

# Inventario de emisiones atmosféricas de Quito año 2003 y su distribución espacial y temporal

Bladimir Ibarra, René Parra, Víctor Valencia, Carlos Páez

Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito, CORPAIRE  
Av. Amazonas 2925, Quito, Ecuador

e-mail: bibarra@corpaire.org

## Resumen

El inventario considera las fuentes incluidas en un área de 1 grado geográfico por lado, que incluye al Distrito Metropolitano de Quito. Las fuentes consideradas se agrupan en tres sectores: fuentes móviles, puntuales y de área, las que incluyen a las fuentes naturales. Los contaminantes considerados, son los siguientes: óxidos de nitrógeno,  $\text{NO}_x$ ; compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano, COVNM; material particulado menor a diez micrones ( $\text{PM}_{10}$ ); material particulado menor a 2,5 micrones  $\text{PM}_{2,5}$ ; monóxido de carbono, CO; dióxido de azufre  $\text{SO}_2$ ; amoníaco  $\text{NH}_3$ ; dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ ; metano,  $\text{CH}_4$ ; y óxido nitroso,  $\text{N}_2\text{O}$ . El cálculo de las emisiones se realiza utilizando metodologías recomendadas por la EPA, Secretaría del Medio Ambiente de México, CARB; las fuentes y emisiones identificadas se distribuyen espacialmente en celdas de 15 segundos geográficos por lado; y, la distribución temporal se realiza identificando perfiles de emisión mensual, diario y horario, para las fuentes consideradas. Las emisiones totales, para distintos horizontes temporales y espaciales, se calculan mediante la integración de los aportes parciales, utilizando un sistema de información geográfica. Para el control de calidad se adaptó una metodología semicuantitativa.

Palabras clave: Contaminación atmosférica, gestión de la calidad del aire, inventario de emisiones, modelación de emisiones, sistemas de información geográfica, Quito, Ecuador.

## 1 Introducción

El inventario de emisiones a la atmósfera del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) para el año 2003 constituye el primer esfuerzo por identificar de manera detallada la contribución de cada una de las fuentes significativas al problema de la contaminación del aire presentando información total y desagregada espacial y temporalmente, conforme a los criterios que a continuación se indican.

Previamente hay que indicar que la metodología y los resultados de este inventario, son parte del trabajo de construcción del Sistema de Gestión del Inventario de Emisiones Atmosféricas del DMQ, SIGIEQ, orientado a obtener variados escenarios de emisión y, conjuntamente con la aplicación de un modelo numérico de transporte y procesos químicos, un mejor entendimiento de la contaminación del aire de Quito.

En cuanto al territorio analizado, para satisfacer los requerimientos de modelación y pronóstico de la calidad del aire, se ha definido un área cuadrada, denominada en adelante Malla de Inventario o simplemente Malla, de 1° geográfico por lado y un área aproximada de 12.323 km<sup>2</sup> que encierra al DMQ e involucra a otras jurisdicciones político-administrativas (ver Figura 1). La Malla se divide en 57.600 celdas cuadradas, de 15 segundos geográficos por lado, que es el mayor nivel de desagregación utilizado para el procesamiento de la información y análisis de resultados.

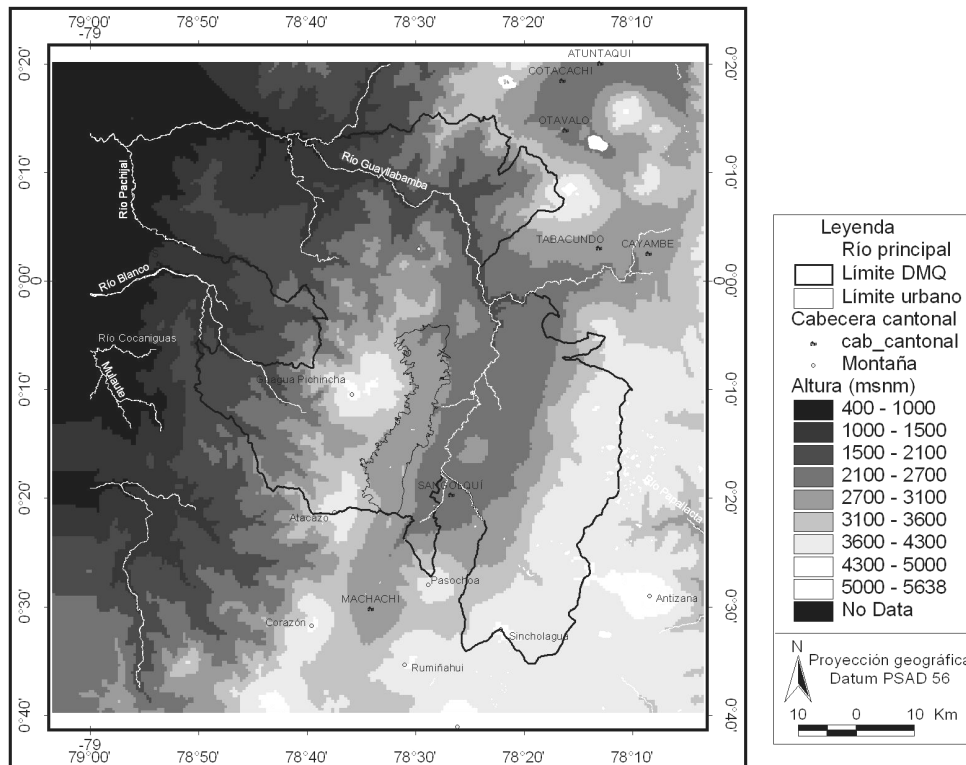


Figura 1: Ubicación general de la Malla de Inventario y del DMQ

Los contaminantes considerados, corresponden a tres grupos: los identificados como comunes en la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire, los precursores para la formación de ozono troposférico y los gases de efecto invernadero. Específicamente son los siguientes: óxidos de nitrógeno, NO<sub>x</sub>; compuestos orgánicos volátiles

diferentes del metano, COVNM; material particulado menor a diez micrones ( $PM_{10}$ ); material particulado menor a 2,5 micrones  $PM_{2,5}$ ; monóxido de carbono, CO; dióxido de azufre  $SO_2$ ; amoníaco  $NH_3$ ; dióxido de carbono,  $CO_2$ ; metano,  $CH_4$ ; y, óxido nitroso,  $N_2O$ .

Las fuentes se agrupan en tres categorías: móviles (tráfico vehicular y aéreo), puntuales (procesos de combustión industrial significativos, otros procesos industriales significativos y rellenos sanitarios) y de área (procesos industriales de menor significación, uso comercial y doméstico de solventes, canteras de materiales de construcción, vías y erosión de suelos, estaciones de servicio, ladrilleras, asaderos, uso doméstico y comercial de GLP, emisiones domésticas de amoníaco, florícolas, incendios y quemas y vegetación).

## **2 Aspectos generales del DMQ y la Malla de Inventario**

El DMQ tiene un área de 4.228 km<sup>2</sup> y una población para el año 2003<sup>1</sup> de 1.945.992 habitantes. Por su parte, la Malla tiene una población estimada de 2.408.130 habitantes.

### **2.1 Topografía, hidrología y climatología**

La altura media de Quito en el límite urbano es de 2.810 m.s.n.m. Está rodeada de montañas de la cordillera occidental (Pululahua, Pichincha y Atacazo), lo que dificulta su ventilación. La Malla del Inventario tiene mucho relieve, con alturas que van desde los 400 m.s.n.m. al noroccidente, hasta los 5.720 m.s.n.m. en el Antisana. Se encuentra en la mitad del mundo (Latitud 0°0'0"), lo que favorece una mayor insolación (alrededor de 2.000 horas anuales) y acelera la formación fotoquímica de contaminantes atmosféricos.

La temperatura media multianual de la estación Iñaquito, ubicada dentro del límite urbano, es de 14,6°C, con muy poca variación media mensual, pero con una fuerte variación durante el día, con valores que oscilan entre 9,9°C y 21,5°C. La precipitación media multianual es de 1.053 mm, con dos estaciones lluviosas: una que va desde febrero a mayo y otra que va de octubre a noviembre. Por su parte, junio, julio y agosto son los meses de menor precipitación, menor número de días con lluvia y de mayor insolación.

Asociado con esto se producen inversiones térmicas, casi siempre de tipo radiativas, principalmente en el llamado verano (julio, agosto y septiembre) y en el "Veranillo del Niño" (que se produce entre noviembre y diciembre). Estas inversiones provocan estabilidad atmosférica de tipo temporal, que favorecen el estancamiento de los contaminantes, normalmente hasta antes del mediodía. Las velocidades de viento diarias varían entre 1 y 2 m/s, pudiendo alcanzar valores de 2 a 4 m/s entre las 13h00

---

<sup>1</sup> En adelante, los datos estarán referidos al año 2003 y al DMQ, a menos que se diga explícitamente otra cosa.

y las 16h00. Durante el mes de agosto los promedios diarios se incrementan y varían entre 2 y 4 m/s.

Cabe destacar que existen microclimas urbanos diferenciados dentro de la misma ciudad de Quito y particularidades notables en cuanto al clima en todo el Distrito Metropolitano y la Malla de Inventario [1].

## 2.2 Fuentes de emisión del DMQ

De acuerdo al Octavo Auto monitoreo Ambiental (segundo semestre del año 2003) que las empresas entregan periódicamente a la autoridad local de control, existen 277 establecimientos industriales y de servicios con 610 fuentes fijas de combustión. Por su capacidad, actividad y emisiones reportadas, las tres centrales termoeléctricas son las más significativas.

La tasa de motorización registra un cambio acelerado [4], de 61 por 1.000 habitantes en 1992, a 123 en el 2003. Para este mismo año, el parque vehicular estimado es de 240.657 vehículos y con una actividad total anual de 4.028 millones de kilómetros. El combustible se comercializa al granel mediante 112 estaciones de servicio, 78 de las cuales se encuentran dentro del límite urbano.

El DMQ tiene 8.627 km de vías, cuyo 39,6% está dentro del límite urbano (202,5 km<sup>2</sup>). La parte más significativa del tráfico se distribuye en un entramado de 922,6 km, el 10,7% de la red vial.

Se han identificado 48 canteras de las que se extrae material de construcción, 21 de ellas se ubican en San Antonio de Pichincha. Las restantes 27 se distribuyen en 7 sectores del DMQ.

Quito tiene dos rellenos sanitarios, generadores de gases de interés ambiental variado: Zámbriza, al noreste de Quito y El Inga, al sureste. La tasa de generación de desechos sólidos per cápita es de 0,7 kg por día.

Por otra parte, en este inventario se ha tomado en cuenta los procesos industriales más difundidos (fuentes de área) y a los que por su tamaño y emisiones son importantes fuentes puntuales. Así, las fuentes de área incluyen panificación, impresión, tintorería y floricultura; las fuentes puntuales consideradas incluyen los siguientes procesos: extrusión y termoformado de plásticos, fabricación de pintura, secado de madera, fabricación de aglomerados, de cemento, de baterías, metalmecánica.

En cuanto al uso de suelo en la Malla de Inventario, importante dato para evaluar las emisiones provocadas por la vegetación, las categorías más importantes son: páramo (19%), pastos (10,3%), bosque de neblina montano (7,5%), cultivos de ciclo corto (7,4%), bosque siempre verde montano bajo intervenido (7,0%), bosque intervenido (6,6%), bosque natural (5,5%), matorral (5,5%), zonas erosionadas (4,5%), cultivos de maíz (4,1%), arboricultura tropical (3,4%), cultivos de palma africana (3,6%) y bosque siempreverde montano alto (3,2%). Las áreas urbanas o en proceso de urbanización representan el 2,1%.

### 3 Metodologías de cálculo

Los aspectos metodológicos utilizados para construir el inventario, se han dividido en tres partes: cálculo de las emisiones, distribución espacial y distribución temporal

#### 3.1 Cálculo de emisiones

De manera general, el cálculo de las emisiones de cada contaminante, para cada una de las categorías, se obtiene por el producto de la actividad - o consumo energético para el caso de los gases de efecto invernadero - y el factor de emisión correspondiente. Las emisiones totales y por cada celda de la Malla de Inventario, para cada horizonte temporal y para cada contaminante, se calculan con la siguiente ecuación:

$$E_i = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n A_{jk} \times FE_{ijk} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

$E_i$ : Emisión total del contaminante (i)

$A_{jk}$ : Actividad de la fuente (j) en la celda (k)

$FE_{ijk}$ : Factor de emisión del contaminante (i) asociada a la fuente (j) y a las características espaciales de la celda (k).

Las técnicas utilizadas para la estimación son las siguientes:

- *Muestras en la fuente*: únicamente para las fuentes fijas del DMQ que reportan caracterizaciones de emisiones a la atmósfera a la autoridad ambiental local [3].

- *Modelos de emisión*: el MOBILE 6.2.03 para las emisiones de COVNM y CH<sub>4</sub> del tráfico vehicular [8], a partir de los hidrocarburos totales previamente obtenidos; el TANKS para las emisiones de COVNM de los mayores centros de gestión de combustibles [7]; y, el modelo desarrollado por Guenther para obtener las emisiones de COVNM de las fuentes biogénicas [12].

- *Factores de emisión*: utilizando como fuentes de referencia principales los de la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal de México, para las fuentes móviles [20][21] y los de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos para las fuentes puntuales y de área [9][10][11][6], complementados con algunas fuentes secundarias. Los factores para los gases de efecto invernadero fueron extraídos de las publicaciones del IPCC [13][14].

- *Balance de materiales*: para la estimación de las emisiones de SO<sub>2</sub> de las fuentes móviles y de las fuentes fijas de combustión, asumiendo que todo el azufre contenido en el combustible se transforma a dióxido de azufre.

La Tabla 1 presenta un resumen de las técnicas utilizadas para la estimación de emisiones.

Para la estimación de la actividad se recurrió a una sistemática compilación de información proveniente de múltiples instituciones del gobierno nacional y local con competencia en cada una de las actividades económicas, constituyendo esta actividad quizás la que mayor tiempo y esfuerzo consumió debido a la dispersión existente y a la heterogénea calidad de los datos. De manera complementaria se recurrió a dos metodologías adicionales: encuestas (para los vehículos particulares a gasolina, ladrilleras y asaderos); y, levantamiento de información secundaria, tal como consumo de combustibles, uso de suelos, consumo de materias primas, entre otras. Un detalle preciso del origen de la información para cada fuente puede ser consultado en el Inventario de Emisiones del DMQ 2003 [2] y en los informes parciales correspondientes.

**Tabla 1.** Origen de la información utilizada para calcular las emisiones

Tipo de fuente	Metodología			
	Muestreo	Modelos	Factores	Balances
Fuentes móviles				
Vehículos en vías		X	X	X
Tráfico aéreo			X	
Fuentes fijas				
Centrales termoeléctricas	X		X	X
Combustión en industrias	X		X	X
Procesos industriales significativos			X	
Rellenos sanitarios			X	
Fuentes de área				
Combustión industrias				
Procesos industriales menos significativos			X	
Disolventes comerciales y domésticos			X	
Canteras			X	
Resuspensión vías no asfaltadas			X	
Resuspensión vías asfaltadas			X	
Erosión eólica del suelo			X	
Estaciones de servicio y almacenamiento		X	X	
Ladrilleras			X	
Asaderos			X	
Uso residencial GLP			X	
Domésticas de amoníaco			X	
Incendios y quemas			X	
Emisiones biogénicas		X	X	

### 3.2 Metodología para el procesamiento espacial de la información

Las 57.600 celdas de la Malla de Inventario corresponden a un arreglo bidimensional de 240 por 240. Toda la información espacial disponible ha sido colocada en formato vectorial (puntos, líneas y polígonos) y georeferenciada en

coordenadas geográficas, dentro de un sistema de información geográfica, ArcGis 9.0®.

Para la distribución espacial de las emisiones de cada una de las fuentes identificadas, se han definido los siguientes criterios:

- *Emisiones de escape de las fuentes de tráfico vehicular.* Se distribuyen en la red vial del modelo de tráfico del DMQ año 2003 [15], extendida en sus vías principales hasta los límites de la Malla de Inventario. La emisión de cada celda es igual a la integración de las emisiones de todos los tramos de vía que la intersecan; la emisión de cada tramo de vía es proporcional al producto de la actividad estimada de las diferentes categorías de vehículos y del factor de gradiente por contaminante y categoría vehicular, asociado a la vía.

- *Emisiones evaporativas de las fuentes de tráfico vehicular.* Se distribuyen en función de la distribución espacial de la población integrada del año 2003, esto es, de la población considerada no pobre, en atención a la predominancia de las emisiones de detención. Las emisiones de cada celda de la Malla de Inventario son proporcionales a la población estimada de la celda.

- *Tráfico aéreo.* Las emisiones del aterrizaje, operaciones del terminal aéreo y despegue, se distribuyen en cada una de las celdas de la Malla intersecadas por la implantación del aeropuerto y de manera proporcional al área de intersección.

- *Fuentes fijas.* Se digitalizó como puntos la ubicación de los establecimientos identificados como fuentes fijas de combustión o de proceso, en base a la información entregada a la Dirección Metropolitana de Medio Ambiente [3], contrastada con información consultada a la base de datos del Servicio de Rentas Internas (SRI) y a los propios establecimientos. Las emisiones de dichas fuentes-puntos, son asignadas a las celdas-polígonos correspondientes de la Malla.

- *Rellenos sanitarios.* Las emisiones se distribuyen espacialmente en las celdas de la Malla que intersecan con la implantación de los rellenos y de manera proporcional al área de intersección.

- *Procesos de área y otras.* Las emisiones de panaderías, imprentas, tintorerías, disolventes comerciales y domésticos, combustión residencial de GLP, domésticas de amoníaco, e incendios estructurales, se distribuyen de manera proporcional a la distribución espacial de la población del DMQ.

- *Quemas agrícolas.* Las emisiones se distribuyen en las áreas cuyo uso de suelo es el cultivo de maíz y de manera proporcional al 20% de la biomasa disponible.

- *Canteras.* Las emisiones se distribuyen espacialmente en polígonos cuyos vértices son las canteras identificadas en cada uno de los sectores: San Antonio; Pintag; Tumbaco; Lloa; Calderón; Pifo-Guayllabamba; Puembo; Nayón; Gualea; y, Guangopolo. Las emisiones de cada polígono-sector se distribuyen de manera uniforme en cada una de las celdas intersecadas de la Malla de Inventario.

- *Empresas florícolas.* Las emisiones se distribuyen de manera uniforme en las áreas de cultivos de flores identificadas, asumiendo que la producción y consumo de fertilizantes son directamente proporcionales a las áreas de cultivo identificadas por la Asociación de Productores y Exportadores de Flores del Ecuador “Expoflores”.

- *Ladrilleras y asaderos.* Las emisiones se distribuyen en los polígonos de implantación identificados por CORPAIRE, mediante una encuesta de campo. Las emisiones de cada uno de los polígonos se distribuyen de manera uniforme en cada una de las celdas de intersección de la Malla de Inventario.

- *Gasolineras.* Se distribuyen espacialmente en las celdas de intersección de los puntos identificados por la Dirección Nacional de Hidrocarburos (DNH), verificados y corregidos en base a consultas realizadas a la base de datos del SRI y a los mismos establecimientos. Las emisiones son proporcionales a la cantidad de combustible comercializado, reportado por la DNH.

- *Biogénicas o emisiones de la vegetación.* Se distribuyen en función de los usos de suelo identificados (mapas nacionales de uso de suelo) [19] y mapas de vegetación remanente [18]; y, de la interpolación espacial de la temperatura y radiación solar, proporcionada por las estaciones meteorológicas identificadas dentro de la Malla. Las emisiones de cada celda son directamente proporcionales al producto de la densidad de biomasa foliar del uso de suelo de la celda, y de los factores de corrección por temperatura y radiación fotosintéticamente activa correspondientes.

Para integrar la información de los puntos, líneas o polígonos de emisión identificados, dentro de las celdas-polígonos de la Malla, se realizan operaciones de geoprocésamiento de información vectorial, por medio de la extensión “*Geoprocessing*”, del programa ArcGis®. Las operaciones más utilizadas son las siguientes: intersección o unión de elementos, para intersecar y cortar los distintos temas con las celdas de la Malla y asignarles el identificados de celda correspondiente; agregación de elementos, que tienen el mismo identificador de celda; y, asignación de datos por localización, para asignar emisiones puntuales a las celdas-polígonos.

### 3.3 Perfiles de distribución temporal de las emisiones

Los perfiles, o distribución porcentual de las emisiones temporales horarias, diarias o mensuales, fueron determinados de tres maneras:

- Directamente de los reportes de emisiones o de actividad de las fuentes, cuando se tiene información de detalle horario y los factores de emisión utilizados no tienen variación temporal significativa (emisiones de escape de fuentes de tráfico, generación termoelectrica).

- A partir de la variación de los factores de emisión y de la actividad estimada, para los casos en que los factores son función de variables temporales conocidas tales como la temperatura, la precipitación, el número de días con lluvia, la velocidad de viento, la radiación solar, etc. (por ejemplo, canteras, erosión eólica, resuspensión de suelo, COVs de fuentes de tráfico).



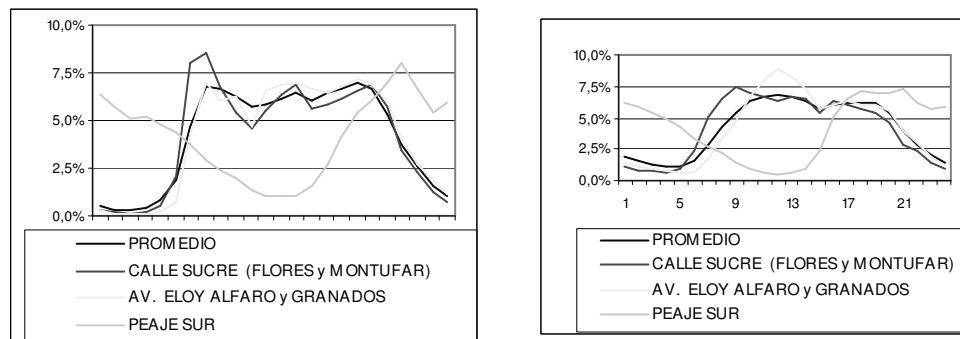
- A partir de los horarios de operación, estimados mediante una consulta directa realizada a informantes calificados, asumiendo como constantes en el tiempo los factores de emisión (procesos industriales puntuales y de área y quemas agrícolas).

En los perfiles diarios se establece diferencia entre día normal (lunes a viernes), sábado y domingo. La emisión anual es resultado de la suma de las contribuciones mensuales, estas a su vez de la suma de las contribuciones diarias y estas últimas de las horarias.

A continuación, a manera de ejemplo, se indican los criterios e información base para la construcción de los perfiles de cuatro tipos de emisión muy significativas en el inventario.

### 3.3.1 Emisiones de escape de fuentes de tráfico

Los perfiles de distribución temporal de emisiones en cada uno de los arcos de vía del modelo de tráfico del DMQ 2003 [15], se obtiene en base a la siguiente información: emisiones mensuales, en base a los despachos mensuales de gasolina; emisiones diarias, en base a los coeficientes de tráfico para día laborable, sábado y domingo, obtenidos a partir de los conteos vehiculares [5]; y, emisiones horarias, en base a los perfiles de tráfico horario de día laborable o fin de semana, también obtenidos a partir de los conteos de la misma fuente. Los perfiles horarios de los arcos con información de conteos, se extrapolan a los arcos vecinos de similares características de circulación y número de carriles; para el resto de arcos se utiliza un perfil horario medio construido en base a la ponderación de todos los perfiles con el tráfico.



**Figura 2:** Perfil horario de tráfico y emisiones vehiculares, día laborable (Derecha)

**Figura 3:** Perfil horario de tráfico y emisiones vehiculares, fin de semana (Izquierda)

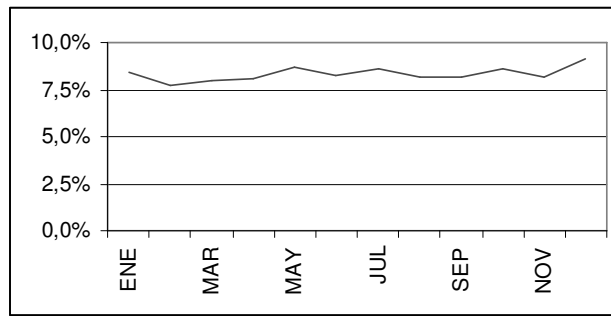


Figura 4. Perfil mensual de tráfico y emisiones vehiculares

### 3.3.2 Emisiones evaporativas de fuentes de tráfico

Las emisiones evaporativas de COVNM se calcula con las ecuaciones del modelo estándar que presenta CORINAIR [17]. Por tanto, los factores de emisiones evaporativas dependen de las propiedades del combustible (presión de vapor Reid, RVP), de la temperatura media, máxima y mínima, de la tecnología de control de emisiones (con cánister o sin cánister); y, de los hábitos de conducción (recorrido medio de cada viaje).

La RVP de los combustibles del Ecuador no registra variaciones mensuales significativas; igualmente, la variación mensual de la temperatura es poco significativa, por tanto, el perfil mensual de emisiones evaporativas será igual que el perfil mensual de las emisiones de escape. Las variaciones horarias de temperatura son pronunciadas, por lo que los factores de emisión varían y son función de la temperatura. Para las condiciones de Quito, las emisiones diurnas son mucho menores que las de detención y estas, con RVP constante, son constantes, excepto para los vehículos a gasolina sin cánister o incontrolados.

Por tanto, en la práctica, la variación horaria de las emisiones será función de la variación horaria de la temperatura, ponderada por la actividad del parque vehicular no controlado respecto de la actividad total.

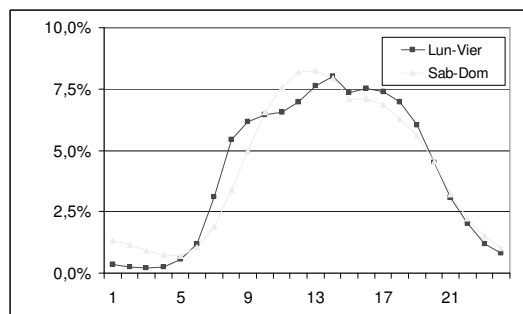


Figura 5. Perfil horario de emisiones vehiculares evaporativas

### 3.3.3 Centrales termoeléctricas

Se dispone de los reportes de funcionamiento horario, de todos los días del año 2003, lo que facilita la construcción de los perfiles de distribución temporal, considerando que las emisiones son proporcionales a la actividad.

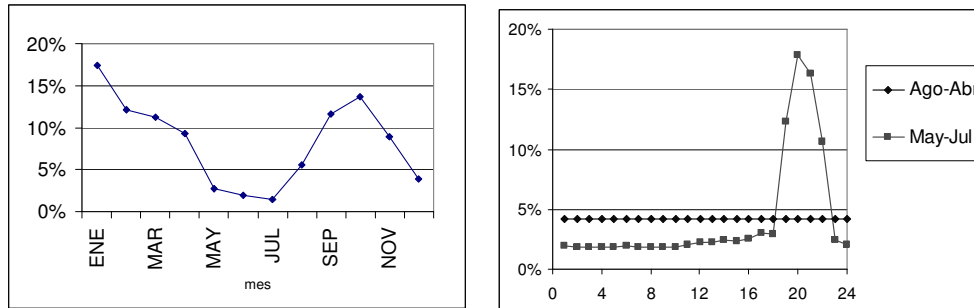


Figura 6: Perfil mensual para la generación térmica (Izquierda)

Figura 7: Perfil horario para la generación térmica (Derecha)

### 3.3.4 Perfil de emisión de fuentes biogénicas

No se tiene información de radiación solar horaria del año 2003, por lo que, para obtener una primera estimación de las emisiones durante un ciclo anual, es suficiente utilizar el día promedio del año, utilizando como información complementaria la del 2004 disponible. De este modo, con los promedios horarios de temperatura y radiación solar, se obtienen los factores de corrección horarios para isopreno, monoterpenos y otros compuestos orgánicos volátiles (cuya suma son las emisiones de COV biogénicas).

Las emisiones horarias de isopreno, dependen de la temperatura (T) y de la radiación solar (PAR), de acuerdo a la variación horaria del factor FCA [12]:

$$FCA(T, PAR) = C_T \cdot C_L \quad (\text{Ec. 2})$$

donde:

- $C_T$ : factor de corrección debido a T (adimensional).
- $C_L$ : factor de corrección debido a la PAR (adimensional).

Estos factores se calculan mediante las ecuaciones (3) y (4):

$$C_L = \frac{\alpha \cdot C_{L1} \cdot L}{\sqrt{1 + \alpha^2 \cdot L^2}} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$C_T = \frac{\exp \frac{C_{T1} \cdot (T - T_s)}{R \cdot T_s \cdot T}}{1 + \exp \frac{C_{T2} \cdot (T - T_m)}{R \cdot T_s \cdot T}} \quad (\text{Ec. 4})$$

siendo:

- $\alpha$ : 0,002 7 coeficiente empírico.
- $C_{L1}$ : 1,066 coeficiente empírico.
- L: PAR ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) en la celda de análisis.
- $C_{T1}$ : 95.000 J mol<sup>-1</sup>, coeficiente empírico.
- $C_{T2}$ : 230.000 J mol<sup>-1</sup>, coeficiente empírico.
- $T_s$ : 303 K, temperatura de condiciones de referencia.
- $T_m$ : 314 K.
- R: 8,314 (J K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>) constante universal de los gases.
- T: temperatura en superficie expresada en grados Kelvin, registrada en la celda de análisis.

Por su parte, las emisiones horarias de monoterpenos, dependen de la temperatura, de acuerdo a la siguiente relación [12]:

$$M(T) = \exp(BB \cdot (-T_s)) \quad (\text{Ec. 5})$$

donde:

- M(T): factor de corrección ambiental debido a la temperatura.
- B: 0,09 (K<sup>-1</sup>), coeficiente empírico.
- T: temperatura en superficie expresada en grados Kelvin, registrada en la celda k.
- Ts: 303 K, temperatura de condiciones de referencia.

La información meteorológica disponible fue procesada, para obtener valores horarios medios representativos para todo el año. Para cada hora del día medio anual, se construyen mapas de la temperatura y de la radiación solar, mediante la interpolación de los datos disponibles en las trece estaciones meteorológicas de la Malla.

Con esto, el perfil horario de emisiones de la vegetación, es el que se muestra en la Figura 8.

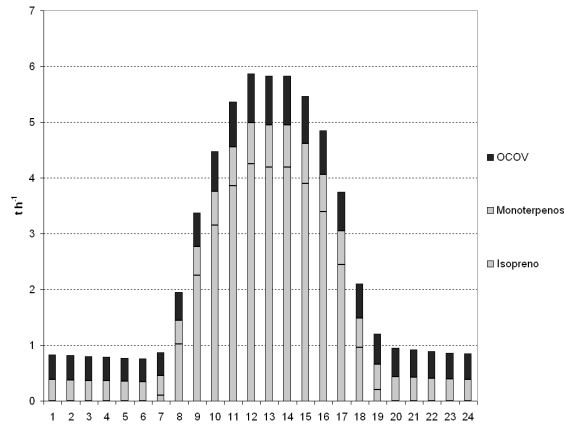


Figura 8: Perfil de emisiones horarias de COV de la vegetación.

#### 4 Resultados y discusión

Un resumen de las emisiones anuales del DMQ, en toneladas por año, se presentan en la Figura 9.

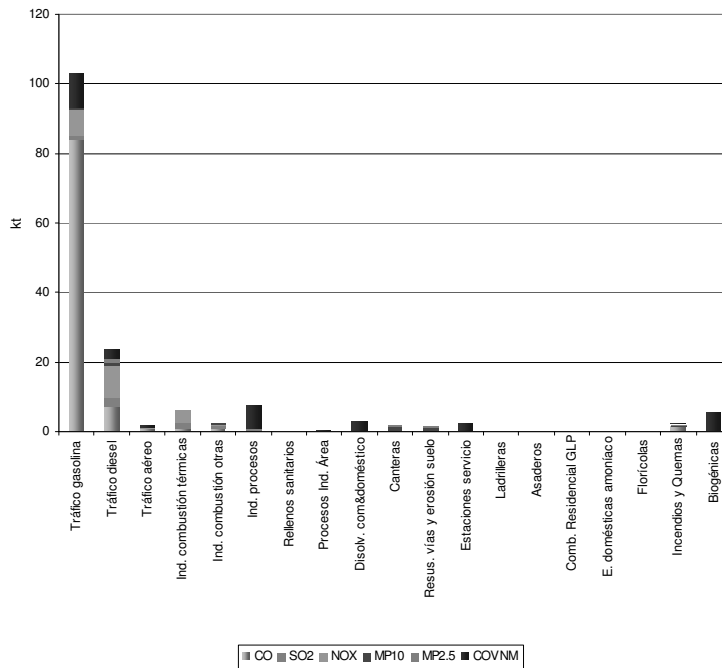


Figura 9: Emisiones por contaminante, por sector y por tipo de fuente, DMQ 2003 (kt/año)

Por su parte, los patrones de distribución espacial y temporal de las emisiones que a continuación se indica, están referidos a la Malla de Inventario y a los siguientes contaminantes: CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> y COVNM. A manera de ejemplo, se muestran los perfiles y mapas de las emisiones de CO, los mismos que se pueden obtener para los demás contaminantes.

#### 4.1 Emisiones de CO

La distribución espacial y temporal de las emisiones de CO (Figuras 10, 11 y 12) está dominada por la distribución del tráfico vehicular, los incendios forestales y las quemadas controladas. En promedio se emiten 309 toneladas por día, el 46% de las cuales se concentran dentro del límite urbano, que es apenas el 1,64% del área de la Malla de Inventario; los incendios y quemadas ocupan un área de emisiones significativa, pero son cantidades anuales pequeñas, concentradas en los meses de verano.

Las fuentes móviles emiten todo el año, con un pico mensual en diciembre; las fuentes fijas también emiten todo el año, aunque en mayores cantidades en enero y desde septiembre hasta noviembre. En cuanto a la distribución horaria, el 70,5% de las emisiones ocurren entre las 08h00 y las 19h00, con 3 picos claramente relacionados con la distribución del tráfico vehicular: uno en la mañana, desde las 08h00 hasta las 10h00; otro de menor intensidad, entre las 13h00 y las 15h00; y, otro en la tarde, desde las 16h30 hasta las 19h00. La hora de mayores emisiones, en un día laborable, es la 18h00.

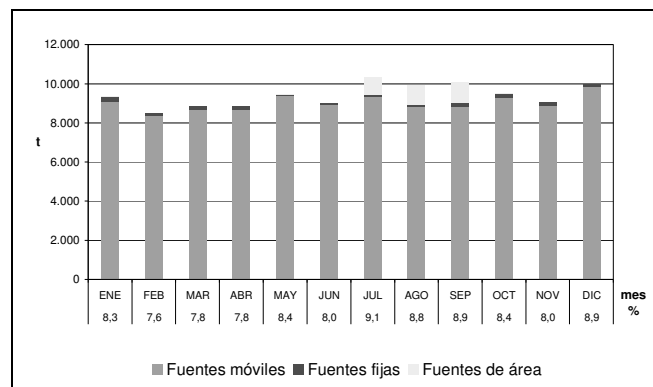
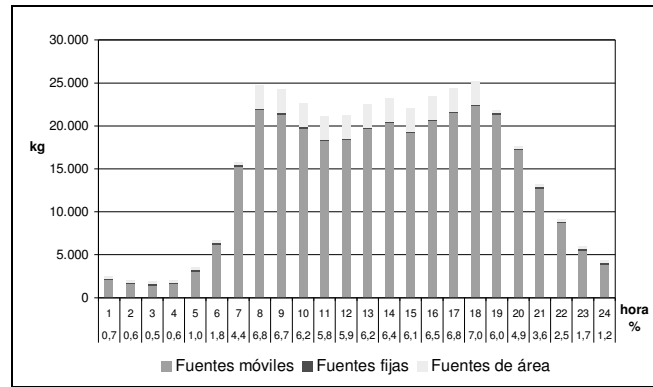
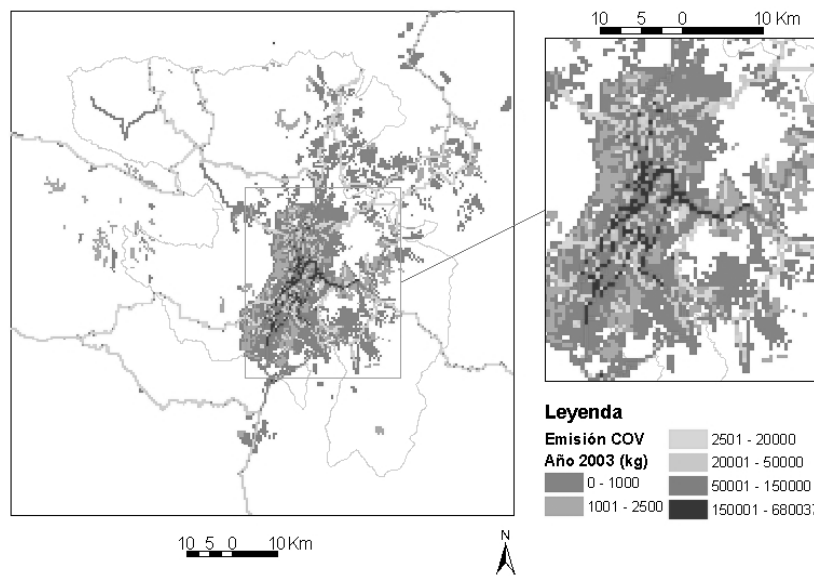


Figura 10. Perfil de emisiones mensual de CO (t/mes)



**Figura 11.** Perfil de emisiones horarias de CO, día laborable mes de agosto (kg/h)



**Figura 12.** Distribución espacial de las emisiones anuales de CO

#### 4.2 Emisiones de SO<sub>2</sub>

Las emisiones predominantes son las provenientes de tráfico vehicular y fuentes fijas. En promedio se emiten 18,7 toneladas diarias, 40% de las cuales se producen en Los Chillos, sitio de emplazamiento de las principales generadoras termoeléctricas, y otro 40% dentro del límite urbano.

En cuanto a la distribución mensual, se observan 2 picos, marcados por el incremento de la actividad de las centrales termoeléctricas: enero y, septiembre – noviembre. Finalmente, en cuanto a la distribución horaria, el 77% de las emisiones se

producen entre las 07h00 y las 21h00; se observan 3 picos: uno en la mañana, desde las 08h00 hasta las 10h00; otro entre las 13h00 y las 15h00; y, otro en la tarde, más pronunciado, desde las 17h00 hasta las 20h00. En los meses de mayor actividad termoeléctrica, las 18h00 es la de mayores emisiones.

#### **4.3 Emisiones de NO<sub>x</sub>**

Están dominadas por la distribución del tráfico vehicular y las fuentes fijas. El 40% de las emisiones se producen dentro del límite urbano del DMQ y 17% en Guangopolo, emplazamiento de las centrales termoeléctricas.

Al igual que en el SO<sub>2</sub>, la distribución mensual tiene un pico en enero y otro en octubre, marcados por el incremento de la actividad de las generadoras termoeléctricas. La distribución horaria, al igual que las emisiones de SO<sub>2</sub>, tiene 3 picos: uno en la mañana, desde las 08h00 hasta las 10h00; otro entre las 13h00 y las 15h00; y, otro desde las 17h00 hasta las 20h00.

#### **4.4 Emisiones de PM<sub>10</sub>**

El 18% de las emisiones de PM<sub>10</sub> se producen dentro del límite urbano, la casi totalidad de las cuales tienen su origen en las fuentes móviles. Por otra parte, el 11% de las emisiones se producen en San Antonio, Guayllabamba, Pomasqui y Calderón (que representan apenas el 2,2% de la Malla de Inventario), en las emisiones difusas de polvo provenientes de canteras, erosión eólica y resuspensión de vías. Anualmente en la Malla de Inventario se producen 7.994 toneladas.

La distribución mensual tiene un pico en los meses de verano, marcado por el incremento de las emisiones de área, especialmente de erosión de suelos, canteras y resuspensión de vías. En el verano, el 78% de las emisiones horarias ocurren entre las 08h00 y las 19h00, con un pico entre las 14h00 y las 15h00, la hora de mayor velocidad de viento.

#### **4.5 Emisiones de COVNM**

En la Malla de Inventario se producen en promedio 139,2 toneladas diarias de COVNM, 34% de las cuales se producen dentro del límite urbano, en su mayoría generadas por fuentes móviles; 16% de los COVNM se producen en el extremo occidental de la Malla de Inventario, en las plantaciones de palma africana, apenas el 3,3% del área.

La distribución mensual de las emisiones de COVNM tiene menos variaciones que la de los otros contaminantes descritos, pero registra un incremento en el período julio – septiembre, originado básicamente por el aumento de la temperatura y la radiación solar y las correspondientes emisiones biogénicas; por su parte, las emisiones de fuentes móviles ocurren durante todo el año, con un pico en diciembre. El 63% de las emisiones horarias ocurren entre las 09h00 y las 19h00, con un pico entre las 12h00 y las 16h00.



## 5 Metodología de evaluación de la calidad del inventario

Una de las tareas más relevantes en la construcción de este inventario de emisiones fue utilizar la mejor información disponible y procesarla de acuerdo a recomendaciones internacionalmente aceptadas, de manera de garantizar la objetividad de los datos consignados y justificar su uso en el diseño de las estrategias de prevención y control de la contaminación proveniente de las diferentes fuentes. Por ello, al inicio del proceso de elaboración se establecieron procedimientos generales de trabajo y criterios de análisis de los datos que sirvieron para su calificación y depuración. Pese a lo anterior, es necesario reconocer las limitaciones existentes que conspiran contra la exactitud de la información generada, por lo que es importante evaluar de manera individualizada cada componente del inventario total en la perspectiva de dejar en claro las principales incertidumbres y planificar las acciones tendientes a disminuirlas dentro del proceso de actualización de esta herramienta que se hará cada dos años, según lo establece el Plan de Manejo de la Calidad del Aire [16].

Para el área de estudio no existen otros inventarios de referencia, modelos de calidad del aire, ni suficiente información, que soporte la descripción estadística de los datos según una distribución de probabilidad. La escasez de datos es una gran limitante para la estimación de la incertidumbre de los inventarios de emisiones, para cuyo caso la [10] recomienda el uso de métodos de calificación semicuantitativos tales como el Data Attribute Rating System (DARS).

Por tanto, para evaluar la calidad de los diferentes componentes, se escogió un método semicuantitativo de clasificación, elaborado para este inventario y tomando como referencia otros métodos, que provee información significativa de las incertidumbres del inventario. El método se basa en una calificación alfabética y colorimétrica de los factores de emisión y las tasas de actividad, basada en criterios previamente definidos; la calificación compuesta o resultante, mostrada en la matriz de la Tabla 2, proporciona un indicador global de la calidad relativa de la estimación.

Los criterios para la calificación de los factores de emisión son similares a los recomendados por la EPA para la evaluación semicuantitativa de incertidumbre [10]: desde A, excelente, para factores desarrollados a partir de datos de calidad A, recogidos de un número de fuentes suficiente para minimizar la variabilidad; hasta E, pobre, para factores desarrollados con datos clasificados como C o D y donde hay razones para sospechar que no representan una muestra aleatoria. Por su parte, la calificación de los datos de actividad se basa en el origen de los mismos, así: datos de actividad medidos con exactitud y precisión y verificados de manera complementaria con otra información, reciben una calificación A; y, datos de actividad extrapolados de alguna actividad medida o correspondientes a otro país o región, tienen una calificación E.

**Tabla 2.** Matriz de calificación de la estimación de las emisiones

Actividad	Factor de emisión				
	A	B	C	D	E
A	A	A	B	C	C
B	A	B	B	C	D
C	B	B	C	C	D
D	C	C	C	D	D
E	C	D	D	D	E

Categoría A, calidad muy alta. El detalle de la información es suficiente para este y futuros inventarios.

Categoría B, calidad alta. El detalle de la información es bueno, pero se podrían tomar acciones para disminuir la incertidumbre.

Categoría C, calidad media. Se requiere información de mayor detalle cuando los recursos estén disponibles.

Categoría D, calidad baja. Deben tomarse acciones o incorporarlas dentro del siguiente Plan anual, para reducir la incertidumbre de este y de los futuros inventarios.

Categoría E, calidad muy baja. Deben tomarse acciones inmediatas o incorporarlas dentro del siguiente Plan anual, para reducir la incertidumbre de este y de los futuros inventarios.

Con los resultados de la combinación descrita en la Tabla 2, para cada uno de los componentes del inventario, se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Resumen de la evaluación de la calidad del inventario [2]

Categoría	Factores de emisión	VARIABLES de actividad	Estimación de la emisión
Fuentes móviles			
Vehículos en vías			
Particulares gasolina	C	B	B
Taxis a gasolina	C	C	C
Busetas a gasolina	D	C	C
Buses a gasolina	D	C	C
Pick Up a gasolina	C	B	B
Pesados a gasolina	D	C	C
Motos	D	C	C
Particulares a diesel	C	B	B
Taxis a diesel	D	C	C
Busetas a diesel	D	C	C
Buses a diesel	D	C	C
Pesados a diesel	D	C	C
Tráfico aéreo	E	C	D
Maquinaria y equipo fuera de vías	E	E	E
Fuentes fijas			
Centrales termoeléctricas	C	A	B
Combustión industrias y comercios	C	B	B
Procesos	D	B	C

Categoría	Factores de emisión	Variables de actividad	Estimación de la emisión
Rellenos sanitarios	D	C	C
Fuentes de área			
Combustión industrias y servicios	E	E	E
Procesos industriales	D	B	C
Disolventes comerciales y domésticos	D	C	C
Canteras	D	B	C
Resuspensión en vías no asfaltadas	D	C	C
Resuspensión en vías asfaltadas	D	C	C
Erosión eólica del suelo	D	C	C
Estaciones de servicio y almacenamiento	C	A	B
Ladrilleras	D	C	C
Asaderos	D	C	C
Combustión residencial GLP	D	B	C
Emisiones domésticas de amoníaco	D	C	C
Incendios y quemas	D	C	C
Emisiones biogénicas	E	D	D

Como puede verse, se ha hecho un esfuerzo considerable para afinar los datos de actividad y la distribución espacial y temporal, especialmente de los vehículos livianos a gasolina, de las fuentes fijas de combustión, procesos industriales puntuales y de área, canteras, estaciones de servicio y almacenamiento y combustión residencial de gas licuado de petróleo. Igualmente, cruzando información de varias fuentes, se ha obtenido factores de emisión de calidad media para los vehículos livianos, fuentes fijas de combustión y estaciones de servicio. Con esto, las mejores estimaciones del presente inventario corresponden a los vehículos particulares livianos, centrales termoeléctricas y estaciones de servicio y almacenamiento de combustibles.

Por otra parte, se requiere acciones inmediatas para obtener una estimación de emisiones superficiales de combustión de industrias y servicios y de las fuentes móviles fuera de vía (maquinaria y equipo) y para mejorar la estimación realizada de las emisiones biogénicas.

Finalmente, por la magnitud de su aporte al presente inventario, es necesario mejorar la calidad de los factores de emisión utilizados para las fuentes móviles.

## 6 Conclusiones y recomendaciones

Como colofón del estudio presentado, es oportuno rescatar las siguientes conclusiones sobre el trabajo realizado:

- El inventario realizado proporciona la información requerida para la simulación numérica de la calidad del aire de Quito y para la construcción de un sistema de gestión del inventario de emisiones orientado a obtener variados escenarios

de emisión, por la alta resolución espacial y temporal (emisiones horarias para celdas de tamaño menor a 1 km de lado) y la desagregación en altura de las celdas de emisión, dentro de un dominio cuadrado, georeferenciado, que inscribe la zona de interés.

- La dispersión de la información requerida sobre la actividad de las distintas fuentes de emisión y la falta de documentación sobre su calidad, son limitantes para atenuar los errores e incertidumbres de este trabajo.

- Si bien la literatura científica y técnica que se produce a nivel internacional ha sido una invaluable fuente de referencia para la construcción de este inventario, debe destacarse que las particularidades de Quito en cuanto a la operación de las distintas fuentes (altura, pendientes, relieve, calidad de combustibles, etc.), demandan esfuerzos adicionales para adecuar la información o para generar factores de emisión propios, medidos en sitio.

En lo que se refiere a los resultados presentados en este inventario, es importante destacar lo siguiente:

- En cuanto a su origen, el tráfico vehicular es la fuente más importante de emisión de contaminantes atmosféricos en el DMQ: genera el 97% del CO; el 53% del SO<sub>2</sub>; el 78% de los NO<sub>x</sub>; el 31% del PM<sub>10</sub>; el 45% del PM<sub>2,5</sub>; y, el 40% de los COVNM.

- Las fuentes de área, principalmente canteras, erosión de suelos, resuspensión de vías e incendios y quemas, son las principales fuentes de material particulado grueso PM<sub>10</sub> (57%) e importantes generadores de material particulado fino PM<sub>2,5</sub> (40%).

- La generación termoeléctrica es relevante en la generación de NO<sub>x</sub> (17%) y SO<sub>2</sub> (26%).

- Las emisiones biogénicas (18%) y las estaciones de servicio y gestión al granel de combustible (7%), son claves para entender el origen de los COVNM.

- En cuanto a la distribución espacial, las mayores emisiones se generan dentro del límite urbano, especialmente en el centro y centro norte del mismo, debido a la mayor concentración de la actividad vehicular. Igualmente, para el caso del material particulado, San Antonio, Guayllabamba, Pomasqui y Calderón son lugares significativos de generación de emisiones.

En la perspectiva de la actualización periódica de este inventario, se plantean las siguientes recomendaciones:

- Es necesario completar el inventario, principalmente con las siguientes subcategorías de emisiones: fuentes móviles fuera de vía tales como maquinaria agrícola, de jardinería, comercial e industrial; combustión industrial y comercial de fuentes de área; y, emisiones de desechos agrícolas y ganaderos.

- Debido a la importancia de las fuentes móviles en las emisiones de contaminantes a la atmósfera, es necesario mejorar esta estimación. Las acciones que permitirán mejorar los factores de emisión son, entre otras, las siguientes:

- Estratificar con más propiedad el parque vehicular de Quito, en atención a la presencia de las diferentes tecnologías de automotores, particularmente de control de emisiones, sistemas de alimentación de combustibles, de encendido, de transmisión. Esta estratificación también debe ser espacial, para dar cuenta del hecho cierto que en el norte se revisan vehículos con mejores prestaciones que en el sur de la ciudad.
- Determinar factores de emisión propios, especialmente para los vehículos particulares livianos a gasolina, tomando en cuenta las particularidades del DMQ en cuanto a tecnologías de automotores, pendientes, ciclos de conducción, velocidades medias de circulación, calidad de combustibles, etc.

## Referencias

- [1] CORPAIRE. 2005. *Plan de manejo de la calidad del aire del Distrito Metropolitano de Quito 2005 - 2010*. <http://www.corpaire.org>.
- [2] CORPAIRE. 2006. *Inventario de emisiones del Distrito Metropolitano de Quito 2003*. Corporación para el Mejoramiento de la Calidad del Aire de Quito, CORPAIRE.
- [3] DMMA. 2004. “*Reportes del Octavo y del Noveno Automonitoreo de emisiones de fuentes fijas. Dirección Metropolitana de Medio Ambiente 2003- 2004*”. Dirección Metropolitana de Medio Ambiente del DMQ.
- [4] DMT. 2002. *Plan Maestro de Transporte para el Distrito Metropolitano de Quito, Propuesta*. Dirección Metropolitana de Transporte y Vialidad.
- [5] EMSAT. 2005. “Perfiles de Tráfico 1999 – 2001”. *Conteos Manuales y automáticos de la red de semaforización*. Empresa Metropolitana de Servicios y Administración del Transporte, Dirección de Informática. Archivos . XLS.
- [6] EPA(f). 2005. “National Emission Inventory Data, NEID”. En *Airchief 12*. CD Rom. Environmental Protection Agency, EPA.
- [7] EPA. “User’s Manual for TANKS 4.0”. [www.epa.gov/ttn/chieff/software/tanks/](http://www.epa.gov/ttn/chieff/software/tanks/). U.S. Environmental Protection Agency, EPA.
- [8] EPA. 2003. *User’s Guide to MOBILE 6.1 and MOBILE 6.2. Mobile Source Emission Factor Model*. <http://www.epa.gov/otaq/models.htm>. U.S. Environmental Protection Agency, EPA.
- [9] EPA. 2005. “Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Volume 1: Stationary Point and Area Sources”. *Airchief 12*. CD ROM. U.S. Environmental Protection Agency, EPA.
- [10] EPA. 2005. “Emission Inventory Improvement Program, EIIP”. *Airchief 12*. CD ROM. U.S. Environmental Protection Agency, EPA.
- [11] EPA. 2005. “Residencial and commercial/institutional natural gas and liquefied petroleum gas (LPG) combustion”, en *Area sources methods – additional documents*.

*Airchief 12, EIIP*. CD ROM. U.S. Environmental Protection Agency, EPA.

- [12] Guenther A.B., Zimmerman P.R. and Harley P.C. 1993. "Isoprene and Monoterpenes Emission Rate Variability: Model Evaluations and Sensitivity Analysis". *Journal of Geophysical Research*, 98(D7).
- [13] IPCC(a). 1997. "Volume 2 Workbook". *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [14] IPCC(b). 1997. "Volume 3 Reference Manual". *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [15] León y Godoy Consultores. 2004. *Modelo de Tráfico del Distrito Metropolitano de Quito*. Dirección Metropolitana de Transporte, DMT. Archivos digitales formato .SHP.
- [16] Municipio del Distrito Metropolitano de Quito y CORPAIRE. 2005. *Plan de Manejo de la Calidad del Aire del Distrito Metropolitano de Quito 2005 – 2010*. Quito, Ecuador.
- [17] Parra René. 2004. "Desarrollo del modelo EMICAT2000 para la estimación de contaminantes del aire de Catalunya y su uso en la modelación de la dispersión fotoquímica". *PhD. Thesis, Universidad de Catalunya*.
- [18] Sierra Rodrigo, et al. 2005. *Mapa de Vegetación de los Andes del Ecuador Esc. 1:250000*. Ecociencia.
- [19] SIGAGRO – Sistema de Información Geográfica y Agropecuaria. 2003. *Mapa de usos de suelo del Ecuador Esc. 1:50000*. Ministerio de Agricultura.
- [20] SMAa. 2005. *Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2000*. Secretaría del Medio Ambiente – Gobierno del D.F. México.
- [21] SMAb. 2005. "Memorias de cálculo, Anexo A". *Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2000*. Secretaría del Medio Ambiente – Gobierno del D.F. México.