado y SO₂ para los vehículos a gasolina, factores de emisión de CO, NOx y Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) para vehículos a diésel y factores de emisión de COV para motocicletas. Las variaciones en la actividad vehicular durante 24 horas fueron derivadas de conteos vehiculares tomados por la Secretaría de Movilidad en diversas vías de la ciudad y para las diferentes categorías de servicio vehicular. Adicionalmente, se establecieron factores de especiación química para los COV, clave por su participación en la formación de ozono troposférico.

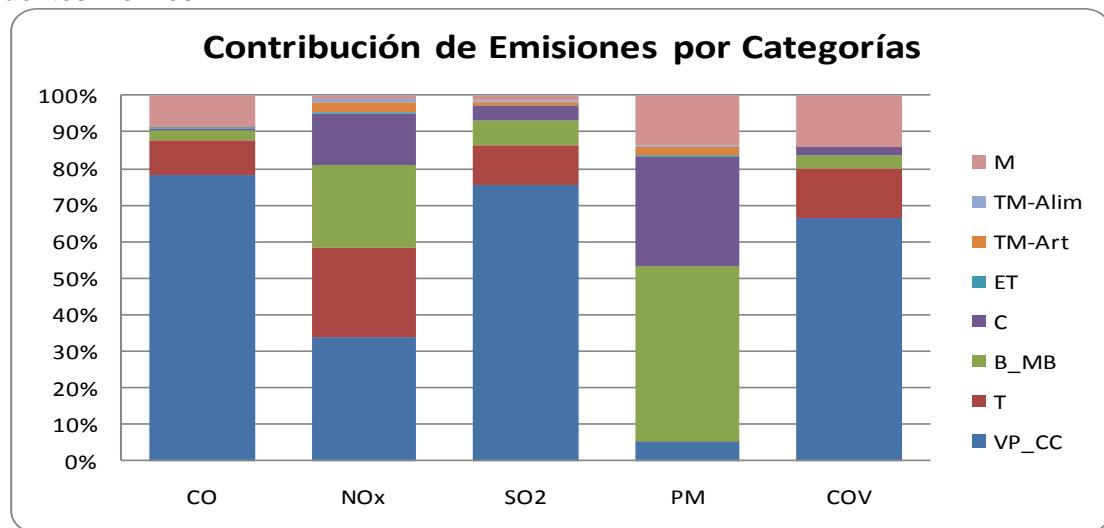
La aproximación desagregada del inventario de emisiones de Peñaloza & Rojas (2012) generó emisiones de fuentes móviles mayores que las obtenidas por Fandiño & Behrentz (2009) y por Rodríguez y Behrentz (2009). La categoría vehicular que domina las emisiones de CO, SO₂ y COVs es la de vehículos particulares con convertidor catalítico (VP_CC), con porcentajes del 78,18%, 75,30% y 66,63%, respectivamente. En esta categoría también se puede observar una contribución notoria del NOx con un porcentaje del 33,80%. El inventario de emisiones de PM se encuentra dominado por las categorías que se encuentran conformadas por vehículos de carga pesada, específicamente por la flota de transporte público colectivo (B_MB) y los camiones (C), cada una con aportes del 47,93% y del 29,73%, respectivamente. Se puede resaltar que las motocicletas (M) que circulan dentro del dominio modelado, poseen un rol importante en el problema de la contaminación atmosférica generada por el material

particulado, ya que cuentan con una contribución del 13,48% del total del PM emitido por las fuentes móviles. los valores de CO y PM se encuentran dentro del intervalo definido por los valores máximos y mínimos de los estudios previos. Por otro lado, las emisiones obtenidas para SO₂ y COVs superan los valores máximos de los estudios previos, en un porcentaje de 9,54% y 55,55%, respectivamente (Tabla 1).

Tabla 1. Comparación de resultados de Peñaloza & Rojas (2012) con estudios previos

Valores [Ton/año]	CO	NO _x	SO ₂	PM	VOC
Peñaloza & Rojas (2012)	706.925	57.658	13.009	1.594	108.011
Rodríguez & Behrentz (2009)	450.000	30.000	NA	1.100	60.000
Bogotá 2003	306.162	13.651	NA	1.643	NA
Bogotá (2005a)	230.000	12.000	NA	NA	25.000
Bogotá (2005b)	900.000	55.000	NA	2.200	NA
Promedio	471.540	27.663	NA	1.648	42.500
Mínimo (Estudios Previos)	230.000	12.000	NA	1.100	25.000
Máximo (Estudios Previos)	900.000	55.000	NA	2.200	60.000

Figura 1. Contribución de las categorías vehiculares al inventario de emisiones de fuentes móviles

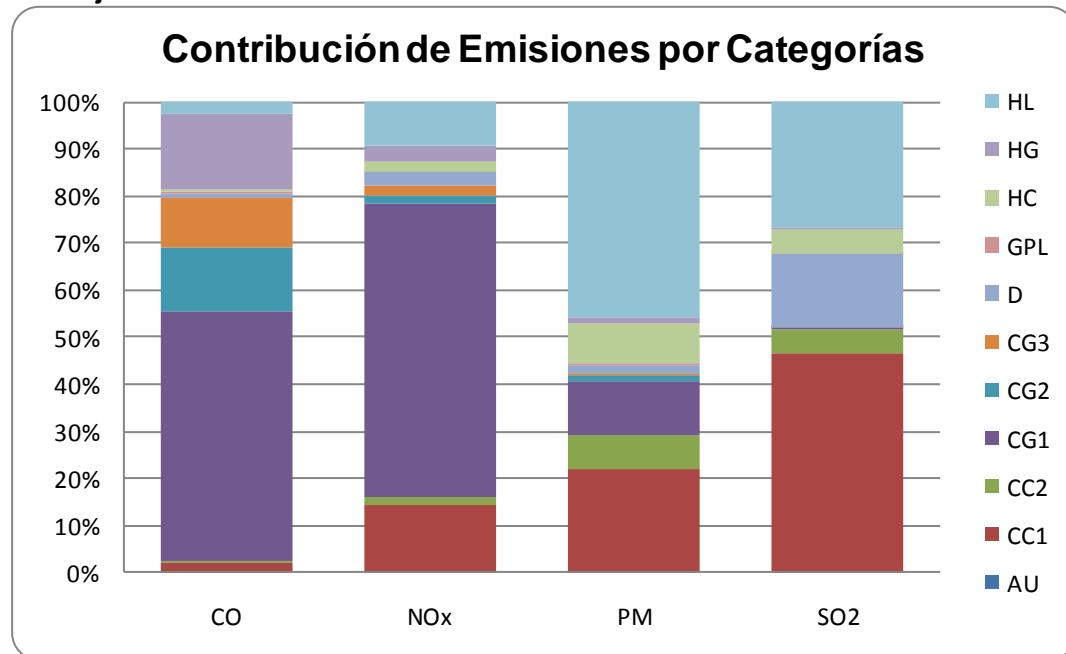


El principal contaminante emitido por las fuentes fijas dentro del dominio modelado es el NOx, con una cantidad de 2.497 Ton/año. Tal y como se puede observar en la Figura 2, estas emisiones provienen principalmente de calderas a gas natural (CG1) que poseen una contribución del 62,47% de las emisiones anuales. Por su parte, el SO₂ domina en segundo lugar el inventario, las emisiones de dióxido de azufre alcanzaron 2,082 toneladas al año; y son generadas en gran proporción por calderas a carbón con el 46,68%. Este contaminante también se origina a partir de los hornos ladrilleros (HL), que contribuyen con el 26,80% de las emisiones anuales. Se observa una contribución del 15,86% por parte de las calderas que son alimentadas con combustible Diesel (D). Las emisiones de material particulado fueron de 1.017 ton/año. La mayor contribución de estas descargas provienen de los hornos ladrilleros (HL) con una participación del 45,81%. Seguida por las calderas a carbón CC1 y a gas natural CG1 con contribuciones del 21,76% y 11,85%, respectivamente. La Figura 2 muestra que las emisiones de CO se generan principalmente por la quema de gas natural, ya que de las 508 toneladas de CO emitidas en el año 2008, el 53% proviene de calderas a gas natural CG1, como también de hornos a gas natural HG (16,28%) y calderas a gas natural CG2 (13,57%).

Tabla 2. Emisiones anuales, fuentes fijas

Emisiones [Ton/año]	CO	NO _x	SO ₂	PM
Calculado	508	2.088	1.741	1.017
Extrapolado	607	2.497	2.082	1.216
Fandiño, 2009	NA	2.600	2.200	1.400

Figura 2. Contribución de las categorías industriales al inventario de emisiones de fuentes fijas



Las figuras 3 y 4 muestran ejemplos de la desagregación espacial y temporal de las emisiones de fuentes móviles. Resultados equivalentes fueron obtenidos para fuentes fijas.

Figura 3. Desagregación espacial de emisiones de CO por fuentes móviles a las 12:00

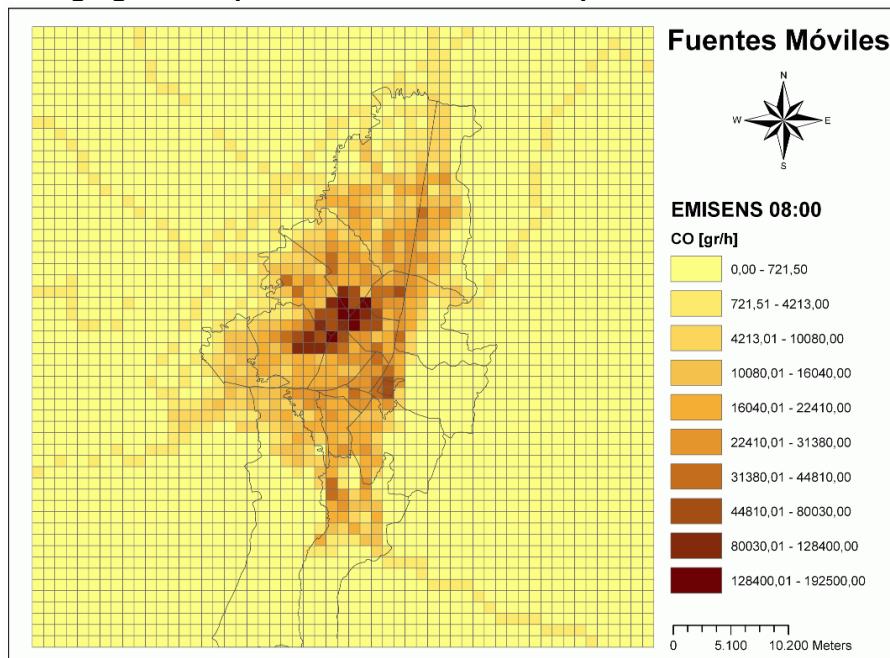
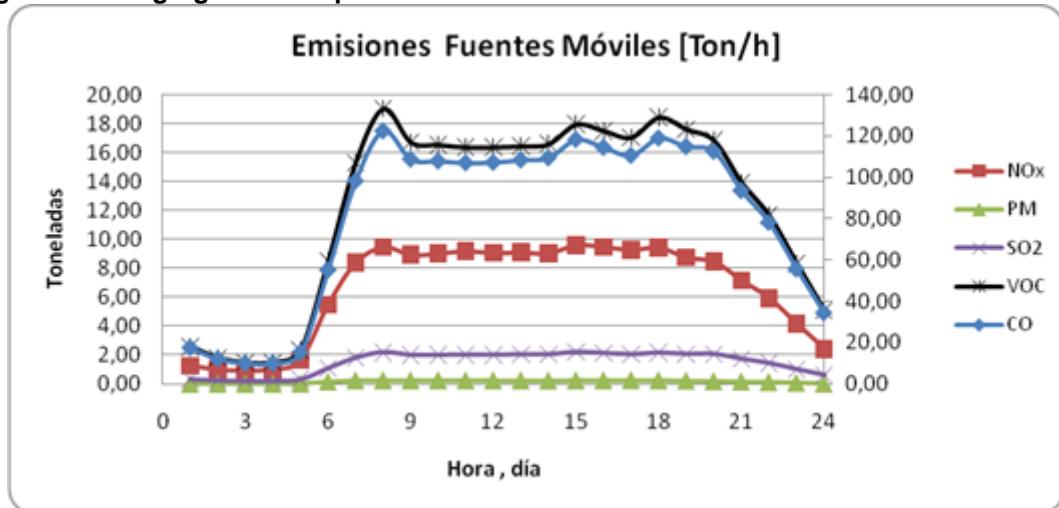
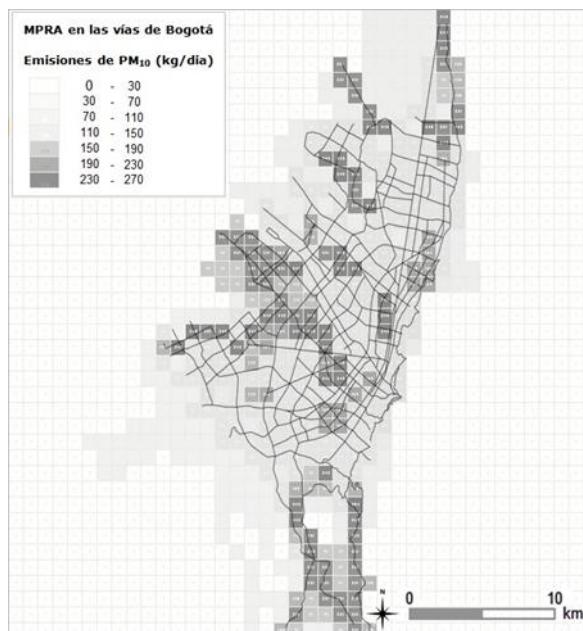


Figura 4. Desagregación temporal de las emisiones de fuentes móviles.



Finalmente, Beltrán et al. (2012) usaron las metodologías de la US-EPA y la Agencia Ambiental Europea (EEA) para la estimación de emisiones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} por resuspensión de polvo y abrasión de frenos, llantas y superficies de vías pavimentadas y sin pavimentar. Se usaron datos de actividad y conteo de vehículos, para generar la distribución espacial de las emisiones en un dominio de 40km x 40km, con celdas de 1x1 Km. Los resultados muestran que cerca del 40% del $PM_{2.5}$ emitido en la ciudad proviene de este tipo de emisiones, acorde con reportes de otras ciudades del mundo. Los resultados también revelan que cerca del 80% de las emisiones son promovidas por la circulación de vehículos pesados. Estas emisiones son mayores en el suroeste de la ciudad (Figura 5), zona caracterizada por tener vías deterioradas, con alto flujo de vehículos pesados y con los mayores niveles de concentración de material particulado de la ciudad, así como en las vías de acceso del sur de la ciudad.

Figura 5. Distribución espacial de $PM_{2.5}$ emitido por resuspensión de polvo y abrasión de frenos, llantas y superficies en la ciudad de Bogotá.



Referencias

- ACRIS-ST, 2002. Air Quality Modelling – Samma software and several applications. Sophia Antipolis. France.
- Agencia de Noticias UN, (2009). Salud de los Bogotanos, amenazada por contaminación del aire, [en línea], disponible en: <http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co/nc/detalle/article/salud-de-los-bogotanos-amenazada-por-contaminacion-del-aire/>, consultado el 6 de octubre de 2010.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá & Universidad Pontificia Bolivariana, 2005. Actualización del Inventario de Emisiones Atmosféricas en el Valle de Aburrá con Georreferenciación de Éstas (Convenio 323/2005).
- Baldasano, J.M., Güereca, L., López, E., Gassó, S. & Jimenez, P. (2008). Development of a high-resolution (1 km x 1 km, 1h) emission model for Spain: The High Elective Resolution Modelling Emission System (HERMES). *Atmospheric Environment*, 42, 7215-7233.
- Baldasano, J.M. & Toll, M. (2000). Modeling of photochemical air pollution in the Barcelona area with highly disaggregated anthropogenic and biogenic emissions. *Atmospheric Environment*, 34, 3069-3084.
- Behrentz, Belalcazar & Echeverry, 2005. Estimation of pollutant and greenhouse gas emission for mobile sources in Bogotá. Advanced institute on urbanization, emissions and the global carbon cycle. The global change system for analysis, research and training (START).
- Beltran, D., Belalcazar, L.C. and Rojas, N.Y. Spatial Distribution of Non-Exhaust Particulate Matter Emissions from road Traffic for the City of Bogota – Colombia. En: 2012 International Emission Inventory Conference "Emission Inventories - Meeting the Challenges Posed by Emerging Global, National, Regional and Local Air Quality Issues". Disponible en <http://www.epa.gov/ttn/chief/conference/ei20/session9/dbeltran.pdf>.
- Borge, R., Lumbreras, J. & Rodriguez, E. (2008). Development of a high-resolution emission inventory for Spain using the SMOKE modelling system: A case study for the years 2000 and 2010. *Environmental Modelling & Software*, 23, 1026-1044.
- Brunekreef, B & Holgate, S. (2002), Air pollution and health. *The Lancet*, 360, 1233 – 1244.
- Brulfert, G., Chollet, J.P., Jouve, B. & Villard, H. (2005). Atmospheric emission inventory of the Maurienne valley for an atmospheric numerical model. *Science of total Environment*, 349, 232-248.
- Byun, D.W., Ching, J.K.S., 1999. Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) Modeling System. EPA/600/R-99/030, US EPA National Exposure Research Laboratory, ResearchTriangle Park, NC.
- Cámara de Comercio de Bogotá (CCB), (2009). "Perfil económico y empresarial de las localidades: Ciudad Bolívar y Bosa", [en línea], disponible en:

http://camara.ccb.org.co/documentos/4392_Bosa_ciudadb.pdf, consultado el 6 de octubre de 2010.

Cancino, J. (2006). "Validación y análisis de la información de la red de calidad del aire de Bogotá", [en línea], disponible en: http://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis_2007_primer_semestre/00002306.pdf, consultado el 7 de octubre de 2010.

Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2006, 04 de abril), "Resolución 0601 del 04 de abril de 2006, por la cual se estable la norma de calidad del aire o nivel de inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia", en Diario Oficial, núm. 46.232, 5 de abril de 2006, Bogotá.

Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, "Manual de Fundamentos y Planeación de Inventarios de Emisión: Borrador V2", [en línea], disponible en: http://www.minambiente.gov.co/documentos/3110_1_Planeacion.pdf, consultado el 27 de octubre de 2009.

Colombia, Secretaría Distrital de Ambiente. (2008), "Informe anual de calidad del aire de Bogotá, año 2007", [en línea:], disponible en: <http://www.secretariadeambiente.gov.co/sda/libreria/pdf/Informe%20Anual%202007%20RM CAB%20FINAL.pdf>, consultado el 25 de octubre de 2008.

Cheng, S.; Chen, D.; Li, J.; Wang, H. & Guo, X. (2007). The assessment of emission-source contributions to air quality by using a coupled MM5-ARPS-CMAQ Modeling System: A case Study in the Beijing metropolitan region, China. *Environmental Modelling & Software*, 22, 1601-1616.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), (2005). "Estimaciones de proyección 1985-2005, y proyecciones de población 2005-2010 nacional y departamentales, por sexos, según grupos quinquenales de edad y área", [en línea], disponible en: http://www.dane.gov.co/daneweb_V09/index.php?option=com_content&view=article&id=238&Itemid=121, consultado el 6 de octubre de 2010.

DEQ-Virginia. (2008). Memorandum - Interim Guidance on Alternative Fuel Permitting in Industrial Boilers. Redmond, USA: Department of Environmental Quality of the Commonwealth of Virginia.

Fandiño, M & Behrentz, E. (2009). "Actualización del inventario de emisiones de fuentes fijas para la ciudad de Bogotá, a través de mediciones directas", [en línea], disponible en: http://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis_12009_primer_semestre/525.pdf, consultado el 7 de octubre de 2010.

Giraldo, L. (2005). "Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá", [en línea], disponible en: http://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis_2006_primer_semestre/00006639.pdf, consultado el 7 de octubre de 2010.

Ho, Q.B, (2010). "Optima Methodology to Generate Road Traffic Emissions for Air Quality Modeling: Application to Ho Chi Minh City", [en línea], disponible en: http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2010/4793/EPFL_TH4793.pdf, consultado el 25 de octubre de 2010.

Houyoux, M.R. (1998). Technical report: plume rise algorithm summary for the Sparse Matrix Operator Modeling System (SMOKE). Prepared for North Carolina Department of Environment and Natural Resources. ENV-98TR004eTR0v1.0.

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

JICA. (1992). Study on Air Pollution Control Plan in Santafe de Bogota City Are, Final Report. Tokyo, Japan: Japan International Cooperation Agency (JICA).

Manzi, V. (2003). "Selección y aplicación de una metodología para la estimación de los factores de emisión de las fuentes móviles vehiculares de la ciudad de Bogotá", [en línea], disponible en: http://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis_2003_segundo_semestre/00002172.pdf, consultado el 7 de octubre de 2010.

Monteiro, A., Miranda, A., Borrego, C., Vautard, R., Ferreira, J. & Pérez, A. (2007). Long-term assessment of particulate matter using CHIMERE model. *Atmospheric Environment*, 41, 7726-7738.

Nicole D, James L, Mauricio O et al., 2005. Transportation research board 81st annual meeting[C]. Washington D.C., Jan, 2005.

Ntziachristos, L; Samaras, Z; Gkatzoflias, D; Kouridis., 2007. COPERT IV – Computer programme to calculate emissions from road transport, User manual (version 5.0). EEA, 2007.

Ostro, B. (2004). Outdoor Air Pollution: Assessing the Environmental Burden of Disease at National and Local Levels. Environmental Burden of Disease Series, No. 5; World Health Organization: Geneva, [en línea], disponible en: http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/ebd5.pdf, consultado el 8 de noviembre de 2010.

Páez, Magda. (2009, 12 de julio). Respirar, en Bogotá, puede amenazar la vida. UNperiódico, ISSN 1657-0987, No 124, pp 6. Disponible en: <http://www.unperiodico.unal.edu.co/uploads/media/UnPeriodico124.pdf>, consultado el 6 de octubre de 2010.

Peñaloza, N. Rojas, N.Y. Desagregación de inventarios de emisiones.: Bogotá como caso de estudio. Editorial Académica Española (2012). ISBN-13: 978-3659007965.

Rodriguez, P & Behrentz, E. (2009). "Actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá, a través de mediciones directas", [en línea], disponible en: http://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis_12009_primer_semestre/524.pdf, consultado el 7 de octubre de 2010.

Secretaría Distrital de Movilidad. (SDM). (2009). "Informe anual Pico y Placa 2008". Bogotá, Colombia.

Secretaría Distrital de Planeación (SDP). (2010). "Velocidad de recorrido promedio del transporte público colectivo (2001-2009)", [en línea], disponible en: http://portald.dapd.gov.co:7788/ci/ficha.php?id_item=501, consultado el 15 de mayo de 2010.

Sowden, M., Cairncross, E., Wilson, G., Zunckel, M., Kirillova, E., Reddy, V. & Hietkamp, S. (2008). Developing a spatially and temporally resolved emission inventory for photochemical modeling in the City of Cape Town and assessing its uncertainty. *Atmospheric Environment*, 42, 7155-7164.

Stockwell, W., Kirchner, F., Kuhn, M., (1997). A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling. *Journal of geophysical research*. Vol 102. No D22. Páginas 25,847 a 25,879. Noviembre, 1997.

Toro, M.V. (2001). Modelo de emisiones atmosféricas para el Valle de Aburrá MODEMED.

Toro, M.V., Ramírez, J., Quinceno, R & Zuluaga, C. 2006. Cálculo de la emisión vehicular de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Medellín mediante factores de emisión CORINAIR, [en línea], disponible en: <http://www.cepis.org.pe/bvsci/e/fulltext/medellin/vehiculos.pdf>, consultado el 6 de noviembre de 2010.

Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, 2005. Estudio de emisión y dispersión de contaminantes para condiciones de cambio de combustibles, [en línea], disponible en: http://www.metropol.gov.co/aire/compartidos/docs/emisin_y_dispersin_con_cambio_de_combustible.pdf, consultado el 6 de noviembre de 2010.

USEPA, (1999). *Handbook of criteria pollutant Inventory Development. A Beginner's Guide for Point and Area Sources*, United States Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC. EPA-454/R-99-037,

USEPA, (1995). *Compilation of Air Pollutant Emission Factors AP-42, Fifth Edition, Volume I: Stationary Point and Area Sources*, United States Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC.

Wang H K, Chen C H, Huang C et al., 2006. Application of the International Vehicle Emission model for estimating of vehicle emissions in Shanghai[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26(1): 1-9.

Wang. X., Mauzerall, D., Hu, Y., Russell, A., Larson, E., Woo, J. Streets, D. & Guenther, A. (2005). A high-resolution emission inventory for eastern China in 2000 and three scenarios for 2020. *Atmospheric Environment*, 39, 5917-5933.

Wilkinson, J. (2003). *Emission Modeling. Chapter 3 of AIR QUALITY MODELING – Theories, Methodologies, Computational Techniques, and Available Databases and Software*. Vol. I – Fundamentals (P. Zannetti, Editor). Published by The EnviroComp Institute and the Air & Waste Management Association.

Zárate, E. (2007), Understanding the origins and fate of air pollution in Bogotá, Colombia [tesis doctoral], Lausanne (Suiza), École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Doctorado en Ciencias.

Zárate, E., Belalcázar, L. C., Clappier, A., Manzi, V., & Van den Bergh, H. (2007). Air quality modelling over Bogota, Colombia: Combined techniques to estimate and evaluate emission inventories. *Atmospheric Environment* 41, 6302–6318.

Zhang, Y., Vijayaraghavan, K., Seigneur, C. (2005). Evaluation of three probing techniques in a three-dimensional air quality model. *Journal of Geophysical Research* 110, D02305.