

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Inventario de emisiones atmosféricas del tráfico vehicular y gasolineras
del Distrito Metropolitano de Quito. Año base 2012**

Dayana Jazmin Vega Vásquez

René Parra, Ph.D, Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito
para la obtención del título de Ingeniera Ambiental

Quito, mayo de 2015

**Universidad San Francisco de Quito
Colegio de Ciencias e Ingeniería**

HOJA DE APROBACION DE TESIS

**Inventario de emisiones atmosféricas del tráfico vehicular y gasolineras
del Distrito Metropolitano de Quito. Año base 2012**

Dayana Jazmin Vega Vásconez

René Parra, Ph.D
Director de Tesis

.....

Valeria Ochoa, Ph.D
Miembro del Comité de Tesis

.....

Rodny Peñafiel, Ph.D
Miembro del Comité de Tesis

.....

Ximena Córdova, Ph.D
Decana Escuela de Ingeniería
Colegio de Ciencias e Ingeniería

.....

Quito, mayo de 2015

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

Nombre: Dayana Jazmin Vega Vásquez

C. I.: 2100206883

Fecha: mayo de 2015

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, por su apoyo incondicional durante toda mi carrera universitaria, por el amor con el que nos han formado y guiado.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al Dr. René Parra por su guía, paciencia y apoyo en el proceso de elaboración de este trabajo y durante la carrera de estudio.

A mi profesores Rodny Peñafiel, Maria del Carmen Cazorla, Valeria Ochoa y a Pablo Dávila quienes compartieron sus conocimientos en el desarrollo de mi formación profesional.

A los ingenieros Henry Vilatuña y Wladimir Aguirre de la Secretaría de Ambiente del DMQ, por la entrega de la información solicitada.

A mis compañeros y amigos que estuvieron conmigo durante este proceso.

RESUMEN

El tráfico vehicular y las gasolineras son fuentes de emisiones atmosféricas relevantes en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). Al momento el DMQ cuenta con tres inventarios de emisiones atmosféricas (años base 2003, 2005 y 2007), para los cuales se han utilizado factores de emisión de la literatura internacional. En este trabajo se presenta una actualización del inventario de emisiones atmosféricas del tráfico vehicular y de gasolineras para el DMQ, tomando como base el año 2012. Para el desarrollo de este inventario de emisiones, se utilizó la mejor información disponible sobre las estadísticas de venta y propiedades de los combustibles, de la composición parque vehicular y de la intensidad de tráfico. En la deducción de los factores de emisión de tráfico, se resalta el uso de información local y de los registros de los controles de emisión de la Revisión Técnica Vehicular (RTV). El tráfico vehicular presenta un aporte de: 102 667.4 t/año de CO, 20 808.1 t/año de NO_x, 13 185.6 t/año de COVNM, 1656.5 t/año de MP₁₀, 1211.2 t/año de MP_{2.5} y 451.1 t/año de SO₂. Los vehículos a gasolina emiten el 86.3% de CO, 77.0% de COVNM y 75.3% de SO₂. Los vehículos a diésel emiten el 82.5% de MP_{2.5}, 76.4% de MP₁₀ y 60.6% de NO_x. Las gasolineras y el centro de distribución “El Beaterio” aportan con 5242.4 t/año de COVNM. Adicionalmente, una comparación entre el número de vehículos que se presentaron a la RTV, y la cantidad de vehículos requeridos para el consumo de combustible comercializado, muestra que existe alrededor de un 25% de vehículos que circulan sin presentarse a la RTV. La información utilizada para la elaboración de este inventario permitió reducir el nivel de incertidumbre, en relación a versiones anteriores. Los mapas de emisión horarios que se obtengan a partir de este inventario pueden ser utilizados para estudios de transporte químico de los contaminantes del aire, por medio de modelos numéricos de última generación.

Palabras Clave: Revisión Técnica Vehicular, factores de emisión, DMQ, vehículos a gasolina, vehículos a diésel.

ABSTRACT

The vehicular traffic and gasoline distribution are important atmospheric emission sources in the Distrito Metropolitano of Quito (DMQ). To date, there are 3 officially published emissions inventories (2003, 2005 and 2007 base year), made using international emission factors. This paper is an update of the atmospheric emission inventory from vehicular traffic and gasoline stations for the DMQ, taking 2012 as base year. The emissions inventory was developed using the best information available about sales statistics, fuel properties, vehicle fleet's composition and the traffic intensity. Traffic emissions were derived using local information and records of the Vehicular Technical Review (VTR). The vehicle emissions are responsible for 102 667.4 t/year of CO, 20 808.1 t/year of NO_x, 13 185.6t/year of NMVOCs, 1656.5 t/year of PM₁₀, 1211.2 t/year of PM_{2.5} and 451.1 t / year of SO₂. The gasoline vehicles emit 86.3% of CO, 77.0% of NMVOC and 75.3% of SO₂. The diésel vehicles account for 82.5% of PM_{2.5}, 76.4% of PM₁₀ and 60.6% of NO_x. The gasoline distribution contributes to 5242.4 t/ year of NMVOCs emissions. Additionally, a comparison in 2012 of vehicles attending the VTR in 2012, and the number of vehicles required for the consumption of fuel sold, results in estimated of 25% of vehicles in the DMQ not attending the VTR. The information used for the preparation of this inventory allows reducing the level of uncertainty in relation to previous versions. Hourly emission maps obtained from this inventory can be used to develop last generation numeric models of chemical transport of air pollutants.

Keywords: Vehicular Technical Review (VTR), emission factors, DMQ, gasoline vehicles, diésel vehicles.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
ACRÓNIMOS	13
1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. Antecedentes	14
1.2. Efectos de la contaminación del aire	15
1.3. Inventarios de emisiones atmosféricas en el Ecuador.....	16
1.4. El tráfico vehicular y su aporte a la contaminación.....	16
1.5. Objetivos del estudio	19
1.5.1. Objetivo General.....	19
1.5.2. Objetivos Específicos.	19
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1. Inventario de emisiones atmosféricas	20
2.1.1. Características del inventario de emisiones atmosféricas.....	20
2.1.2. Tipos de fuentes emisoras.	21
2.1.3. Enfoques para el desarrollo de emisiones.....	21
2.1.4. Modelo básico de emisiones.....	21
2.1.5. Análisis de incertidumbre.....	23
2.2. Funcionamiento de los motores de gasolina y diésel.....	25
2.2.1. Motor a gasolina.	26
2.2.2. Motor a diésel.	27
2.3. Emisiones del tráfico vehicular.....	28
2.3.1. Emisiones del tubo de escape.	28
2.3.2. Emisiones evaporativas.	32
2.3.3. Emisiones por abrasión.....	32
2.3.4. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.....	33
2.4. Emisiones de las gasolineras y “El Beaterio”	33
2.5. Compuestos analizados.....	34
2.5.1. Óxidos de nitrógeno (NO _x).....	34
2.5.2. Monóxido de carbono (CO).....	35
2.5.3. Compuestos Orgánicos Volátiles No Metano (COVNM).....	35
2.5.4. Material Particulado (MP ₁₀ y MP _{2.5}).....	36
2.5.5. Dióxido de azufre (SO ₂).	37

2.5.6.	Gases de Efecto Invernadero (GEI).....	37
3.	MÉTODO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	39
3.1.	Área de estudio	39
3.2.	Características del inventario de emisiones atmosféricas	40
3.3.	Emisiones del tráfico vehicular.....	42
3.3.1.	Modelo de emisión.	42
3.3.2.	Actividad.	47
3.3.3.	Factores de emisión	52
3.4.	Emisiones de las gasolineras y “El Beaterio”	55
3.4.1.	Modelo de emisión.	55
3.4.2.	Actividad.	56
3.4.3.	Factores de emisión.	56
3.5.	Propiedades de los combustibles	57
4.	RESULTADOS Y DISCUSION	58
4.1.	Emisiones del tráfico vehicular.....	58
4.1.1.	Según el tipo de emisión.....	58
4.1.2.	Según el tipo de combustible.....	59
4.1.3.	Según la categoría.....	60
4.2.	Emisiones de gasolineras y “El Beaterio”	62
4.3.	Emisiones totales del tráfico vehicular, gasolineras y “El Beaterio”.....	63
4.4.	Comparación con inventarios oficiales desarrollados en el DMQ.....	65
4.5.	Mapas de emisión de contaminantes.....	66
4.5.1.	Mapas de emisión de contaminantes del tráfico vehicular.	66
4.5.2.	Mapa de emisión de contaminantes de las gasolineras y “El Beaterio”.....	71
4.5.3.	Mapa de emisiones totales de COVNM.	73
4.6.	Análisis de incertidumbre.	74
5.	CONCLUSIONES.....	77
6.	RECOMENDACIONES	79

TABLAS

Tabla 1. Aporte del tráfico vehicular y las gasolineras a las emisiones atmosféricas totales en el DMQ, año 2007 (porcentaje).	17
Tabla 2. Sistema de calificación de la actividad.	24
Tabla 3. Sistema de calificación de los factores de emisión.	24
Tabla 4. Matriz de calificación de las estimaciones de las emisiones.	25
Tabla 5. Parque vehicular que circuló en el año 2012.	48
Tabla 6. Parque vehicular a gasolina que circuló en el DMQ, en el año 2012.	49
Tabla 7. Parque vehicular a diésel que circuló en el DMQ, en el año 2012.	50
Tabla 8. Parque vehicular total que circuló en el DMQ, en el año 2012.	51
Tabla 9. Fuente o procesamiento de los Factores de Emisión para el tráfico vehicular.	52
Tabla 10. Consumo de combustible en el DMQ y en el cantón Rumiñahui, año 2012.	56
Tabla 11. Factores de emisión de COVNM, por proceso, en las gasolineras.	57
Tabla 12. Factores de emisión de COVNM, por proceso, en el “El Beaterio”.	57
Tabla 13. Propiedades de los combustibles.	57
Tabla 14. Estimación anual de las emisiones de contaminantes producidas por el tráfico vehicular en el DMQ. Desglose por tipo de emisión. Año 2012.	58
Tabla 15. Porcentaje de emisiones desagregadas según la categoría.	61
Tabla 16. Emisiones de COVNM calculadas para el año 2012 (t/año).	62
Tabla 17. Emisiones calculadas para el DMQ, para el año 2012 (t/año).	63
Tabla 18. Emisiones calculadas para el DMQ y Rumiñahui, para el año 2012 (t/año).	64
Tabla 19. Comparación de resultados con otros inventarios del DMQ, considerando las emisiones del tráfico vehicular, gasolineras y “El Beaterio”.	65
Tabla 20. Análisis de incertidumbre para las emisiones del tráfico vehicular.	75
Tabla 21. Análisis de incertidumbre para las emisiones de las gasolineras y “El Beaterio”.	76

FIGURAS

Figura 1. Ciclo de cuatro tiempos en el motor a gasolina.	27
Figura 2. Variación de emisiones en el tubo de escape, respecto a la relación lambda.	29
Figura 3. Ubicación del Área de Estudio.	40
Figura 4. Malla del inventario de emisiones compuesta por 200 celdas horizontales y verticales, cada celda tiene 30 segundos geográficos ($\approx 0.9\text{km}$).....	41
Figura 5. Factores de emisión en caliente de NO_x para los automóviles livianos a gasolina.	53
Figura 6. Factores de emisión en caliente de CO para los automóviles livianos a gasolina.	54
Figura 7. Factores de emisión en caliente de COVNM para los automóviles livianos a gasolina. ..	54
Figura 8. Porcentaje de emisiones por tipo combustible.....	59
Figura 9. Mapa de la intensidad diaria de tráfico vehicular, representativo para el año 2012.	67
Figura 10. Mapa de emisiones de NO_x (t/año), provenientes del tráfico vehicular. Año 2012.	68
Figura 11. Mapa de emisiones de CO (t/año), provenientes del tráfico vehicular. Año 2012.	69
Figura 12. Mapa de emisiones de COVNM (t/año), provenientes del tráfico vehicular. Año 2012.	69
Figura 13. Mapa de emisiones de MP_{10} (t/año), provenientes del tráfico vehicular. Año 2012.	70
Figura 14. Mapa de emisiones de $\text{MP}_{2.5}$ (t/año), provenientes del tráfico vehicular. Año 2012.	70
Figura 15. Mapa de emisiones de SO_2 (t/año), provenientes del tráfico vehicular. Año 2012.....	71
Figura 16. Ubicación de las gasolineras y “El Beaterio” en el DMQ y sus alrededores.	72
Figura 17. Mapa de emisiones de COVNM (t/año), provenientes de las gasolineras y “El Beaterio”. Año 2012.....	72
Figura 18. Mapa de emisiones totales de COVNM (t/año), provenientes del tráfico vehicular, las gasolineras y “El Beaterio”. Año 2012.	73

ACRÓNIMOS

ARCH:	Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero
CORPAIRE:	Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito
COVNM:	Compuestos Orgánicos Volátiles No Metano
COVs:	Compuestos Orgánicos Volátiles
DMQ:	Distrito Metropolitano de Quito
EEA:	Agencia Ambiental Europea (por sus siglas en inglés)
US-EPA:	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés)
GEI:	Gases de Efecto Invernadero
IARC:	Agencia de Investigación del Cáncer de la OMS (por sus siglas en inglés)
IEA:	Agencia Internacional de Energía
IMD:	Intensidad Media Diaria
IPCC:	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
MP:	Material Particulado
MP₁₀:	Material Particulado con diámetro aerodinámico menor de 10 micras
MP_{2.5}:	Material Particulado con diámetro aerodinámico menor de 2.5 micras
NO_x:	Óxidos de Nitrógeno
OMS:	Organización Mundial de la Salud
OPS:	Organización Panamericana de la Salud
PNCA:	Plan Nacional de Calidad del Aire
PNUMA:	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
RTV:	Revisión Técnica Vehicular
SA:	Secretaría de Ambiente del Municipio de Quito
SIG:	Sistemas de Información Geográfica

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La contaminación del aire forma parte de la vida moderna y según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), es considerada un serio riesgo para la salud ambiental mundial (PNUMA, 2014). La contaminación del aire exterior se define como la presencia en la atmósfera de uno o más contaminantes, combinaciones o derivaciones, que en determinadas concentraciones y/o duraciones causan daño a la salud humana, animal, a las plantas, a la propiedad o interfiere en el ejercicio de las actividades (Wark & Warner, 1992).

Las fuentes de contaminación del aire pueden ser de origen natural o antropogénico (Vallero, 2008). Los contaminantes de origen natural provienen de fuentes y/o fenómenos como erupciones volcánicas, tormentas de arena, resuspensión eólica, incendios forestales, descomposición de la materia orgánica en el suelo y océanos. La contaminación antropogénica se debe principalmente al uso de combustibles fósiles para actividades industriales y medios de transporte.

Los contaminantes también pueden ser de origen primario o secundario (Vallero, 2008). Cuando los contaminantes son emitidos directamente a la atmósfera desde su fuente de emisión, se denominan primarios. En cambio, los contaminantes secundarios son aquellos que se forman como consecuencia de reacciones químicas entre los contaminantes primarios y algún constituyente de la atmósfera.

Además de las fuentes de emisión, la calidad del aire de una localidad está determinada por el comportamiento y las características de la atmósfera. Los contaminantes

en la atmósfera pueden ser dispersados, transformados, concentrados o depositados en sus diferentes formas de sumidero (Wallace & Hobbs, 2006).

1.2. Efectos de la contaminación del aire

En el año 2012, a nivel mundial, la contaminación atmosférica causó la muerte prematura de aproximadamente 3.7 millones de personas. La OMS estima que un 80% de estas defunciones se deben a la cardiopatía isquémica y a los accidentes cerebrovasculares; en tanto, el otro 20% está relacionado con infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores y con cáncer de pulmón (OMS, 2014). En el año 2013, la Agencia de Investigación del Cáncer de la OMS (IARC) decidió incluir a la contaminación del aire exterior dentro del Grupo 1, como cancerígeno para el ser humano (IARC, 2013).

A nivel local poco se ha documentado sobre los efectos de la contaminación del aire en la salud. Según datos de la Organización Panamericana de Salud (OPS) (2010), en el Ecuador, se producen cerca de 500 muertes por año debido a enfermedades relacionadas con la mala calidad del aire. Así también, un estudio realizado en Quito en el año 2001 evidenció que los niños que asistían a escuelas ubicadas en lugares de creciente contaminación ambiental tenían mayor incidencia de infecciones respiratorias (OPS, 2001).

La contaminación del aire produce efectos negativos sobre los bienes materiales y la vegetación. Los metales se corroen más rápido en ciudades con mayores niveles de contaminación. La lluvia ácida afecta a las infraestructuras, incluidos los monumentos históricos. La contaminación del aire puede provocar agrietamiento en los productos de caucho, nylon, plásticos y colorantes; que no están elaborados con aditivos antioxidantes (De Nevers, 1998). En cuanto a los efectos sobre las plantas, el ozono (O₃) interactúa de

forma negativa con las membranas celulares de éstas y provoca una supresión de la fotosíntesis (Fitzgerald et al., 2009).

1.3. Inventarios de emisiones atmosféricas en el Ecuador

En el Ecuador, a través del Plan Nacional de la Calidad del Aire (PNCA), dentro de su Programa 1. Control y Vigilancia de la Calidad del Aire, se promueve la realización de inventarios de emisiones, en ciudades con poblaciones mayores a 150 000 habitantes (MAE, 2010). En este contexto, en el 2013, el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE) publicó los inventarios de emisiones para 9 cantones del país: Ambato, Riobamba, Santo Domingo de los Colorados, Latacunga, Ibarra, Manta, Portoviejo, Esmeraldas y Milagro, con año base 2010 (MAE, 2013). Además, ciudades como Quito y Cuenca cuentan ya con inventarios de emisiones. La ciudad de Cuenca, por ejemplo, tiene inventarios de los años 2007 y 2009. En tanto, el primer inventario de emisiones atmosféricas del DMQ se realizó en el año 2003, posteriormente en el 2005, 2007 y ahora se encuentra disponible el borrador del año 2009.

1.4. El tráfico vehicular y su aporte a la contaminación

Diversos estudios concuerdan en señalar a los vehículos como una de las principales fuentes de contaminación del aire urbano (Molina & Molina, 2004), (Colville et al., 2001), (Dora et al., 2011). En el Ecuador, el inventario de emisiones atmosféricas del año 2010, llevado a cabo en 9 cantones del país, determinó que el tráfico vehicular, con respecto al total cantonal, aporta entre el 99.1 - 99.9% de las emisiones de monóxido de carbono (CO), 48.1 - 99% de óxidos de nitrógeno (NO_x), 24 - 53.3% de Compuestos Orgánicos Volátiles No Metano (COVNM), 3.6 - 95.3% de Material Particulado con diámetro aerodinámico

menor a $10\mu\text{m}$ (MP_{10}), 4.9 - 97.6% de Material Particulado con diámetro aerodinámico menor a $2.5\mu\text{m}$ ($\text{MP}_{2.5}$) y 1.2 - 99.6% de dióxido de azufre (SO_2) (MAE, 2013).

En el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) todos los inventarios realizados hasta la fecha indican que el tráfico vehicular es la principal fuente de contaminación atmosférica (CORPAIRE, 2006), (CORPAIRE, 2008), (CORPAIRE, 2009), (Secretaría de Ambiente, 2012 a). Según el inventario de emisiones atmosféricas del DMQ, año 2007, el tráfico vehicular aportó con 101 174 t de CO/año, 17 960 t de NO_x /año, 14 220 t de COVNM/año, 1218 t SO_2 /año, 859 t de MP_{10} /año y 634 t de $\text{MP}_{2.5}$ /año. En cambio, las emisiones desde las gasolineras y el centro de acopio de combustibles (“El Beaterio”) fueron de 3771 t de COVNM/año (CORPAIRE 2009). La Tabla 1 presenta el aporte, en porcentaje, del tráfico vehicular y las gasolineras a las emisiones atmosféricas totales del DMQ.

Tabla 1. Aporte del tráfico vehicular y las gasolineras a las emisiones atmosféricas totales en el DMQ, año 2007 (porcentaje).

Fuentes	Contaminantes Primarios						Gases de Efecto Invernadero		
	NO_x	CO	COVNM	MP_{10}	$\text{MP}_{2.5}$	SO_2	CO_2	CH_4	N_2O
Tráfico Vehicular	52.3	97.3	39.4	26.2	45.6	11.9	63.3	5.6	73.3
Gasolineras y "El Beaterio"			10.4						

Fuente: (CORPAIRE, 2009).

El tráfico vehicular aporta el 97.3% del CO total emitido en el DMQ, el 52.3% de NO_x , el 45.6% del $\text{MP}_{2.5}$, el 39.4% de los COVNM, el 26.2% de MP_{10} , y el 11.9% del SO_2 (CORPAIRE, 2009). En cuanto a los Gases de Efecto Invernadero (GEI), el tráfico vehicular es la principal fuente de emisión de N_2O (73.3%) y de CO_2 (63.3%). Las gasolineras y “El Beaterio” aportan el 10.4% de las emisiones totales de COVNM.

Los inventarios de emisiones atmosféricas deben ser actualizados de forma periódica, en razón del crecimiento poblacional, la variación del número de fuentes, los cambios en la operación de las fuentes, la vigencia de nuevas regulaciones, cambios en la calidad de los combustibles, y mejora de los métodos de cálculo y factores de emisión (US-EPA, 1997).

Para el caso de las fuentes móviles, en Quito, se estima que cada año ingresan cerca de 40 000 vehículos nuevos al parque automotriz (AEADE, 2013). Se calcula que entre el año 2002 y 2008, la tasa de motorización en el DMQ se incrementó en un 29% (EPMOP, 2010). El aumento del parque vehicular genera problemas asociados con la congestión, mayores tiempos de viaje y de emisión de contaminantes atmosféricos.

Dados los antecedentes y considerando que el último inventario oficial en el DMQ corresponde al año 2007 (CORPAIRE , 2009), en el presente trabajo se presenta la actualización del Inventario de Emisiones Atmosféricas para el DMQ, considerando el 2012 como año base. Se analizará el tráfico vehicular como fuente de emisión de los siguientes compuestos contaminantes primarios: CO, NO_x, COVNM, SO₂, MP₁₀, MP_{2.5} y de los GEI: CO₂, CH₄ y N₂O; y las gasolineras y “El Beaterio” como fuentes de emisión de COVNM.

Actualmente hay información que permite obtener mejores estimaciones y reducir el nivel de incertidumbre, con respecto a inventarios previos. Entre estos elementos se destacan: información de la Revisión Técnica Vehicular (RTV) del año 2012, conteos sobre el nivel de tráfico en vías principales del DMQ, estadística de venta de combustible e

información sobre el contenido azufre en los combustibles comercializados en el DMQ en el 2012 y algunos factores de emisión locales para los vehículos más comunes en el DMQ.

1.5. Objetivos del estudio

1.5.1. Objetivo General.

Actualizar el Inventario de Emisiones Atmosféricas del DMQ, con año base 2012, considerando como fuentes de emisión el tráfico vehicular, gasolineras y “El Beaterio”.

1.5.2. Objetivos Específicos.

- Aplicar modelos para la estimación de emisiones atmosféricas para los contaminantes primarios (CO, NO_x, COVNM, SO₂, MP₁₀, MP_{2.5}) y GEI (CO₂, CH₄ y N₂O).
- Recopilar la mejor información disponible para el año de estudio a fin de estimar las emisiones con menor incertidumbre.
- Analizar los cambios en las emisiones de fuentes móviles terrestres (automóviles) en el DMQ, a través de la comparación con inventarios de años anteriores.
- Elaborar un mapa de intensidad de tráfico vehicular, representativo para el año 2012.
- Generar mapas de alta resolución espacial de las emisiones de contaminantes del aire atribuidos al tráfico vehicular, gasolineras y “El Beaterio”.
- Contar con información actualizada de las emisiones en el DMQ, como base para desarrollar estudios relacionados con la dispersión de contaminantes del aire.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Inventario de emisiones atmosféricas

2.1.1. Características del inventario de emisiones atmosféricas.

El inventario de emisiones atmosféricas es la compilación de uno o varios contaminantes emitidos al aire, desde una o varias fuentes, en una región específica y en un tiempo determinado (Van Aardenne, 2002). Los inventarios de emisiones son instrumentos clave en la gestión ambiental porque permite identificar las fuentes generadoras de emisión y su aporte a la contaminación atmosférica (Webber, 1982).

Los inventarios de emisiones se utilizan para fines científicos y como instrumentos para tomar decisiones (Pacyna & Graedel, 1995), (Van Aardenne, 2002). En el aspecto científico, los inventarios son la base para el desarrollo de modelos de transporte químico de contaminantes del aire. Asimismo, los inventarios se pueden utilizar para comprobar el cumplimiento de objetivos nacionales y de convenios y protocolos internacionales. Un inventario oportuno proporciona información sobre la efectividad de estrategias de control y permite determinar en qué sectores se deben concentrar los esfuerzos de reducción de emisiones.

Los inventarios de emisiones que se usan en estudios de dispersión atmosférica, presentan las siguientes características: 1) están definidos por un dominio con celdas georeferenciadas, 2) alta resolución espacial (mapas de emisiones en celdas de hasta 1 km) y 3) alta resolución temporal (típicamente se desarrollan para un año base, del cual se obtienen mapas de emisiones mensuales, diarias y horarias) (Pacyna & Graedel, 1995).

2.1.2. Tipos de fuentes emisoras.

Las fuentes de contaminación del aire pueden dividirse en: 1) puntuales, 2) de área y 3) móviles o lineales (Webber, 1982). Las fuentes puntuales o fijas son aquellas que debido a su tamaño, producción o grado de contaminación justifican un cálculo de forma independiente, como es el caso de las plantas de energía, industrias químicas, refinerías de petróleo. Las fuentes de área, en cambio, representan colectivamente fuentes individuales que por ser pequeñas, numerosas y dispersas no pueden ser caracterizadas como fuentes puntuales, por ejemplo: la vegetación y el uso de disolventes. Las fuentes móviles son aquellas que se producen a lo largo de ejes longitudinales, debido al transporte terrestre, aéreo, marítimo y fluvial.

2.1.3. Enfoques para el desarrollo de emisiones.

Las emisiones atmosféricas se pueden cuantificar mediante el enfoque de *bottom-up* o con el enfoque *top-down* (Colville et al., 2001). El enfoque *bottom-up* consiste en un escalamiento de la información, desde datos específicos para cada celda hasta cubrir toda el área de estudio. En cambio, con el enfoque *top-down* la construcción de la información va desde arriba hacia abajo. Mediante este último enfoque se estiman las emisiones totales para el área de estudio y posteriormente se realiza una desagregación espacial en cada una de las celdas, usando parámetros como la intensidad de tránsito o la densidad de población. En la práctica, a veces se utiliza un enfoque combinado *top-down* y *bottom-up*, en función de la información disponible.

2.1.4. Modelo básico de emisiones.

La Ecuación 1 presenta el modelo básico para la estimación de emisiones:

$$E_{i,j} = A_{i,j} * FE_{i,j}$$

Ecuación 1

Siendo:

i: contaminante analizado por fuente

j: tipo de actividad

$E_{i,j}$: Emisión del contaminante i debido a la actividad j

$A_{i,j}$: Nivel de la actividad j que produce el contaminante i (ejemplo km recorridos)

$FE_{i,j}$: Factor de emisión típico del contaminante i debido a la actividad j (ejemplo g de CO emitido por cada km recorrido)

La actividad está generalmente relacionada con procesos de combustión o de producción industrial (US-EPA, 1997). Suele expresarse en unidades como: distancia recorrida (km), volumen de venta (galones) o nivel de producción industrial (t de cemento, kWh de energía eléctrica). Para determinar la actividad de una fuente se utilizan encuestas o información estadística proveniente de instituciones gubernamentales.

El factor de emisión es un valor representativo de la cantidad de contaminante que se emite a la atmósfera como resultado de una actividad. Los factores de emisión se expresan como el peso del contaminante dividido por una unidad específica de la actividad (US-EPA, 1997). Los factores de emisión, en su mayor parte, se obtienen a partir del promedio de las emisiones a largo plazo de varias instalaciones de un tipo de fuente. Las emisiones reales se obtienen solo a través de mediciones en la fuente. Sin embargo, estos datos están disponibles en pocos casos, son costosos y no justifica su uso en todas las fuentes de emisión. Se recomienda utilizar, en lo posible, factores de emisión locales, y así considerar condiciones específicas tales como: propiedades del combustible, características meteorológicas, geografía y topografía, comportamiento local de conducción, limitación de oxígeno para la combustión, entre otros.

2.1.5. Análisis de incertidumbre.

Para asegurar la calidad del inventario y dar a conocer a otros usuarios el nivel de exactitud, los inventarios deben ser sometidos a un análisis de incertidumbre (US-EPA, 1997). La incertidumbre en la estimación de emisiones se debe a varias causas, entre ellas: variabilidad en los procesos y en las condiciones ambientales que afectan las emisiones, potencial falta de representatividad de los modelos, métodos, supuestos y simplificaciones realizadas para el cálculo de las emisiones, de los métodos de medición y de los instrumentos.

En el presente inventario, al igual que en otros desarrollados a nivel nacional y en el DMQ (CORPAIRE, 2006), (CORPAIRE, 2008), (CORPAIRE , 2009), (Viteri, 2012), (Palermo, 2014), (Sánchez, 2013), (MAE, 2013) para el análisis de incertidumbre, se utiliza una variación del método semi cuantitativo *Data Attribute Rating System* (DARS), recomendado por la EPA (US-EPA, 1996).

Este método analiza la incertidumbre de la información de la actividad emisora y de los factores de emisión, asignando una calificación alfabética para cada componente (US-EPA, 1996). La asignación alfabética se basa en la fiabilidad o la robustez de la información. La Tabla 2 y 3 indican los criterios para calificar a la información de la actividad y factores de emisión, respectivamente.

Tabla 2. Sistema de calificación de la actividad.

Calificación	Calidad	Descripción
A	Muy alta	La información proviene de estimaciones bien documentadas; tales como estadísticas nacionales (oficiales). Los datos de actividad representan el proceso de emisión, son específicos de la región geográfica y para el periodo temporal del inventario.
B	Alta	La información es diversa e intermitente, proviene de una actualización de las estadísticas y factores de crecimiento de años previos. Los datos provienen de la actividad de un proceso similar que se correlacionan en gran medida a la categoría o proceso en estudio. La información presenta una modera variabilidad espacial y temporal.
C	Media	La información proviene de indicadores o sustitutos asociados con la actividad original. Los datos de actividad se correlacionan poco con la categoría o proceso en estudio. La variabilidad espacial y temporal de la información es entre moderada y alta.
D	Baja	La información proviene de estimaciones. La tasa de actividad se deriva de los principios de ingeniería o de especificaciones de diseño. Los datos de actividad representan una categoría de fuente sustituta con información limitada. La variabilidad espacial y temporal es alta.
E	Muy baja	La información proviene de estimaciones generales, realizadas con criterio técnico. Los datos de actividad provienen de una categoría de fuente sustituta y se aplica a través de la opinión de expertos.

Fuente: (US-EPA, 1996).

Tabla 3. Sistema de calificación de los factores de emisión.

Calificación	Calidad	Descripción
A	Muy alta	El factor de emisión se desarrolla a partir de mediciones continuas realizadas en muchas instalaciones de un mismo tipo de fuente. La variabilidad espacial y temporal es específica para el periodo del inventario.
B	Alta	El factor de emisión se obtiene a partir de un número representativo de instalaciones, para una categoría relacionada a la categoría objetivo. La variabilidad espacial y temporal del factor de emisión es moderada
C	Media	El factor de emisión se obtiene a partir de un número no representativo de instalaciones. El factor de emisión se basa en el perfil de especiación aplicado a la medición de otros contaminantes. La variabilidad espacial y temporal del factor de emisión es de moderada a alta
D	Baja	El factor de emisión es derivado de los balances de materia o de principios conocidos; o para una categoría sustituta con información limitada. La variabilidad espacial y temporal del factor es alta.
E	Muy baja	El factor de emisión está disponible solo para un pequeño número de instalaciones de fuentes relacionadas. El factor de emisión se basa en la opinión de expertos.

Fuente: (US-EPA, 1996).

Después de realizar la calificación individual, se combinan las valoraciones resultantes de cada componente a fin de tener un índice global para el inventario. En la Tabla 4 se indica la matriz de calificación de la estimación de las emisiones.

Tabla 4. Matriz de calificación de las estimaciones 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

Fuente: (CORPAIRE, 2006).

Por lo tanto la calidad y fiabilidad del inventario de acuerdo a la calificación es:

- **Categoría A**, calidad muy alta. Indica que la estimación es bastante fiable, la estimación es suficiente para este y futuros inventarios.
- **Categoría B**, calidad alta. La estimación es fiable, pero se pueden tomar acciones para disminuir su incertidumbre.
- **Categoría C**, calidad media. La estimación es medianamente fiable y podría ser mejorada.
- **Categoría D**, calidad baja. La estimación es poco fiable y se recomienda mejorarla.
- **Categoría E**, calidad muy baja. La estimación es muy poco fiable y debe ser mejorada.

2.2. Funcionamiento de los motores de gasolina y diésel

La energía necesaria para el desplazamiento del automóvil se produce en el motor. Los motores de combustión interna son aquellos que funcionan con el aprovechamiento de la energía liberada en la combustión de un determinado combustible en una cámara cerrada (Estevez, 1971).

Los combustibles fósiles comúnmente utilizados para el transporte terrestre son la gasolina y el diésel. La gasolina es una mezcla de hidrocarburos relativamente volátiles, libres de agua, sedimento y material sólido en suspensión. Para ser utilizada como combustible para motores de ciclo Otto, la gasolina es oxigenada en proporciones específicas, con un compuesto líquido que en su molécula contiene oxígeno (INEN, 2012 a). El diésel, en tanto, se obtiene de la fracción más baja de la destilación atmosférica de petróleo crudo (IEA, 2014). El Diésel Premium es el combustible en motores de auto ignición para la propulsión de vehículos del sector automotriz a nivel nacional (INEN, 2012 b).

2.2.1. Motor a gasolina.

A continuación se describe la operación de este motor (Estevez, 1971): en la primera etapa ocurre el tiempo de admisión. En esta etapa, mientras el pistón está en el punto muerto superior, la válvula de escape cerrada y la válvula de admisión abierta, ingresa la mezcla aire-combustible en la cámara de combustión. Durante este proceso el pistón es arrastrado por el cigüeñal hacia el punto muerto inferior. La dosificación de la mezcla aire-combustible, en los vehículos de tecnología convencional se realiza a través del carburador y en los vehículos nuevos mediante un sistema de inyección. Después, ocurre el tiempo de compresión, donde el pistón, que ahora se mueve hacia el punto muerto superior, comprime la mezcla aire combustible dentro de la cámara de combustión a una presión y temperatura elevadas (300°C y hasta 15 bar, respectivamente). Mientras tanto, las válvulas de admisión y de escape permanecen cerradas. La tercera etapa de funcionamiento se denomina tiempo de expansión. En este tiempo, la bujía genera una chispa eléctrica y ocurre la combustión de la mezcla. La fuerza expansiva de los gases de combustión empuja,

con alta presión al pistón hacia el punto muerto inferior, y provoca a su vez un empuje del cigüeñal y la producción del movimiento. Finalmente en el cuarto tiempo o tiempo de escape, mientras la válvula de admisión permanece cerrada, la válvula de escape se abre y los gases de combustión son evacuados al exterior del cilindro por el sistema de escape. En vehículos con sistema de control de emisiones los gases pasan por el convertidor catalítico. La Figura 1 muestra los cuatro tiempos de funcionamiento del motor a gasolina.

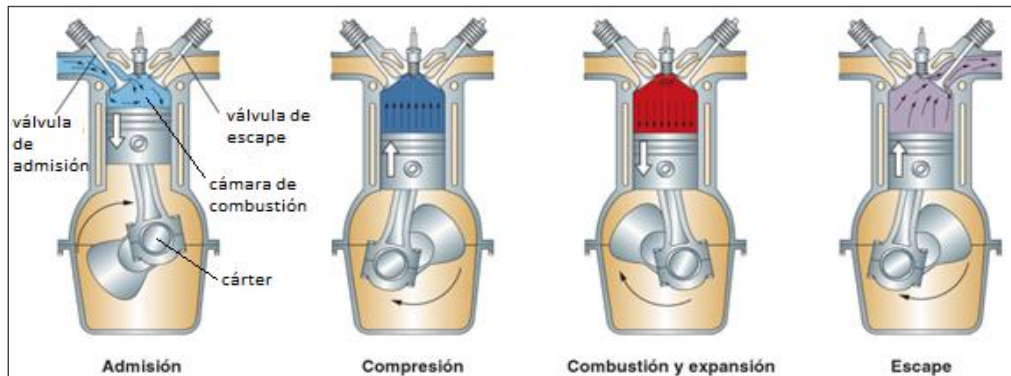


Figura 1. Ciclo de cuatro tiempos en el motor a gasolina.

Fuente: (Domínguez & Ferrer, 2008).

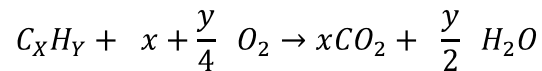
2.2.2. Motor a diésel.

El proceso de funcionamiento del motor a diésel es similar al motor de gasolina. Sin embargo, existen ciertas diferencias que se describen a continuación (De Castro, 1987). En el tiempo de admisión, ingresa únicamente aire a la cámara de combustión. En el tiempo de compresión el aire es comprimido a una elevada presión (hasta 50 bar) y temperatura ($\approx 600^{\circ}\text{C}$). En el tiempo de combustión el inyector dosifica el diésel y ocurre la autoignición de la mezcla por las altas temperaturas que se alcanzan. En el tiempo de escape ocurre el mismo proceso que en los motores a gasolina.

2.3. Emisiones del tráfico vehicular

2.3.1. Emisiones del tubo de escape.

La mayor parte de las emisiones en los motores de combustión interna provienen del tubo de escape. Las emisiones de este tipo dependen de la combustión del combustible. La Ecuación 2 indica que en condiciones de combustión completa todo el combustible (representado por la fórmula C_xH_y) se transforma a: CO_2 y H_2O . Sin embargo, en la práctica los productos de combustión también incluyen: NO_x , CO , $COVNM$, material particulado (MP) y SO_2 (De Nevers, 1998).



Ecuación 2

La emisión de contaminantes desde el tubo de escape generalmente se representa en función de lambda (λ). Lambda relaciona la mezcla aire-combustible real con la mezcla aire-combustible estequiométrica (Ecuación 3). La relación aire-combustible real está determinada por la composición exacta del combustible y por las condiciones de combustión. La relación aire-combustible estequiométrica indica la cantidad de aire estequiométricamente necesario para quemar cierta cantidad de combustible (De Nevers, 1998).

$$\lambda = \frac{\text{Aire/Combustible}_{real}}{\text{Aire/Combustible}_{estequiométrica}}$$

Ecuación 3

De acuerdo a la Ecuación 3 si en la mezcla aire-combustible real hay un exceso de combustible, $\lambda < 1$ y la mezcla se define como rica; cuando en esta relación hay menos combustible del necesario para consumir el oxígeno presente, $\lambda > 1$ y la mezcla se define como pobre (De Nevers, 1998).

La Figura 2 indica la variación de las emisiones de contaminantes primarios en el tubo de escape en función de lambda (λ).

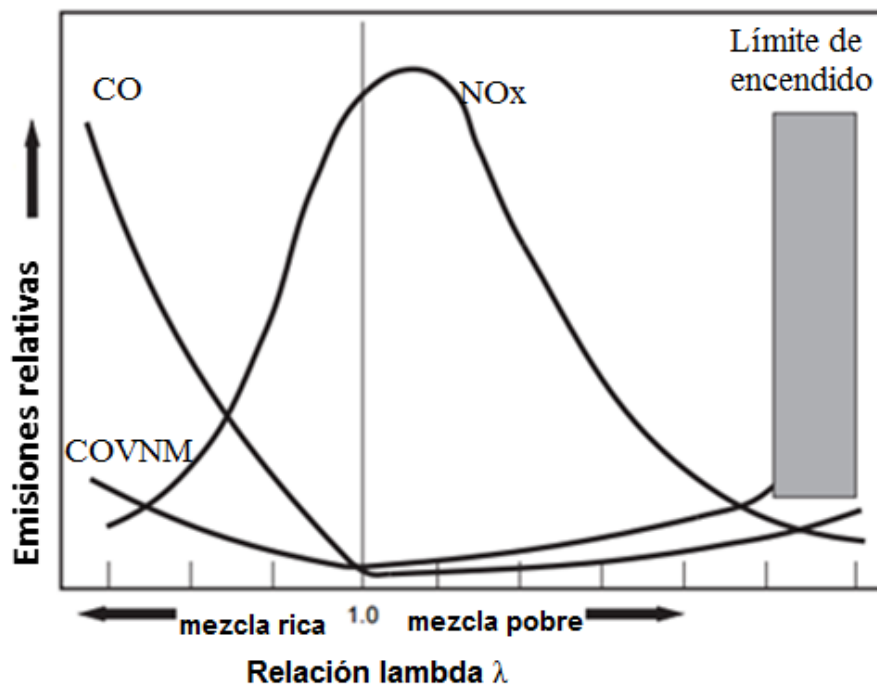


Figura 2. Variación de emisiones en el tubo de escape, respecto a la relación lambda.

Fuente: (modificado de Faiz et al., 1996).

2.3.1.1. Emisiones en caliente.

Estas emisiones se producen cuando la temperatura del agua de refrigeración es superior a los 70°C (Ntziachristos & Samaras, 2000). Los compuestos contaminantes emitidos en caliente son el: NO_x, CO, COVNM, MP y SO₂.

Las emisiones de NO_x , desde fuentes móviles, están compuestas principalmente por óxido nítrico (NO) en un 95% y por dióxido de nitrógeno (NO_2) en un 5%. El NO se forma de la combinación, a altas temperaturas, del oxígeno y del nitrógeno del aire que ingresa en la cámara de combustión (De Nevers, 1998), (Wark & Warner, 1992). El NO_2 se forma mayoritariamente de la combinación del NO con el oxígeno. En la Figura 2 se observa que a medida que la mezcla rica se convierte en pobre, la emisión de NO_x aumenta (debido a la mayor disponibilidad de oxígeno) hasta llegar a un nivel máximo. Este nivel se produce cuando la relación aire-combustible real es cercana a su valor estequiométrico. Desde este nivel, las emisiones empiezan a disminuir debido a la reducción de la temperatura como consecuencia de la falta de combustible (mezclas pobres).

El CO proviene principalmente de la oxidación incompleta del combustible. Según la Figura 2 a medida que la mezcla se hace más rica, las emisiones de CO se incrementan; ya que no hay suficiente oxígeno para oxidar el combustible (Wark & Warner, 1992).

Las emisiones de COVNM se generan como consecuencia de la poca disponibilidad de oxígeno en la mezcla y debido a fallas en el encendido (Figura 2). Este último ocurre cuando la mezcla es tan pobre que la combustión no se mantiene y provoca la emisión de hidrocarburos no combustionados. Los COVNM también se forman por extinción de la llama en el motor. Esta extinción ocurre porque el sistema de refrigeración causa un enfriamiento en las paredes de la cámara de combustión (Wark & Warner, 1992).

Los combustibles contienen algunas impurezas tales como azufre y aditivos. Durante el proceso de combustión, el azufre se oxida principalmente a SO_2 . También se puede formar sulfato, lo que promueve la formación de MP (Colvile et al., 2001).

2.3.1.2. Emisiones en frío.

Las emisiones en frío son emisiones adicionales en el tubo de escape que se producen antes de que el agua de refrigeración alcance los 70°C (Ntziachristos & Samaras, 2000). A estas temperaturas la mayor parte del combustible no se vaporiza y el motor no puede arrancar. Para que el motor arranque se debe agregar más combustible, por lo tanto la mezcla se enriquece y se emiten mayor cantidad de CO y COVNM. Estas emisiones se producen cuando se enciende el motor y perduran hasta que alcanza su temperatura de funcionamiento (De Nevers, 1998).

No es posible obtener simultáneamente las menores emisiones de NO_x, CO y COVNM. Por lo que actualmente los motores a gasolina se diseñan para operar en mezclas ligeramente pobres (cercana a la estequiométrica), generando menores emisiones de CO y COVNM, aunque altas emisiones de NO_x. Las emisiones de NO_x se contralan con el tubo de escape (Sher, 1998), (De Nevers, 1998).

Actualmente, el dispositivo más utilizado para el control de las emisiones es el catalizador en el escape (Sher, 1998). Para los motores a gasolina se utiliza principalmente el catalizador de tres vías. Este tipo de catalizador oxida el CO y COVNM y reduce el NO_x. Los vehículos a diésel utilizan catalizadores de oxidación. Mediante este sistema se oxida el CO, COVNM y las partículas volátiles. El catalizador de oxidación no reduce las emisiones de NO_x, y puede elevar la tasa de conversión de NO a NO₂ en el tubo de escape (Boulter et al., 2012). Los catalizadores modernos operan bajo rangos estequiométricos de combustión muy bajos y su efectividad depende de la temperatura (su rango óptimo de funcionamiento varía entre los 400 y 700°C) (Sher, 1998).

2.3.2. Emisiones evaporativas.

Consiste en la emisión de COVNM como consecuencia de la evaporación de las gasolinas (De Nevers, 1998). Las variables que afectan las emisiones evaporativas son: la volatilidad de la gasolina, la temperatura ambiente y las características del combustible.

Los principales tipos de emisiones evaporativas son: diurnas, por retención en caliente (*Hot-Soak*) y por funcionamiento del motor (Mellios & Ntziachristos, 2013). Las emisiones diurnas ocurren por el incremento de la temperatura ambiente, lo cual provoca la expansión térmica del combustible y del vapor en el tanque. Las emisiones por retención en caliente se producen cuando el motor se apaga y su calor residual calienta el carburador, promoviendo la evaporación de la gasolina almacenada en el mismo. Las emisiones por funcionamiento del motor son el resultado del vapor generado en el tanque de combustible durante la operación del vehículo. En los vehículos a gasolina con sistema de inyección directa y sistemas de retorno de combustible, estas emisiones son menores, en relación de los vehículos de tecnología convencional.

2.3.3. Emisiones por abrasión.

Corresponden a la emisión de MP por el desgaste de neumáticos, frenos y superficie de rodadura (Ntziachristos & Boulter, 2013). Las emisiones desde los neumáticos provienen del desgaste de la banda de rodadura. La tasa de desgaste es mayor en los vehículos pesados. Las emisiones desde los frenos varían dependiendo del mecanismo de frenos. Un pequeño número de eventos de frenado severos genera una mayor tasa de desgaste. Las emisiones desde la superficie de rodadura se refieren al desgaste por el uso de las superficies. Este desgaste se incrementa con el aumento de la humedad y la disminución

de la temperatura, además, depende del tipo de superficie, velocidad del vehículo y presión de los neumáticos (Ntziachristos & Boulter, 2013).

2.3.4. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

Los GEI (CO_2 , CH_4 y N_2O) se emiten por la quema de combustibles (IPCC, 2006). Las emisiones más significativas (en masa) son de CO_2 , que provienen de la combustión completa del combustible y dependen del contenido de carbono en el mismo. Las emisiones de CH_4 y N_2O dependen de la tecnología del vehículo y de las condiciones de uso.

2.4. Emisiones de las gasolineras y “El Beaterio”

La comercialización de combustibles empieza con el transporte de los derivados desde las refinerías hasta los terminales de distribución (US-EPA, 2008 a). El transporte de derivados al DMQ se realiza, principalmente, a través del poliducto Esmeraldas-Quito. El combustible llega hasta “El Beaterio” y desde allí es entregado a las gasolineras e industrias, por medio de camiones cisterna.

Durante la recarga de combustible al vehículo se producen emisiones de COVNM (US-EPA, 2008 a). El vapor desde el tanque de gasolina es desplazado por el ingreso del combustible. Durante la recarga puede haber goteo y derrame de gasolina, lo que también contribuye con las emisiones de COVNM.

En el llenado de gasolina en los tanques subterráneos se producen emisiones evaporativas de COVNM que empiezan cuando los vapores dentro del tanque son desplazados a la atmósfera por el ingreso del nuevo combustible. El nivel de desplazamiento depende de varios factores, entre ellos: la forma y tasa de llenado, la

configuración del tanque, la temperatura de la gasolina, la presión de vapor y la composición del combustible (US-EPA, 2008 a).

Una cantidad adicional de emisiones ocurre por la expansión térmica o “respiración” (US-EPA, 2008 a). En este proceso la gasolina se evapora por los cambios de temperatura, presión barométrica y por la frecuencia con la que la gasolina se retira desde el tanque subterráneo. Ésta última actividad permite el ingreso de aire fresco que a su vez incrementa la evaporación.

Estos procesos de emisión también ocurren en “El Beaterio”; sin embargo, en este lugar, el almacenamiento de los combustibles no es subterráneo y la recarga de combustible se realiza en tanques cisterna, por lo que los factores de emisión de COVNM son diferentes.

2.5. Compuestos analizados

2.5.1. Óxidos de nitrógeno (NO_x).

Los NO_x son una mezcla compleja de compuestos oxidados del nitrógeno (US-EPA, 2008 b). Las principales fuentes de emisión de NO_x son el tráfico terrestre y las plantas generadoras de energía. También se generan por la quema de biomasa y la actividad microbiana en los suelos. El NO es un gas incoloro de insignificante toxicidad, pero es precursor de reacciones que producen contaminantes secundarios del aire. El NO₂ es un gas de color café, su exposición a corto plazo afecta a las vías respiratorias, las exposiciones a largo plazo afectan al bazo e hígado (OMS, 2004).

Los NO_x y los COVNM, en presencia de radiación solar, promueven la formación de ozono (O₃) en la troposfera. El O₃ es un contaminante secundario que irrita el sistema

respiratorio y promueve el envejecimiento prematuro de los pulmones (OMS, 2004). El O₃ es el principal componente del smog fotoquímico (De Nevers, 1998).

2.5.2. Monóxido de carbono (CO).

El CO es un gas no irritante, incoloro, inodoro e insípido. Es producido principalmente por la combustión incompleta de combustibles orgánicos (US-EPA, 2010 a). Los efectos del CO sobre la salud son varios. A exposiciones a corto plazo puede haber un incremento de la morbilidad cardiovascular, respiratoria y afectación del sistema nervioso central. Las exposiciones a largo plazo pueden provocar partos prematuros e incluso problemas con el desarrollo del feto. El CO tiene mayor afinidad con la hemoglobina de la sangre que el oxígeno; por lo que forma carboxihemoglobina (compuesto que evita la distribución de oxígeno mediante el torrente sanguíneo), que puede causar intoxicación y en casos extremos la muerte (OMS, 2004).

2.5.3. Compuestos Orgánicos Volátiles No Metano (COVNM).

No existe una definición consensuada sobre estos compuestos, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) indica que los COVs (Compuestos Orgánicos Volátiles) son compuestos poco reactivos que no participa en la formación del smog fotoquímico, por lo que excluye al metano de su definición oficial de COVs (US-EPA, 2010 b), (US-EPA, 2015). En cambio, la Agencia Ambiental Europea (EEA) hace una diferenciación entre COVs y COVNM. La EEA indica que los COVs son compuestos químicos orgánicos que en condiciones normales pueden vaporizarse y entrar en la atmósfera; y que los COVNM son compuestos orgánicos volátiles que no incluyen al metano (EEA, 2014).

Los COVNM tienen origen biogénico y antropogénico. En cuanto a las emisiones biogénicas, los árboles de hoja amplia así como las plantas coníferas son los principales responsables de la emisión una gran variedad de COVNM (Kansal, 2009). De origen antropogénico, los COVNM se liberan principalmente de fuentes móviles, por el uso de disolventes, pinturas, barnices, productos desinfectantes y aerosoles (Han & Naeher, 2006).

Sobre los efectos en la salud, los COVNM pueden causar irritación sensorial, problemas neurotóxicos, hepatotóxicos y genotóxicos (OMS, 2004). Los COVNM incluyen compuestos aromáticos tales como los BTEX (Benceno, Tolueno, Etil Benceno y Xileno), de los cuales, se ha comprobado que el benceno es cancerígeno (IARC, 1987). Además, los COVNM participan en la formación de O_3 en la troposfera, cuando reaccionan con los NO_x en presencia de radiación solar (De Nevers, 1998).

2.5.4. Material Particulado (MP_{10} y $MP_{2.5}$).

El MP es una mezcla de partículas sólidas y líquidas que se encuentran en el aire (US-EPA, 2010 c). Estas partículas están compuestas por nitratos, sulfatos, compuestos orgánicos, metales e incluso partículas de tierra.

De acuerdo a su diámetro aerodinámico el MP se clasifica como: MP_{10} y $MP_{2.5}$ (US-EPA, 2010 c). El MP_{10} , provienen principalmente de procesos de abrasión, trituración, erosión eólica y puede incluir fragmentos de plantas, insectos y microorganismos. Varios estudios sugieren que este compuesto podría provocar efectos cardiovasculares y respiratorios e inclusive muerte. El material $MP_{2.5}$ se genera mayoritariamente por la combustión de combustibles fósiles (US-EPA, 2010 c). Las fracciones más pequeñas provienen de la nucleación del ácido sulfúrico, vapor de agua, amoníaco y compuestos

orgánicos. En cuanto a sus efectos sobre la salud, la exposición a largo plazo puede producir cáncer al pulmón (OMS, 2004).

2.5.5. Dióxido de azufre (SO₂).

El SO₂ es un gas incoloro, de olor acre, irritante, soluble en agua y reactivo. Este compuesto es emitido tanto de fuentes naturales como desde fuentes antropogénicas (US-EPA, 2009). De manera natural proviene de las erupciones volcánicas y de incendios forestales. Las principales fuentes antropogénicas son la generación eléctrica, industrias y el transporte. Este compuesto en la atmósfera se combina con el agua para formar ácido sulfúrico, compuesto que posteriormente se deposita en el suelo y cuerpos de agua, en forma de lluvia ácida. Sobre los efectos en la salud, hay estudios que establecen una relación entre la morbilidad respiratoria y la exposición en el corto plazo, de apenas 10 minutos (OMS, 2005).

2.5.6. Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Los GEI se caracterizan por su capacidad de absorber la energía que emite la superficie de la tierra, promoviendo el incremento de la temperatura terrestre (IPCC, 2007).

2.5.6.1. Dióxido de Carbono (CO₂).

El CO₂ es el producto de la combustión completa de combustibles que contengan carbono (IPCC, 2007). Entre las fuentes relevantes se incluye a la generación de energía eléctrica, vehículos, sistemas de calefacción y aire acondicionado de edificaciones, procesos industriales, quema de biomasa y descomposición de la materia orgánica. La concentración de CO₂ en la atmósfera, previo a la era industrial fue de 280 ppm; sin

embargo ahora su concentración es cercana a los 400 ppm (Wark & Warner, 1992), (UC San Diego, 2015).

2.5.6.2. Metano (CH_4).

El CH_4 es un gas de invernadero producido principalmente por procesos anaeróbicos. Las fuentes de emisión son: humedales, cultivo de arroz, termitas, ganado, bosques, fuentes geológicas y océanos, actividades de minería, quema de combustible fósil y biomasa y rellenos sanitarios (IPCC, 2007).

2.5.6.3. Óxido Nitroso (N_2O).

El N_2O es emitido aproximadamente en igual proporción por fuentes naturales y antropogénicas (IPCC, 2007). Las fuentes naturales son los océanos y la oxidación del amoníaco en la atmósfera y los suelos. Las principales actividades humanas que emiten N_2O son el uso de fertilizantes de nitrógeno en la agricultura, la quema de biomasa, la cría de animales, las industrias y el tráfico.

3. MÉTODO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Área de estudio

El DMQ se ubica en la provincia de Pichincha, en la región sierra norte (Figura 3), cuenta con una superficie de 423 000 ha (STHV, 2012) y su población en el año 2012 fue de, aproximadamente, 2 412 427 habitantes (INEC, 2013).

En el DMQ se distinguen dos estaciones climáticas. Entre junio y septiembre hay una estación seca; mientras que de octubre a mayo hay una estación lluviosa; también hay un pequeño veranillo entre noviembre y diciembre (STHV, 2012). La temperatura media anual del año 2012 fue de 14.8°C. En mediciones de 10 min se han registrado temperaturas mínimas de 5°C y temperaturas máximas de 29°C. La precipitación acumulada en el año 2012 fue de 7522.4 mm. En cuanto a la radiación solar el valor medio anual fue de 217.1 W/m² (Secretaría de Ambiente, 2014).

El DMQ se sitúa en una depresión de 20 km de ancho y en medio de un sistema volcánico; por lo que presenta una topografía compleja (STHV, 2012). En la zona urbana, el DMQ tiene una cota media de 2800 msnm. Quito es una ciudad de altura, con una menor disponibilidad de oxígeno para los procesos de combustión, lo que promueve la emisión de contaminantes atmosféricos (Molina & Molina, 2004).

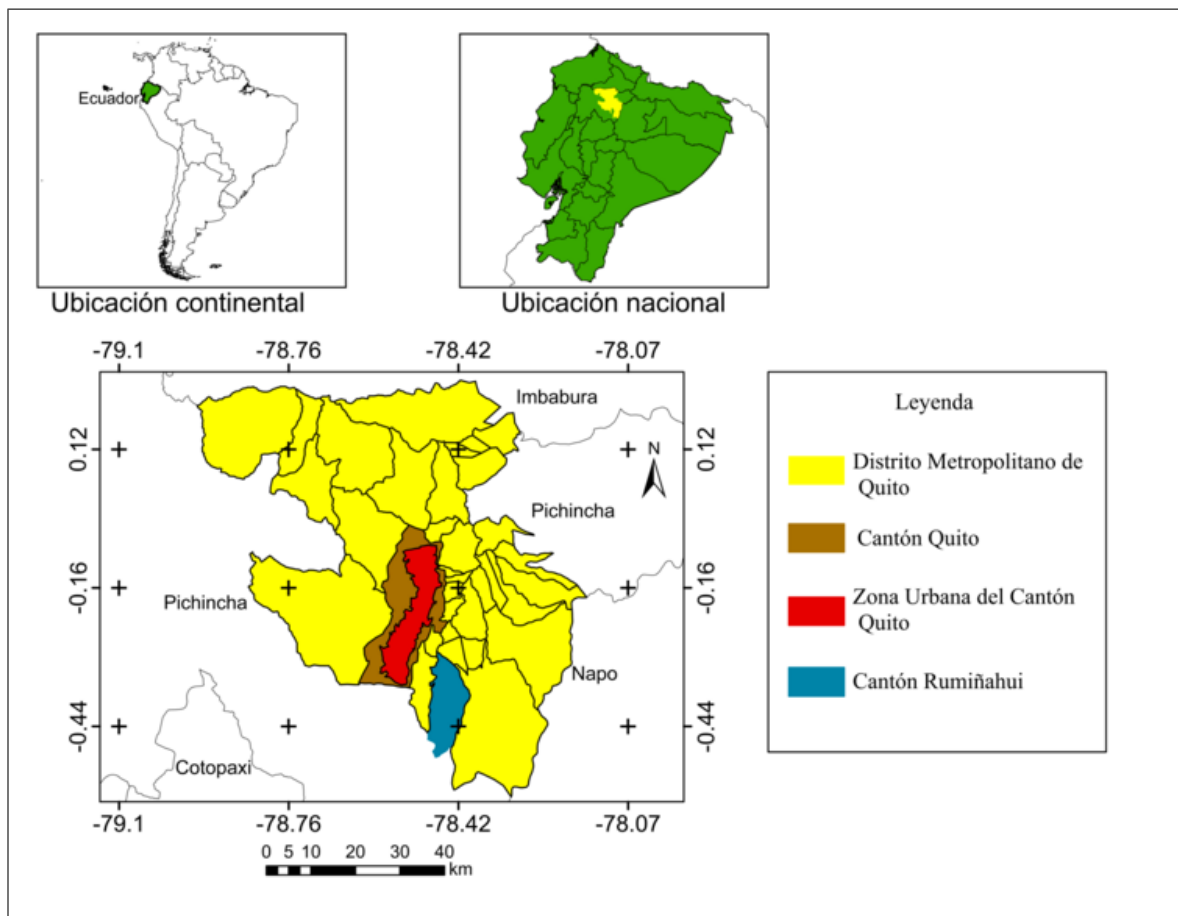


Figura 3. Ubicación del Área de Estudio.

Si bien el presente trabajo se focaliza en emisiones del DMQ, debido a la cercanía e interacción económica, social y ambiental, también se cuantificaron las emisiones para el cantón Rumiñahui.

3.2. Características del inventario de emisiones atmosféricas

Se utilizó una malla de emisiones de 1.6 grados geográficos por lado, en la que se inscribe toda la superficie del DMQ y parte de cantones vecinos (Figura 4). La malla está compuesta por celdas horizontales (200) y verticales (200), cada una tiene 30 segundos geográficos de lado ($\approx 0.9\text{km}$).

El periodo temporal para este inventario es de un año, considerando como año base el 2012. La información estadística recopilada sobre el consumo de combustible, parque vehicular, mapa de intensidad de tráfico vehicular y composición del combustible corresponden al año 2012.

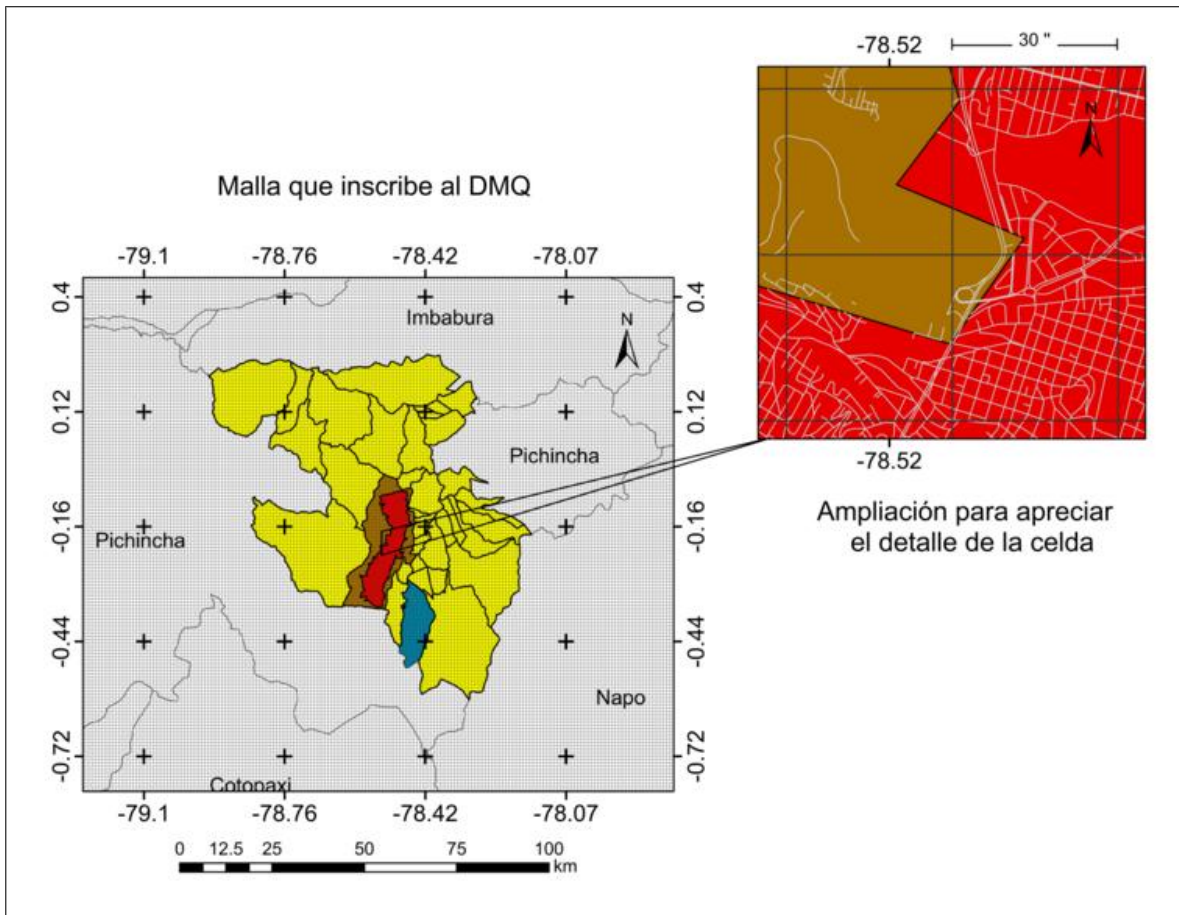


Figura 4. Malla del inventario de emisiones compuesta por 200 celdas horizontales y verticales, cada celda tiene 30 segundos geográficos ($\approx 0.9\text{km}$)

3.3. Emisiones del tráfico vehicular

3.3.1. Modelo de emisión.

Las emisiones del tráfico vehicular son de tres tipos: 1) del tubo de escape (en caliente y frío) 2) evaporativas y 3) por abrasión (o desgaste), como se indica en la Ecuación 4 (Ntziachristos & Samaras, 2013).

$$Emisiones_{totales} = Emisiones_{tubo\ de\ escape} + Emisiones_{evaporativas} + Emisiones_{abrasión}$$

Ecuación 4

3.3.1.1. Emisiones del tubo de escape.

Emisiones en caliente.

Las emisiones en caliente de NO_x, CO, COVNM, MP₁₀ y MP_{2.5} se determinan mediante la Ecuación 5 (Ntziachristos & Samaras, 2013):

$$E_{caliente_r}^i = N_{veh_r} * Drec_r * FE_r^i$$

Ecuación 5

Siendo:

r: categoría de vehículo

i: tipo de contaminante (NO_x, CO, COVNM, MP₁₀ y MP_{2.5})

Ecaliente_rⁱ: Emisiones en caliente de i producidas por los vehículos de categoría r (t/año)

N_{veh_r}: Número de vehículos de categoría r (vehículos/año)

Drec_r: Distancia recorrida por el vehículo de categoría r (km/vehículo)

FE_rⁱ: Factor de emisión en caliente de i, emitido por el vehículo de categoría r (t/km·vehículo)

Las emisiones de SO₂ se calculan mediante la Ecuación 6 (Ntziachristos & Samaras, 2013):

$$E_{caliente_r}^{SO_2} = 2 * k_{s,m} * Vol_{r,m}$$

Ecuación 6

Siendo:

r: categoría de vehículo**m**: tipo de combustible: gasolina o diésel**E caliente_r^{SO₂}**: Emisiones de SO₂ producidas por los vehículos de categoría r (t/año)**k_{s,m}**: peso de azufre en el combustible m (t/m³ de combustible)**Vol_{r,m}**: Volumen de combustible m consumido por el vehículo r (m³/año)*Emisiones en frío.*

Estas emisiones se calculan mediante la Ecuación 7 (Ntziachristos & Samaras, 2013). Las emisiones en frío se producen en todos los vehículos; sin embargo, de acuerdo al método utilizado se priorizan las emisiones de los vehículos livianos de gasolina y diésel. Para los vehículos a gasolina se calculan las emisiones de los siguientes contaminantes: NO_x, CO y COVNM. Para los vehículos a diésel adicionalmente se incluyen al MP₁₀ y MP_{2.5}.

$$E_{frío_r}^i = \beta_{i,r,k} * N_{veh\ r} * Drec_r * e_{caliente;r,i,k} * (e^{frío} / e^{caliente}_{i,r,k} - 1)$$

Ecuación 7

Siendo:

r: categoría de vehículo**i**: tipo de contaminante (NO_x, CO, COVNM, MP₁₀ y MP_{2.5})**k**: tecnología vehicular, que depende del año de fabricación (modelo). Los vehículos de modelos anteriores al 2000 utilizan carburador, no poseen caníster (filtro de carbón activado) ni catalizador. Los vehículos posteriores o iguales al 2000 en reemplazo al carburador cuentan con un sistema de inyección, con caníster y catalizador**Efrío_rⁱ**: Emisiones en frío de i producidas por los vehículos de categoría r (t/año)**β_{i,r,k}**. Fracción de la distancia que el vehículo de categoría r y tecnología k recorre con el motor en frío. Este parámetro depende de la temperatura ambiente (t_a) y de la longitud promedio de viaje (l_{viaje}). La t_a considerada fue de 14.78 °C (Secretaría de Ambiente,

2014). La l_{viaje} se calcula a partir de la distancia recorrida por el vehículo r (CORPAIRE, 2008), (CORPAIRE, 2009)

$N_{veh\ r}$: Número de vehículos de la categoría r (vehículos/año)

$Drec_r$: Distancia recorrida por el vehículo de categoría r (km/vehículo)

$e_{caliente;r,i,k}$: Emisiones en caliente del contaminante i emitidas por el vehículo r de tecnología k (t/km)

$e^{frío}/e^{caliente}_{i,r,k}$: Fracción entre las emisiones en frío y caliente de i emitidas por el vehículo r de tecnología k. Depende de t_a y de la velocidad promedio. Se utilizó la velocidad de 28.2 km/h obtenida por Ocaña (2014)

3.3.1.2. Emisiones evaporativas.

Las emisiones evaporativas son relevantes para los vehículos livianos a gasolina y motos. Estas emisiones se calculan mediante la Ecuación 8 (Mellios & Ntziachristos, 2013).

$$Eevap_r^{COVNM} = D * N_{veh-gas\ r} * e_{dr} + HS_r + RL_r$$

Ecuación 8

Siendo:

r: categoría de vehículo

$Eevap_r^{COVNM}$: Emisiones de COVNM producidas por los vehículos a gasolina de categoría r (t/año)

D: número de días en los cuales se producen las emisiones evaporativas, 366 días del año 2012

$N_{veh-gas\ r}$: Número de vehículos a gasolina de categoría r (vehículos/año)

e_{dr} : Emisiones diurnas para el vehículo de categoría r (t/día*vehículo)

HS_r: Emisiones por retención en caliente para el vehículo de categoría r (t/día*vehículo)

RL_r: Emisiones por funcionamiento para el vehículo de categoría r (t/día*vehículo)

Las variables e_{dr} , HS_r , y RL_r varían en función de la disponibilidad de caníster, de la temperatura ambiente (t_a), del número de viajes diarios, del parámetro $\beta_{i,k}$ y de factores según la tecnología vehicular.

3.3.1.3. Emisiones de abrasión.

Emisiones por desgaste de neumáticos y frenos.

La Ecuación 9 muestra el modelo de cálculo para las emisiones producidas por el desgaste de neumáticos y de frenos (Ntziachristos & Boulter, 2013).

$$E_{\text{abrasión } r,j}^i = N_{\text{veh } r} * Drec_r * FE_{MP,r,j} * f_{r,i} * S_j(V)$$

Ecuación 9

Siendo:

r: categoría de vehículo

i: tipo de contaminante: MP₁₀ o MP_{2,5}

j: emisiones por desgaste de neumáticos o desgaste de frenos

$E_{\text{abrasión } r,j}^i$: Emisiones de i producidas por los vehículos de categoría r y por la fuente j (t/año)

$N_{\text{veh } r}$: Número de vehículos de la categoría r (vehículos/año)

$Drec_r$: Distancia recorrida por el vehículo de categoría r (km/vehículo· año)

$FE_{MP,r,j}$: Factor de emisión de MP, emitido por el vehículo de categoría r y la fuente j (t/km· año). El factor de emisión depende del número de ejes y de factores de corrección propios por el uso de neumáticos o frenos

$f_{r,i}$: Fracción de la masa de MP que corresponden a i

$S_j(V)$: Factor de corrección para la velocidad media de viaje, varía dependiendo del tipo de fuente j

Emisiones por abrasión de superficie.

Las emisiones por el desgaste de superficie se calculan mediante la Ecuación 10 (Ntziachristos & Boulter, 2013):

$$E_{\text{superf } r}^i = N_{\text{veh } r} * Drec_r * FE_{MP,r} * f_{r,i}$$

Ecuación 10

Siendo:

r: categoría de vehículo

i: tipo de contaminante: MP₁₀ o MP_{2.5}

$E_{superf\ r}^i$: Emisiones de i producidas por los vehículos de categoría r debido al desgaste de la superficie (t/año)

$N_{veh\ r}$: Número de vehículos de la categoría r (vehículos/año)

$Drec_r$: Distancia recorrida por el vehículo de categoría r (km/vehículo· año)

$FE_{MP,r}$: Factor de emisión de MP, emitido por el vehículo de categoría r (t/km· año)

$f_{r,i}$: Fracción de la masa de MP que corresponden a i

3.3.1.4. Emisiones de GEI.

Para determinar las emisiones de CO₂ se utilizó la Ecuación 11 (IPCC, 2006):

$$E_r^{CO_2} = FE_r^{CO_2} * Vol_{r,m}$$

Ecuación 11

Siendo:

r: categoría de vehículo

m: tipo de combustible: gasolina o diésel

$E_r^{CO_2}$: Emisiones de CO₂ producidas por los vehículos de categoría r (t/año)

$FE_r^{CO_2}$: Factor de emisión de CO₂, emitido por el vehículo de categoría r (t/TJ)

$Vol_{r,m}$: Volumen de combustible m consumido por el vehículo r (TJ/año)

Para el cálculo de CH₄ y N₂O se utilizó la Ecuación 12 (IPCC, 2006):

$$E_r^h = Drec_r * N_{veh\ r} * FE_r^h$$

Ecuación 12

Siendo:

r: categoría de vehículo

h: GEI, sea CH₄ o N₂O

E_r^h : Emisiones de h producidas por los vehículos de categoría r (t/año)

$Drec_r$: Distancia recorrida por el vehículo categoría r (km/vehículo· año)

$N_{veh\ r}$: Número de los vehículos de la categoría r (vehículos/año)

FE_r^h : Factor de emisión de h, emitido por el vehículo de categoría r (t/km· año)

3.3.2. Actividad.

3.3.2.1. Distancia anual recorrida y consumo de combustible.

La información sobre la distancia anual recorrida por tipo de vehículo y la distancia recorrida por unidad de combustible consumido se obtuvo a partir de las compilaciones técnicas y encuestas realizadas en Quito y Cuenca (CORPAIRE, 2008), (CORPAIRE , 2009). Esta información ha sido utilizada en versiones anteriores de inventarios de emisiones en estas ciudades.

3.3.2.2. Parque vehicular que circuló en el DMQ en el año 2012.

Del procesamiento y análisis de la base de datos de la RTV del año 2012, Ocaña (2014) obtuvo un total de 390 324 vehículos que se presentaron a este proceso de control. Sin embargo este número no corresponde al total de vehículos que transitaron en el DMQ, ya que hay vehículos que circulan en el DMQ sin presentarse o estar exonerados de la RTV.

Un valor más aproximado del parque vehicular real que circuló en el DMQ en el año 2012 se obtuvo realizando un cálculo adicional, en el que se asume que la cantidad total de combustible vendido en el DMQ es igual a la suma del combustible consumido por las diferentes categorías de vehículos (Ntziachristos & Samaras, 2013). Para ello se utilizó la información sobre la composición del parque vehicular (Ocaña, 2014), información sobre la distancia anual recorrida y consumo de combustible por categoría, y datos sobre la venta de combustible en el DMQ durante el año 2012 (ARCH, 2014 a). De este análisis se concluye que en el año 2012, el parque vehicular que circuló en el DMQ fue de 519 111 vehículos. Además, usando el volumen de venta de combustible en el cantón Rumiñahui se

determinó que el número de vehículos que circularon en este cantón y en el DMQ fue de 555 361 (Tabla 5).

Tabla 5. Parque vehicular que circuló en el año 2012.

Tipo de combustible	Distrito Metropolitano de Quito		Distrito Metropolitano de Quito y cantón Rumiñahui	
	Número de vehículos	Porcentaje	Número de vehículos	Porcentaje
Gasolina	490 027	94.4	522 018	94.0
Diésel	29 084	5.6	33 343	6.0
Total	519 111	100	555 361	100

Se identificó que 128 787 vehículos que circularon en el DMQ en el año 2012, no asistieron a la RTV. Por lo cerca del 25% del parque automotriz evadió esta medida en el 2012.

La composición del parque vehicular en el DMQ se muestra de la Tabla 6 a la Tabla 8.

Tabla 6. Parque vehicular a gasolina que circuló en el DMQ, en el año 2012.

Año	Livianos							Motos	Pesados								
	Automóvil		Camioneta		Furgonetas		Híbridos		Bus				Carga		Furgoneta		Micro bus
	Particular	Taxi y Turismo	Particular	Carga y Servicio Público	Particular	Escolar y Turismo			Escolar Turismo	Inter parroquial, provincial y cantonal	Sin clasificar	Urbano	Sin clasificar	Liviana, Media e interparroquial	Escolar y Turismo	Sin Clasificar	
1990 y antes	14 534	0	5024	0	371	0	0	141	0	0	1	0	511	0	0	1	1
1991	2197	0	439	0	70	0	0	20	0	0	1	0	46	0	0	0	0
1992	4788	1	774	3	68	0	0	20	0	0	1	0	43	1	0	0	0
1993	4672	1	1246	4	99	0	0	30	0	0	0	0	39	0	0	1	1
1994	7249	17	1923	11	298	0	0	64	0	0	1	0	114	0	0	0	0
1995	5733	14	1587	8	192	1	0	43	0	1	1	0	57	1	0	0	0
1996	5177	41	1300	9	108	1	0	28	0	0	1	0	41	0	0	1	1
1997	5106	32	1206	7	78	0	0	43	0	0	1	1	39	0	0	0	0
1998	7689	118	1812	24	155	5	0	58	0	4	1	0	68	0	0	0	0
1999	5180	50	1428	14	141	5	0	35	0	0	4	0	55	0	0	0	0
2000	1004	4	243	4	7	1	0	25	0	0	0	0	12	0	0	0	1
2001	9319	141	1873	17	168	14	0	137	0	5	5	0	147	0	0	0	3
2002	15 236	693	3233	39	327	11	0	259	1	14	3	0	266	0	0	1	1
2003	13 463	571	2844	71	398	55	0	322	1	14	9	1	209	3	0	3	5
2004	13 119	485	2703	85	312	37	0	664	1	47	9	0	150	1	0	1	3
2005	18 802	1362	3544	120	226	0	0	777	4	57	5	9	241	1	0	7	9
2006	20 893	1194	4025	118	217	1	0	1188	1	80	11	1	241	1	0	3	12
2007	22 951	1255	5188	135	235	3	0	1722	0	71	4	5	571	8	0	4	13
2008	21 469	1768	4888	170	277	0	0	2387	1	71	21	13	624	9	1	7	72
2009	28 342	3046	5153	181	301	0	0	2829	1	154	53	95	1596	25	0	0	67
2010	25 590	3138	5201	83	177	1	993	5507	3	180	54	37	1567	30	0	18	60
2011	44 777	3346	7445	95	869	0	440	7898	12	268	172	222	2945	53	4	22	88
2012	44 341	1925	6594	76	1667	0	84	7474	8	230	316	237	5297	47	0	18	151

Total 490 027

Tabla 7. Parque vehicular a diésel que circuló en el DMQ, en el año 2012.

Año	Livianos							Motos	Pesados								
	Automóvil		Camioneta		Furgonetas		Híbridos		Bus				Carga		Furgoneta		Micro bus
	Particular	Taxi y Turismo	Particular	Carga y Servicio Público	Particular	Escolar y Turismo			Escolar Turismo	Inter parroquial, provincial y cantonal	Sin clasificar	Urbano	Sin clasificar	Liviana, Media e interparroquial	Escolar y Turismo	Sin Clasificar	
1990 y antes	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	442	0	0	0	2
1991	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	5	0	89	0	0	0	2
1992	3	0	2	0	8	0	0	0	0	0	2	0	76	2	0	0	3
1993	5	0	7	0	5	0	0	0	0	0	0	0	65	0	0	0	3
1994	2	0	8	2	26	0	0	0	2	0	7	13	157	3	0	0	8
1995	8	0	5	0	26	0	0	0	2	2	10	169	134	3	0	2	15
1996	2	0	2	0	8	0	0	0	3	2	8	33	113	3	0	2	15
1997	8	0	0	0	10	2	0	0	3	2	8	36	111	0	0	0	8
1998	12	0	3	0	28	7	0	0	13	5	10	113	346	5	0	0	5
1999	5	0	2	0	20	3	0	0	7	23	20	139	283	2	0	0	5
2000	20	0	7	0	3	0	0	0	3	5	3	3	56	2	0	0	2
2001	15	0	3	0	83	41	0	0	38	35	56	154	515	7	0	0	46
2002	31	0	114	3	252	99	0	0	61	129	61	232	1360	30	3	5	98
2003	61	2	144	18	419	386	0	0	12	28	38	293	1047	23	8	36	45
2004	26	0	154	5	348	369	0	0	28	45	56	467	800	23	7	23	147
2005	235	3	238	12	359	306	0	0	18	68	53	417	1118	33	7	31	283
2006	379	2	288	12	225	33	0	0	10	81	58	353	1654	43	13	25	202
2007	260	3	141	7	215	83	0	0	5	89	58	293	2234	65	10	15	101
2008	359	0	590	33	250	161	0	0	8	128	68	260	1944	46	2	10	157
2009	94	0	585	36	181	280	0	0	10	48	20	129	1182	22	0	0	66
2010	10	0	10	2	0	0	0	0	0	3	0	0	265	2	0	2	3
2011	2	0	5	0	2	0	0	0	2	48	20	18	146	2	0	2	3
2012	40	2	7	0	0	0	0	0	0	2	2	0	227	5	0	0	13
Total																	29 084

Tabla 8. Parque vehicular total que circuló en el DMQ, en el año 2012.

Año	Livianos							Motos	Pesados										
	Automóvil		Camioneta		Furgonetas		Híbridos		Bus				Carga		Furgoneta		Micro bus		
	Particular	Taxi y Turismo	Particular	Carga y Servicio Público	Particular	Escolar y Turismo			Escolar Turismo	Inter parroquial, provincial y cantonal	Sin clasificar	Urbano	Sin clasificar	Liviana, Media e interparroquial	Escolar y Turismo	Sin Clasificar			
1990 y antes	14 564	0	5024	0	371	0	0	141	0	0	4	0	953	0	0	1	3		
1991	2200	0	442	0	70	0	0	20	0	0	6	0	135	0	0	0	2		
1992	4791	1	776	3	76	0	0	20	0	0	3	0	119	3	0	0	3		
1993	4677	1	1253	4	104	0	0	30	0	0	0	0	104	0	0	1	4		
1994	7251	17	1931	13	324	0	0	64	2	0	8	13	271	3	0	0	8		
1995	5741	14	1592	8	218	1	0	43	2	3	11	169	191	4	0	2	15		
1996	5179	41	1302	9	116	1	0	28	3	2	9	33	154	3	0	3	16		
1997	5114	32	1206	7	88	2	0	43	3	2	9	37	150	0	0	0	8		
1998	7701	118	1815	24	183	12	0	58	13	9	11	113	414	5	0	0	5		
1999	5185	50	1430	14	161	8	0	35	7	23	24	139	338	2	0	0	5		
2000	1024	4	250	4	10	1	0	25	3	5	3	3	68	2	0	0	3		
2001	9334	141	1876	17	251	55	0	137	38	40	61	154	662	7	0	0	49		
2002	15 267	693	3347	42	579	110	0	259	62	143	64	232	1626	30	3	6	99		
2003	13 524	573	2988	89	817	441	0	322	13	42	47	294	1256	26	8	39	50		
2004	13 145	485	2857	90	660	406	0	664	29	92	65	467	950	24	7	24	150		
2005	19 037	1365	3782	132	585	306	0	777	22	125	58	426	1359	34	7	38	292		
2006	21 272	1196	4313	130	442	34	0	1188	11	161	69	354	1895	44	13	28	214		
2007	23 211	1258	5329	142	450	86	0	1722	5	160	62	298	2805	73	10	19	114		
2008	21 828	1768	5478	203	527	161	0	2387	9	199	89	273	2568	55	3	17	229		
2009	28 436	3046	5738	217	482	280	0	2829	11	202	73	224	2778	47	0	0	133		
2010	25 600	3138	5211	85	177	1	993	5507	3	183	54	37	1832	32	0	20	63		
2011	44 779	3346	7450	95	871	0	440	7898	14	316	192	240	3091	55	4	24	91		
2012	44 381	1927	6601	76	1667	0	84	7474	8	232	318	237	5524	52	0	18	164		
																		Total	519 111

3.3.3. Factores de emisión

Las fuentes de obtención de los factores de emisión del tráfico vehicular se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Fuente o procesamiento de los Factores de Emisión para el tráfico vehicular.

Tipo de emisión		Tipo de contaminante o GEI	Fuente o procesamiento
Tubo de escape	Caliente	NO _x , CO, COVNM, MP ₁₀ y MP _{2.5}	Se priorizo el uso de factores de emisión locales (Ocaña, 2014; CICCEV-CAF-MAE, 2012) y los que ha venido utilizando la SA (CORPAIRE, 2009)*
		SO ₂	Depende del contenido de azufre en el combustible local (Secretaría de Ambiente, 2012 b)
	Frío	NO _x , CO, COVNM y MP ₁₀ y MP _{2.5}	Ntziachristos & Samaras, 2013
Evaporativas		COVNM	Mellios & Ntziachristos, 2013
Abrasión		MP ₁₀ y MP _{2.5}	Ntziachristos & Boulter, 2013
GEI		CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O	IPCC, 2006

*Se describe en la sección siguiente.

3.3.3.1. Factores de emisión en caliente para el NO_x, CO, COVNM, MP₁₀ y MP_{2.5}.

Para los vehículos de tipo liviano a gasolina: automóviles, camionetas y furgonetas (los cuales representan el 84.1% del parque vehicular total en el DMQ), los factores de emisión de NO_x, CO y COVNM se establecieron a partir de varios estudios locales. Se utilizaron los coeficientes propuestos en la tesis “Cálculo de factores de emisión vehicular para el Distrito Metropolitano de Quito en base al análisis estadístico de los registros de la Revisión Técnica Vehicular del año 2012 y una ruta de campo establecida” (Ocaña, 2014), los factores de emisión obtenidos por el CICCEV en el estudio “Determinación de la línea base de factores de emisiones contaminantes en motores de combustión interna con el combustible de actual venta en el país” (CICCEV-CAF-MAE, 2012). Y la información

disponible de los registros de la base de datos de la RTV, para las pruebas de emisiones a 2500 rpm (Ocaña, 2014).

A continuación se comparan los factores de emisión propuestos en el presente trabajo y los que han sido utilizados por la Secretaría de Ambiente del Municipio de Quito (SA) en los inventarios de emisiones desarrollados hasta el momento (CORPAIRE, 2009). Los factores de emisión de la SA han sido definidos a partir de factores de emisión procedentes de México D.F. y otras compilaciones técnicas.

Únicamente se presentan los factores de emisión para los automóviles, no obstante, las tendencias para las camionetas y furgonetas son similares.

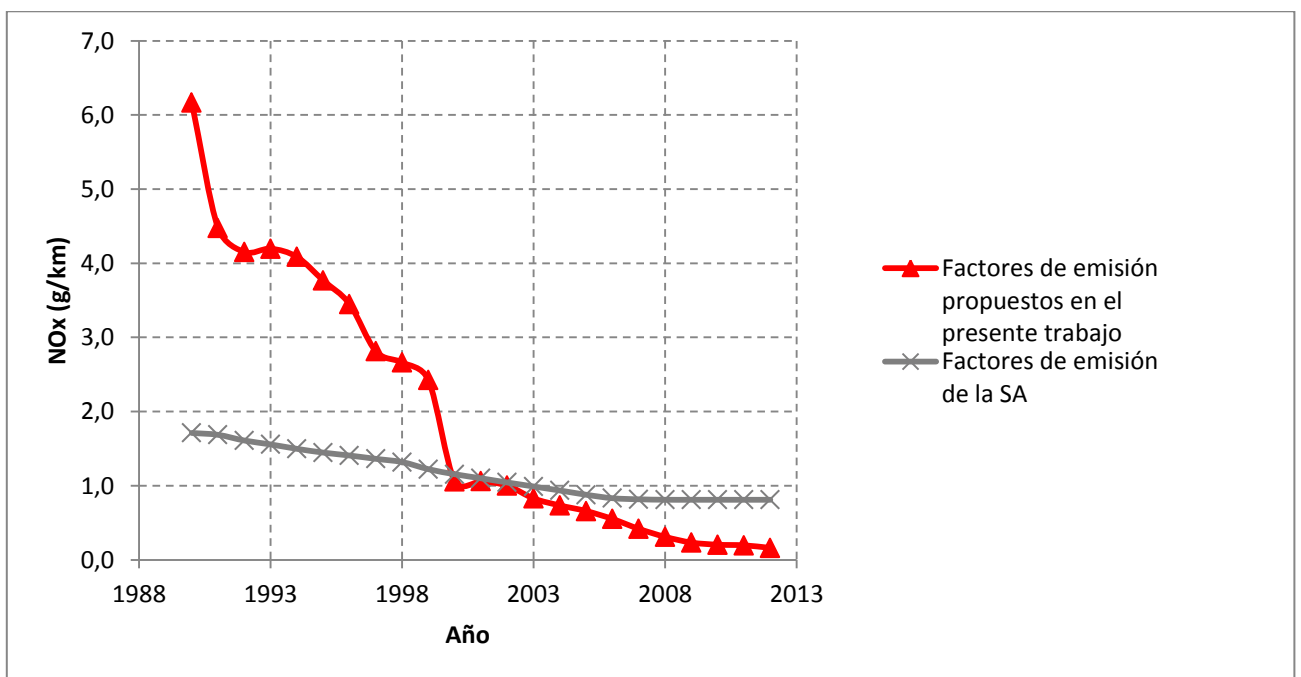


Figura 5. Factores de emisión en caliente de NO_x para los automóviles livianos a gasolina.

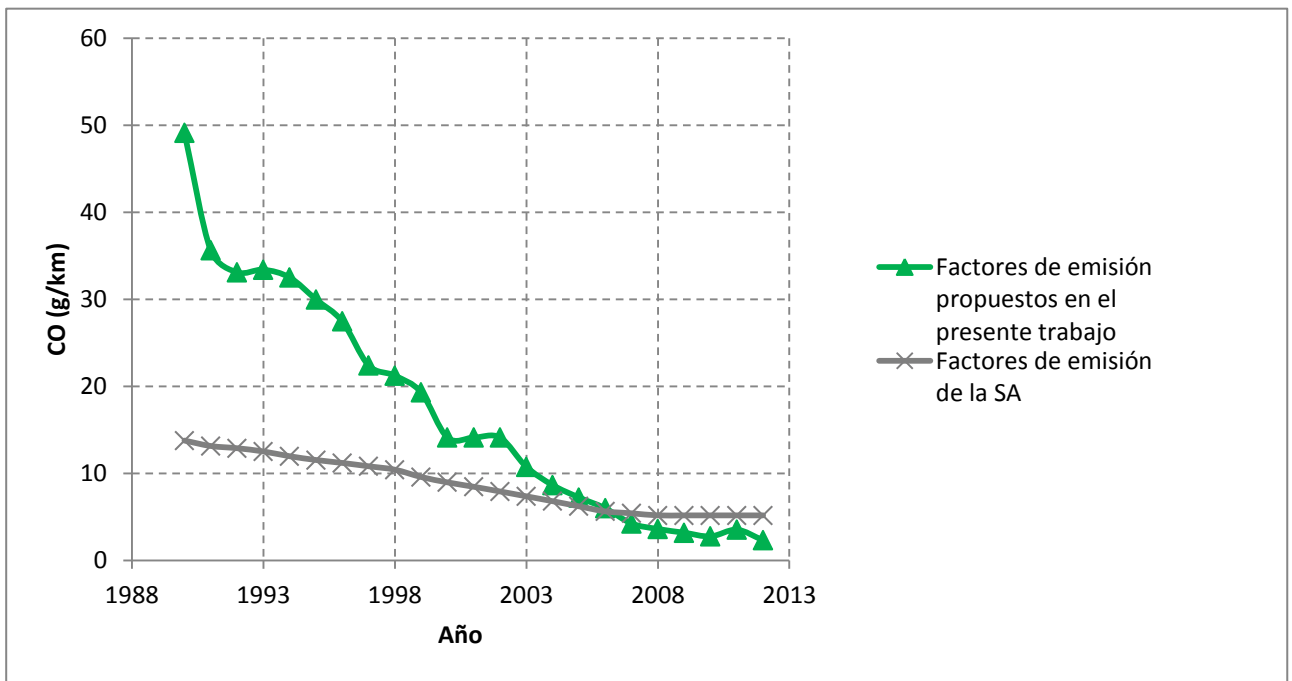


Figura 6. Factores de emisión en caliente de CO para los automóviles livianos a gasolina.

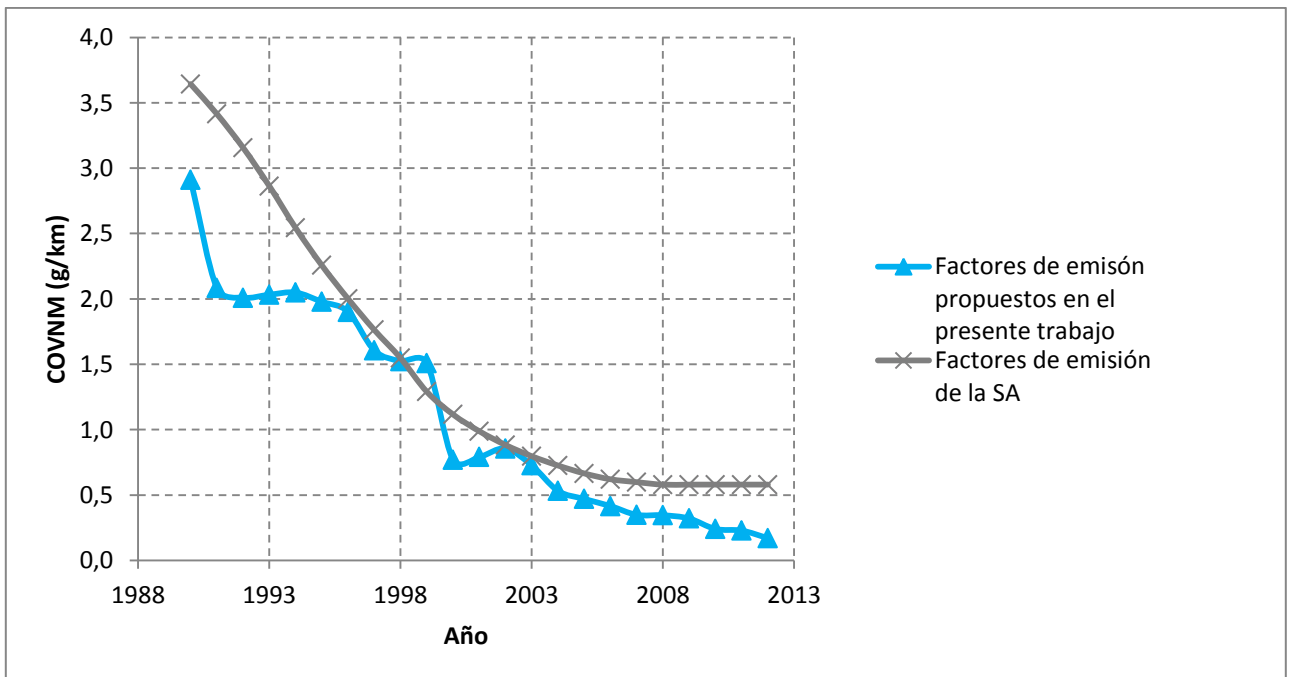


Figura 7. Factores de emisión en caliente de COVNM para los automóviles livianos a gasolina.

Los factores de emisión propuestos para los NO_x (vehículos del año 1999 y anteriores) y CO (vehículos del año 2006 y anteriores) son mayores respecto a los factores de emisión de la SA (Figura 5 y Figura 6). Los factores de emisión propuestos, asignan una menor emisión a los vehículos de modelos recientes. Para los COVNM los factores de emisión propuestos, en general, son menores a los factores usados por la SA (Figura 7).

Para las demás categorías de vehículos (a gasolina y a diésel) y para el resto de compuestos, se utilizaron los factores de emisión presentados en detalle en el último inventario oficial de emisiones atmosféricas del DMQ (CORPAIRE, 2009). Los vehículos híbridos aparecen por primera vez en este inventario de emisiones; por lo que sus factores de emisión provienen de la EEA (Ntziachristos & Samaras, 2013).

3.4. Emisiones de las gasolineras y “El Beaterio”

3.4.1. Modelo de emisión.

Para el cálculo de las emisiones de las gasolineras y “El Beaterio” se utilizó la Ecuación 13.

$$E^{COVNM} = FE * Vol_g$$

Ecuación 13

E^{COVNM} : Emisiones de COVNM producidas por la venta de gasolina (t/año)

FE: Factor de emisión de COVNM (t/m³·año)

Vol_g : Volumen de venta anual de gasolina (m³/año)

3.4.2. Actividad.

3.4.2.1. Consumo de combustible.

La ARCH (2014 a) proporcionó la información sobre la ubicación de las gasolineras y de “El Beaterio”, así como el volumen de venta para cada gasolinera; según el tipo de combustible. La Tabla 10 indica los valores de venta de combustible en el DMQ y en el cantón Rumiñahui.

Tabla 10. Consumo de combustible en el DMQ y en el cantón Rumiñahui, año 2012.

Tipo de Combustible	DMQ (galón/año)	Porcentaje	Cantón Rumiñahui (galón/año)	Porcentaje
Gasolina Extra	133 162 000	48.7	9 578 000	39.3
Gasolina Súper	59 601 540	21.8	3 005 000	12.3
Diésel Premium	80 592 368	29.5	11 795 000	48.4
Total	273 355 908	100	24 378 000	100

Fuente: (ARCH, 2014 a).

En el año 2012 se vendieron 273.3 millones de galones en el DMQ, el 70.5% del combustible expendido es gasolina (extra y súper) y el 29.5% es diésel.

3.4.3. Factores de emisión.

En la Tabla 11 y Tabla 12 se muestran los factores de emisión para las gasolineras y “El Beaterio”, respectivamente.

Tabla 11. Factores de emisión de COVNM, por proceso, en las gasolineras.

Proceso	Factor de emisión (t/m ³) de COVNM
Recarga de combustibles al vehículo	1.40E-03
Llenado al tanque subterráneo	1.30E-03
Expansión térmica en el tanque subterráneo	1.20E-04
Total	2.90E-03

Fuente: (US-EPA, 2008 a).

Tabla 12. Factores de emisión de COVNM, por proceso, en el “El Beaterio”.

Proceso	Factor de emisión (t/m ³) de COVNM
Llenado al tanque de almacenamiento	1.6E-03
Recarga de combustible en el camión cisterna	1.4E-03
Expansión térmica en el tanque de almacenamiento	6.0E-04
Total	3.6E-03

Fuente: (US-EPA, 1998).

3.5. Propiedades de los combustibles

Las propiedades de los combustibles se indican en la Tabla 13. El contenido de azufre se obtuvo de las campañas de muestreo realizadas en: diciembre (2011)-enero, marzo, junio, septiembre y noviembre de 2012 por la SA (Secretaría de Ambiente, 2012 b). El valor de la densidad de los combustibles fue proporcionado por la ARCH (2014 b), entidad que realiza muestreos mensuales en “El Beaterio”. Las demás propiedades provienen del IPCC (2006).

Tabla 13. Propiedades de los combustibles.

Propiedades	Diésel	Gasolinas
Contenido de azufre (ppm)	185.6	317.9
Densidad (kg/m ³)*	836.3	732.2
Poder calorífico superior (GJ/t)**	43.3	44.8
Contenido de C (kg C/GJ)**	20.4	19.9

Fuente: (Secretaría de Ambiente, 2012 b), *(ARCH, 2014 b), **(IPCC, 2006).

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Emisiones del tráfico vehicular

Las emisiones del tráfico vehicular se presentan según: el tipo de emisión, tipo de combustible y categoría del vehículo.

4.1.1. Según el tipo de emisión.

La Tabla 14 indica la conformación de las emisiones del tráfico vehicular según su tipo de emisión.

Tabla 14. Estimación anual de las emisiones de contaminantes producidas por el tráfico vehicular en el DMQ. Desglose por tipo de emisión. Año 2012.

Tipo de emisión		NO _x		CO		COVNM		MP ₁₀		MP _{2.5}		SO ₂	
		t/año	%	t/año	%	t/año	%	t/año	%	t/año	%	t/año	%
Tubo de escape	Caliente	20 492.3	98.5	88 397.5	86.1	7990.2	60.6	1201.9	72.6	967.5	79.9	451.1	100
	Frío	315.8	1.5	14 269.9	13.9	1077.5	8.2	1.5	0.1	1.4	0.1		
Evaporación						4117.9	31.2						
Abrasión								453.1	27.3	242.3	20		
Total		20 808.1	100.0	102 667.4	100.0	13 185.6	100.0	1656.5	100	1211.2	100.0	451.1	100.0

Desde el tubo de escape se producen el 100% de las emisiones de NO_x, CO y SO₂, el 80% de MP_{2.5}, el 72.7% de MP₁₀ y el 68.8% de COVNM. Estos porcentajes son coherentes con lo indicado por la literatura, según la cual cerca del 55% de los COVNM y casi la totalidad de CO y NO_x provienen del tubo de escape (Sher, 1998), (Faiz et al., 1996).

El principal aporte de las emisiones en frío corresponden al CO (13.9%) y a los COVNM (8.2%). De acuerdo a Ntziachristos & Samaras (2013), aunque las emisiones en frío ocurren en un periodo de tiempo limitado (entre 180 a 240 s), su aporte es significativo debido a que en estas condiciones la mezcla aire-combustible esta enriquecida (hay

mayores emisiones de CO y COVNM) y el catalizador no funciona adecuadamente porque no ha alcanzado su temperatura óptima de operación.

Las emisiones evaporativas aportan con el 31.2% de las emisiones de COVNM. Las emisiones por abrasión generan el 27.4% y 20% de las emisiones de MP₁₀ y MP_{2.5}, respectivamente.

4.1.2. Según el tipo de combustible.

La Figura 8 muestra el porcentaje de aporte de los vehículos a gasolina y a diésel a la emisión de contaminantes.

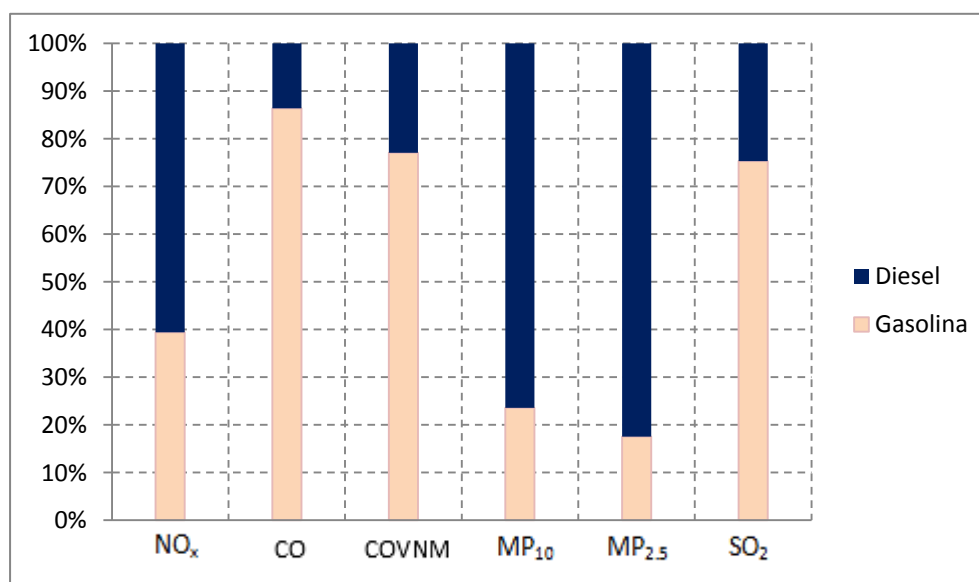


Figura 8. Porcentaje de emisiones por tipo combustible.

Los vehículos a gasolina, los cuales representan el 94.4% del parque vehicular del DMQ, son la principal fuente de emisión de CO (86.3%), COVNM (77.0%) y SO₂ (75.3%). Los vehículos a diésel, que conforman apenas el 5.6% del parque vehicular, son los principales contribuyentes de MP_{2.5} (82.5%), MP₁₀ (76.4%) y NO_x (60.6%). Estos porcentajes se explican al considerar que los motores a diésel trabajan comúnmente en

mezclas muy pobres, con menores emisiones de CO y COVNM, respecto a los vehículos a gasolina. Sin embargo, las emisiones de NO_x en los vehículos a diésel son elevadas debido a las altas temperaturas y presión a las que trabaja (Sher, 1998), (De Nevers, 1998). Además, la composición química del diésel promueve la formación de material particulado (MP). Por lo tanto, a los vehículos a diésel se les asigna mayores factores de emisión para el NO_x y MP (Molina & Molina, 2004), (De Nevers, 1998). Las mayores emisiones de SO₂ para los vehículos a gasolina corresponden al mayor contenido de azufre en este tipo de combustible.

4.1.3. Según la categoría.

La Tabla 15 presenta el porcentaje de emisiones desagregadas por categoría de vehículo. Los automóviles livianos a gasolina representan la categoría que más aporta a las emisiones de CO (51.7%), COVNM (50.1%) y SO₂ (47%). Los vehículos de carga sin clasificar a diésel son la categoría que más contribuye a las emisiones de MP_{2.5} (51.1%), MP₁₀ (47.6%) y NO_x (28.2%). En el inventario de emisiones atmosféricas del DMQ, año 2007, también se identifican a estas categorías como las que más aportan a las emisiones de tráfico vehicular (automóviles a gasolina: CO (30.6%) y COVNM (27.6%); vehículos pesados a diésel: MP_{2.5} (65.4%), MP₁₀ (59.7%), SO₂ (38.6%) y NO_x (38.2%)) (CORPAIRE, 2009). El porcentaje de aporte de contaminantes es diferente, en razón de que para el presente inventario se utilizó mejor información para la distribución de emisiones según la categoría de vehículos.

Tabla 15. Porcentaje de emisiones desagregadas según la categoría.

Categoría de vehículos		NO _x	CO	COVNM	MP ₁₀	MP _{2.5}	SO ₂	
Livianos	Automóvil	Particular a gasolina	21.6	51.7	50.1	14.5	10.4	47.0
		Particular a diésel	0.1	0.0	0.1	0.3	0.3	3.9
		Taxi y Turismo a gasolina	2.0	5.4	4.8	2.8	2.0	10.0
		Taxi y Turismo a diésel	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Camionetas	Particular a gasolina	12.3	14.7	13.1	2.6	2.2	10.8
		Particular a diésel	0.4	0.2	0.4	1.0	1.2	0.8
		Carga y Servicio Público a gasolina	0.1	0.2	0.2	0.1	0.0	0.2
		Carga y Servicio Público a diésel	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0
	Furgonetas	Particular a gasolina	0.4	2.6	1.4	0.3	0.2	1.1
		Particular a diésel	0.4	0.2	0.5	0.9	1.1	0.7
		Escolar y Turismo a gasolina	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
		Escolar y Turismo a diésel	0.3	0.1	0.4	0.7	0.8	0.5
		Híbridos	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2
	Motos	0.5	6.8	5.5	0.8	0.6	3.0	
Pesados	Bus	Escolar y Turismo a gasolina	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		Escolar y Turismo a diésel	1.3	0.3	0.5	1.0	1.1	0.2
		Interparroquial, provincial y cantonal a gasolina	0.2	0.3	0.1	0.2	0.1	0.2
		Interparroquial, provincial y cantonal a diésel	4.4	1.0	1.6	3.1	3.3	0.8
		Sin clasificar a gasolina	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
		Sin clasificar a diésel	3.4	0.7	1.2	2.4	2.6	0.6
		Urbano a gasolina	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
		Urbano a diésel	18.4	4.1	6.7	13.3	14.3	3.4
	Carga	Sin clasificar a gasolina	2.0	4.0	1.6	2.0	1.6	2.6
		Sin clasificar a diésel	28.2	6.3	10.3	47.6	51.1	12.2
		Liviana, Media e interparroquial a gasolina	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		Liviana, Media e interparroquial a diésel	0.6	0.1	0.2	1.1	1.2	0.3
	Furgoneta	Escolar y Turismo a gasolina	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		Escolar y Turismo a diésel	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0
		Sin Clasificar a gasolina	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		Sin Clasificar a diésel	0.3	0.1	0.1	0.5	0.6	0.1
	Microbus	Microbus a gasolina	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1
		Microbus a diésel	2.5	0.5	0.9	4.2	4.5	1.1
	Total		100	100	100.0	100.0	100.0	100.0

Vale la pena indicar que al considerar los vehículos de forma individual, se identifica que los buses, sin clasificar, a diésel son altamente contaminantes. Éstos emiten 150.7 veces más MP_{2.5}, 101.1 veces más MP₁₀, 94.2 veces más NO_x, 14.8 veces más COVNM, 8.7 veces más CO y 7.8 veces más SO₂ que los automóviles livianos a gasolina. Lo cual está relacionado con la actividad y el factor de emisión utilizado por cada categoría. Respecto a la actividad, los buses recorren anualmente entre 5 y 10 veces más distancia que los automóviles a gasolina (CORPAIRE, 2008), (CORPAIRE, 2009). En cuanto a los factores de emisión, por unidad se ha comprobado que los vehículos a diésel emiten más NO_x y MP que los vehículos a gasolina (De Nevers, 1998).

Por otro lado, al considerar la tasa promedio de ocupación de un vehículo privado (1.7 personas) y de los buses (30 personas) en el DMQ (EPMOP, 2010); se determinó que los automóviles emiten 165, 135.9, 86.1, 13.7, 12.9 y 8.8 veces más SO₂, CO, COVNM, NO_x, MP₁₀, MP_{2.5} respectivamente, que los buses.

4.2. Emisiones de gasolineras y “El Beaterio”

Las emisiones provenientes de las gasolineras y “El Beaterio” se indican en la Tabla 16.

Tabla 16. Emisiones de COVNM calculadas para el año 2012 (t/año).

Fuente de emisión	COVNM (t/año)	Porcentaje
Gasolineras del DMQ	2116.1	40.4
“El Beaterio”	3126.3	59.6
Total	5242.4	100.0

Las gasolineras aportan con el 40.4% de las emisiones de COVNM provenientes de la comercialización de combustible en el DMQ y el “El Beaterio” con el 59.6%.

4.3.Emisiones totales del tráfico vehicular, gasolineras y “El Beaterio”

En la Tabla 17 se muestran las emisiones calculadas para el año 2012 considerando como fuentes de emisión el tráfico vehicular, las gasolineras y “El Beaterio”.

Tabla 17. Emisiones calculadas para el DMQ, para el año 2012 (t/año).

Compuestos		Tráfico vehicular	Gasolineras y “El Beaterio”	Total	Porcentaje
Contaminantes Primarios	NO _x	20 808.1		20 808.1	14.3
	CO	102 667.4		102 667.4	70.7
	COVNM	13 185.6	5242.4	18 428.0	12.7
	MP ₁₀	1656.5		1656.5	1.1
	MP _{2.5}	1211.2		1211.2	0.8
	SO ₂	451.1		451.1	0.3
	Total	139 979.9	5242.4	145 222.3	100.0
GEI	CO ₂	2 572 892.1		2 572 892.1	99.96
	CH ₄	680.9		680.9	0.03
	N ₂ O	163.3		163.3	0.01
	Total	2 573 736.3		2 573 736.3	100.0

La emisión de CO representan el 70.7% (102 667.4 t/año), el NO_x el 14.3% (20 808.1 t/año) y el COVNM el 12.7% (18 428.0 t/año) de las emisiones totales de contaminantes primarios. Estos porcentajes son comparables con lo indicado en los inventarios anteriores, para estas mismas fuentes (CO: 70.9%-72.4%; NO_x: 11.7%-13.2%; COVNM: 11.4%-13.0%) (CORPAIRE, 2006), (CORPAIRE, 2008), (CORPAIRE, 2009). El aporte del SO₂ fue del 0.3%; en tanto, en inventarios previos este aporte estuvo entre 0.9% -2.5%. Esta variación está directamente relacionada con el menor contenido de azufre en los combustibles comercializados en el 2012. En el año 2003 se comercializaba diésel con un contenido de azufre de hasta 7000 ppm, en el 2007 el diésel comercializado tenía

cerca de 500 ppm (CORPAIRE , 2009) y en el 2012 la concentración fue de 185.6 ppm y 317.9 ppm para las gasolinas y el diésel, respectivamente (Secretaría de Ambiente, 2012 b).

Las gasolinas y “El Beaterio” aportan con 5242.4 t de COVNM/año, lo que representa el 28.4% de las emisiones totales calculadas de COVNM. En los inventarios previos este rango vario entre 15.5%-21.1% (CORPAIRE, 2006), (CORPAIRE, 2008), (CORPAIRE , 2009).

La Tabla 18 muestra las emisiones calculadas para el DMQ y para el cantón Rumiñahui.

Tabla 18.Emisiones calculadas para el DMQ y Rumiñahui, para el año 2012 (t/año).

Compuestos		Tráfico vehicular	Gasolinas y “El Beaterio”	Total	Porcentaje
Contaminantes Primarios	NO _x	23 190.3		23 190.3	14.8
	CO	110 509.5		110 509.5	70.3
	COVNM	14 292.8	5380.5	19 673.3	12.5
	MP ₁₀	1867.4		1867.4	1.2
	MP _{2.5}	1371.4		1371.4	0.9
	SO ₂	489.4		489.4	0.3
	Total	151 720.8	5380.5	157 101.3	100.0
GEI	CO ₂	2 807 875.7		2 807 875.7	100.0
	CH ₄	725.8		725.8	0.0
	N ₂ O	174.3		174.3	0.0
	Total	2 808 775.9		2 808 775.9	100.0

4.4. Comparación con inventarios oficiales desarrollados en el DMQ

En la Tabla 19 se presenta una comparación de los resultados encontrados para el año 2012, respecto a los inventarios previos desarrollados en el DMQ.

Tabla 19. Comparación de resultados con otros inventarios del DMQ, considerando las emisiones del tráfico vehicular, gasolinas y “El Beaterio”.

Inventarios del DMQ		Inventario 2003	Inventario 2005*	Inventario 2007**	Este Inventario 2012
Compuestos contaminantes	NO _x	16 973	14 994	17 960	20 808
	CO	91 330	91 387	101 174	102 667
	COVNM	14 736	15 965	17 991	13 186
	MP ₁₀	1546	1867	859	1656.5
	MP _{2.5}	1093	1298	634	1211.2
	SO ₂	3173	2693	1218	451
GEI	CO ₂	1 696 803	1 927 388	2 198 932	2 572 892
	CH ₄	749	745	655	681
	N ₂ O	71	100	144	163

Fuente: (CORPAIRE, 2006),* (CORPAIRE, 2008), ** (CORPAIRE, 2009).

Los resultados del presente inventario son coherentes respecto a los inventarios anteriores. Se observa una tendencia hacia el incremento para la mayoría de los contaminantes (NO_x, CO, MP₁₀ y MP_{2.5}). Este crecimiento es proporcional al incremento del parque vehicular y al uso de factores de emisión locales (para el NO_x y CO los factores utilizados son hasta cuatro veces mayores a los de la SA (Figura 5 y Figura 6)). En comparación a los inventarios previos, las emisiones de COVNM fueron menores, probablemente debido al uso de factores de emisión menores a los anteriormente utilizados por la SA (Figura 7). Las emisiones de SO₂ en el 2012 representan el 37.0% de las emisiones calculadas en el año 2007, lo cual se asocia al uso de combustibles con menor contenido de azufre.

4.5. Mapas de emisión de contaminantes

Los mapas de emisiones de contaminantes primarios fueron procesados mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG). Para el desarrollo de los mapas se repartieron espacialmente las emisiones anuales totales.

4.5.1. Mapas de emisión de contaminantes del tráfico vehicular.

La distribución espacial de las emisiones del tráfico se realizó en base a un mapa de intensidad de tráfico, la longitud de las vías y su ubicación geográfica en la malla. Este enfoque se denomina *top-down* y es utilizado típicamente en otros inventarios de emisiones (Parra, 2004), (Ferrer, 2012), (Londoño et al., 2011).

La intensidad de tráfico corresponde al número de vehículos que atraviesan una sección transversal en un tiempo determinado, en este caso, un día. El mapa de intensidad de tráfico vehicular para el año 2012 se desarrolló en base a conteos automáticos obtenidos por la Secretaría de Movilidad del DMQ, entre el año 2009 y 2014. Las vías con datos de conteos de tráfico representan el 85% de la red vial principal del DMQ. Los registros de estos puntos fueron asignados al segmento vial correspondiente mediante SIG. Para obtener un valor de tráfico vehicular en los ejes viales sin conteos en campo se realizó un balance de flujo vehicular (en las vías principales) y una correlación con la cantidad de vehículos por administración zonal (en las vías secundarias).

Un mayor detalle sobre el proceso de elaboración del mapa de intensidad de tráfico, se puede consultar en el artículo “Caracterización de la intensidad media diaria y de los perfiles horarios del tráfico vehicular del Distrito Metropolitano de Quito” (Parra & Vega, 2014). La Figura 9 indica el mapa de intensidad de tráfico que se utilizó para la distribución espacial de las emisiones de tráfico.

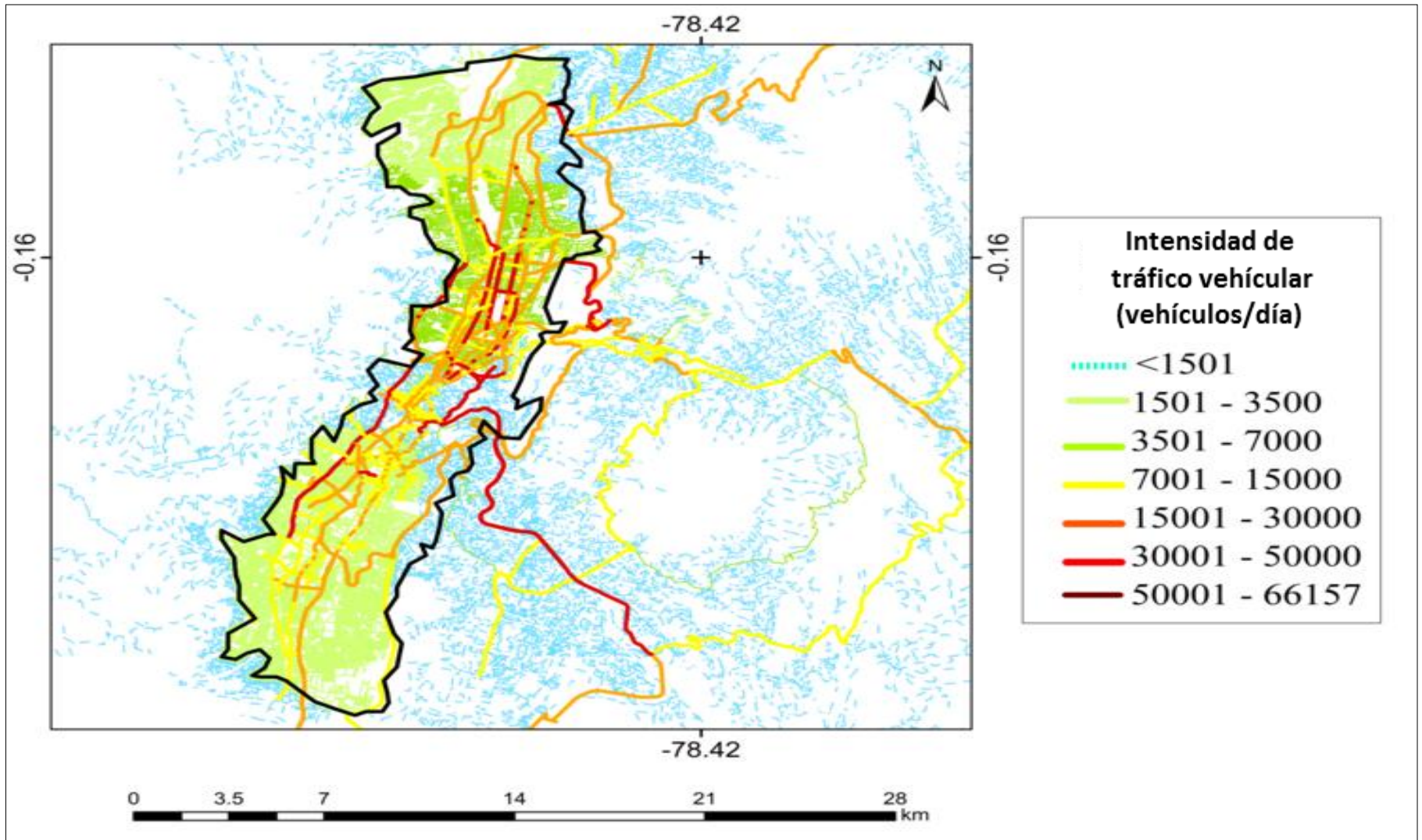


Figura 9. Mapa de la intensidad diaria de tráfico vehicular, representativo para el año 2012.

Los mapas de emisión de contaminantes se indican en la Figura 10 a la Figura 15. Las mayores emisiones de contaminantes están ubicadas en la zona urbana (más en la zona norte). También se observa que las zonas de vías periféricas (interoceánica, Simón Bolívar y Autopista Rumiñahui) presentan altos niveles de emisión, lo cual está relacionado con una mayor intensidad de tráfico.

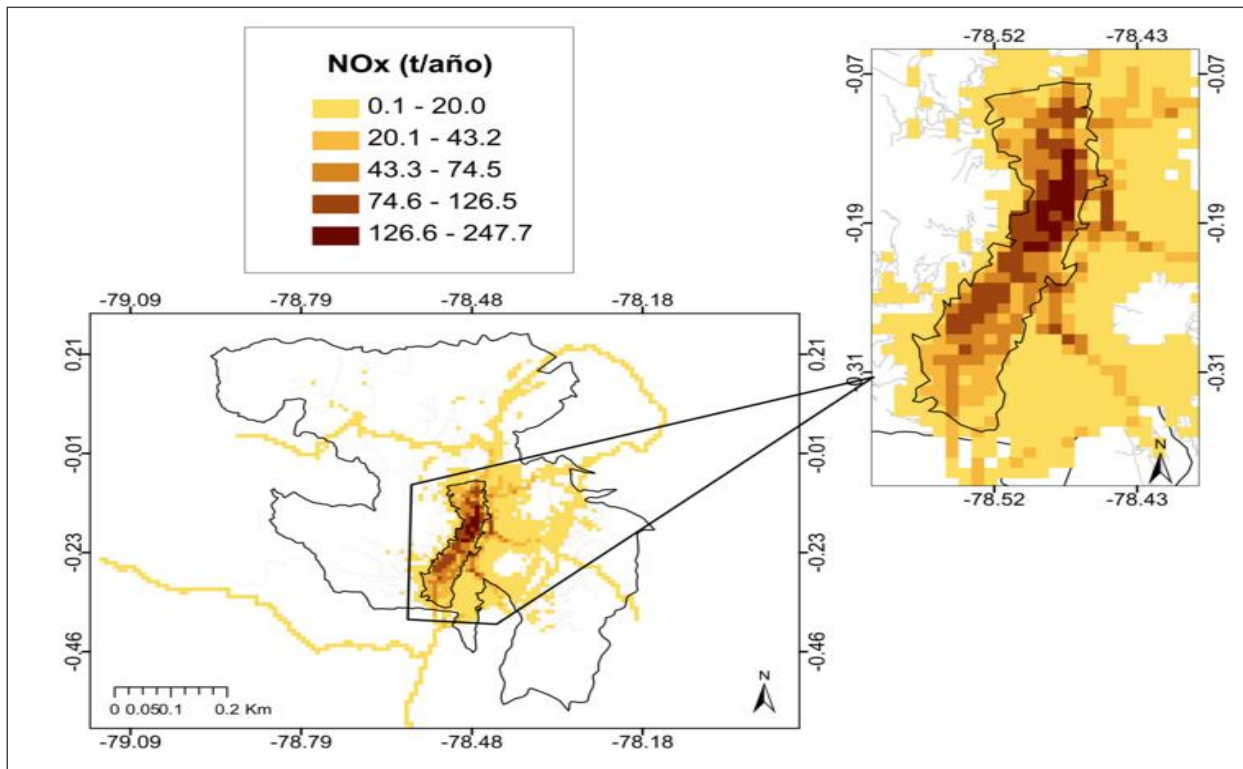


Figura 10. Mapa de emisiones de NO_x (t/año), provenientes del tráfico vehicular. Año 2012.

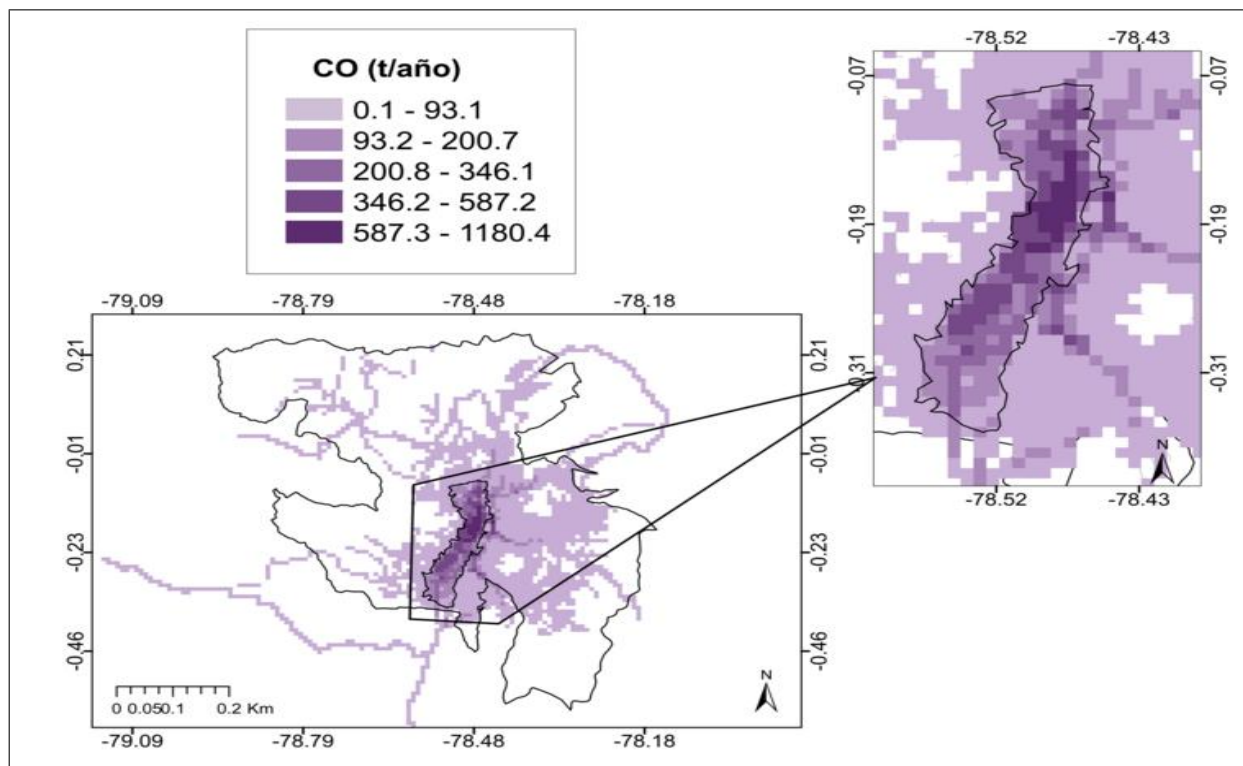


Figura 11. Mapa de emisiones de CO (t/año), provenientes del tráfico vehicular. Año 2012.

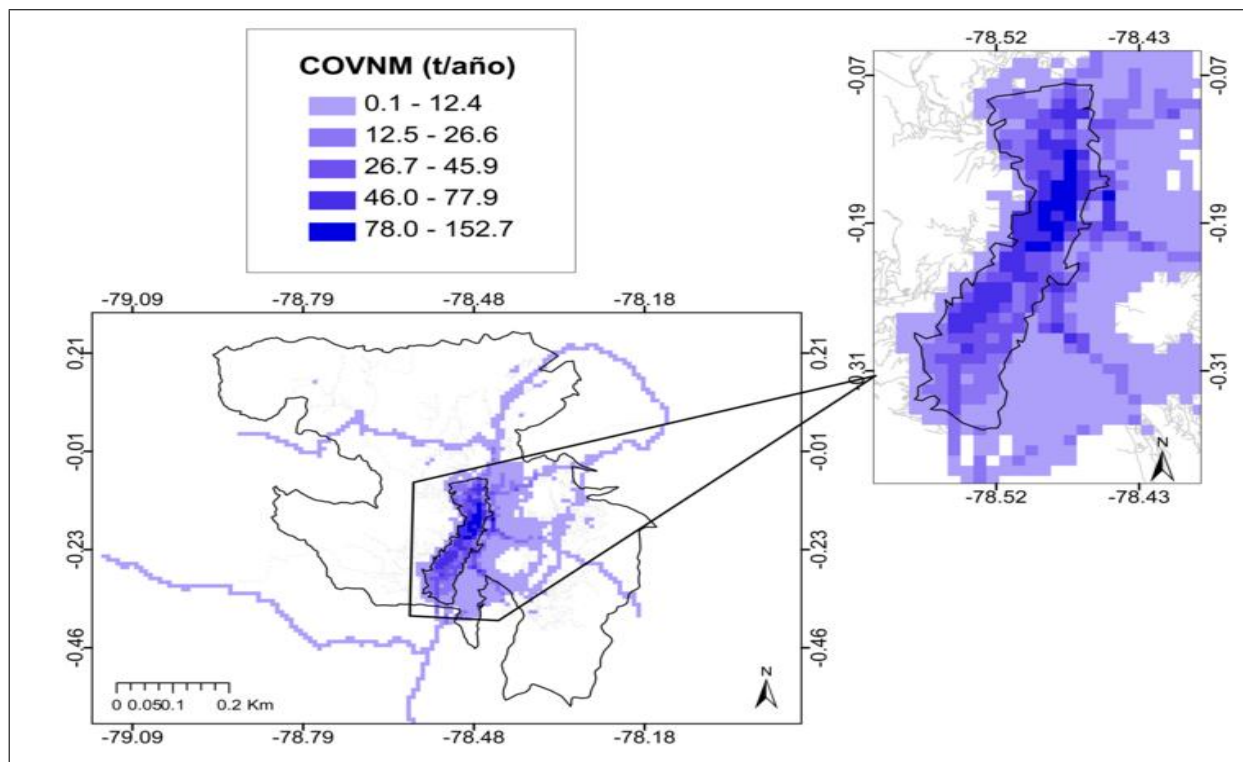


Figura 12. Mapa de emisiones de COVNM (t/año), provenientes del tráfico vehicular. Año 2012.

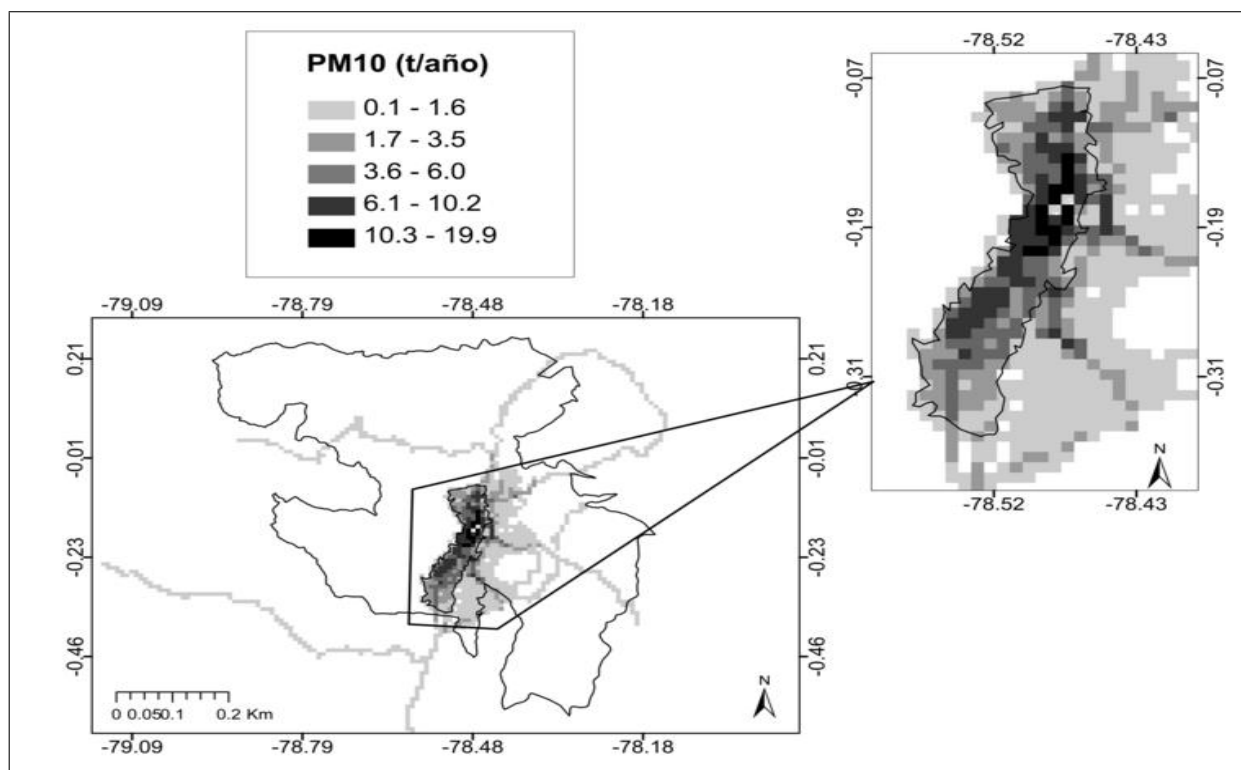


Figura 13. Mapa de emisiones de MP_{10} (t/año), provenientes del tráfico vehicular. Año 2012.

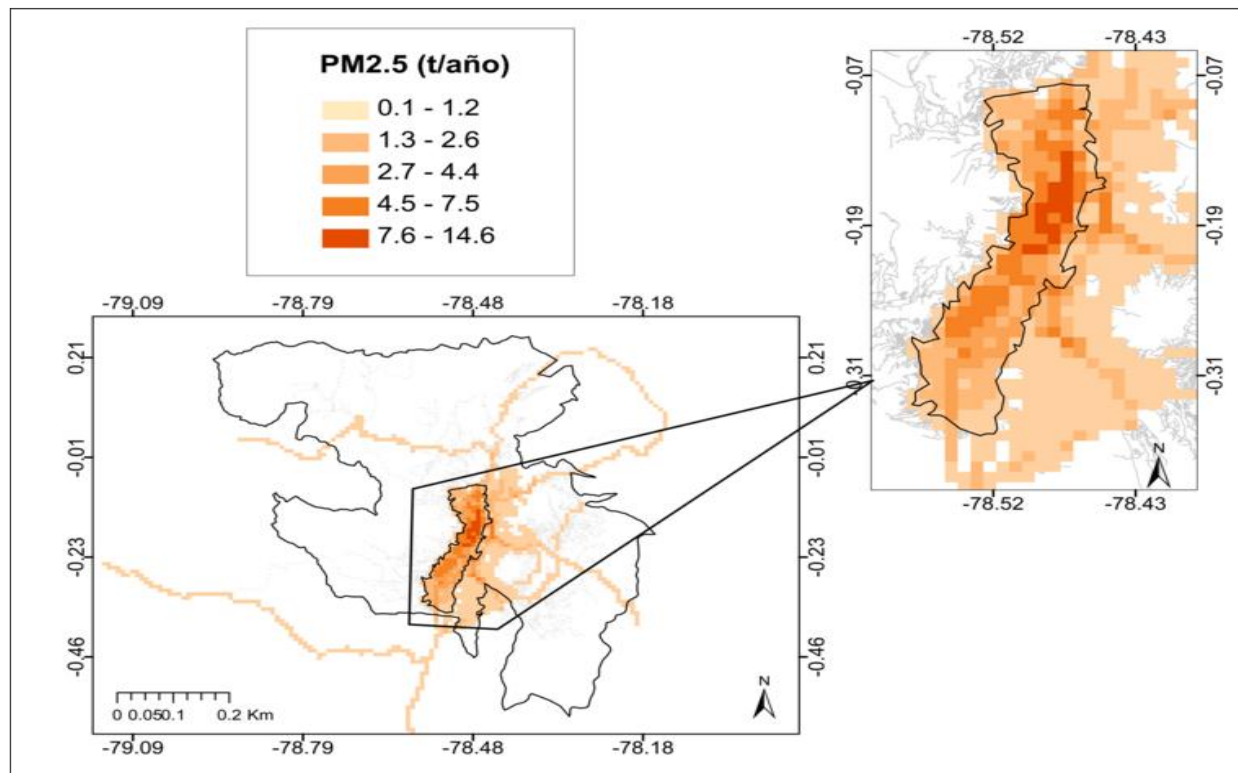


Figura 14. Mapa de emisiones de $MP_{2.5}$ (t/año), provenientes del tráfico vehicular. Año 2012.

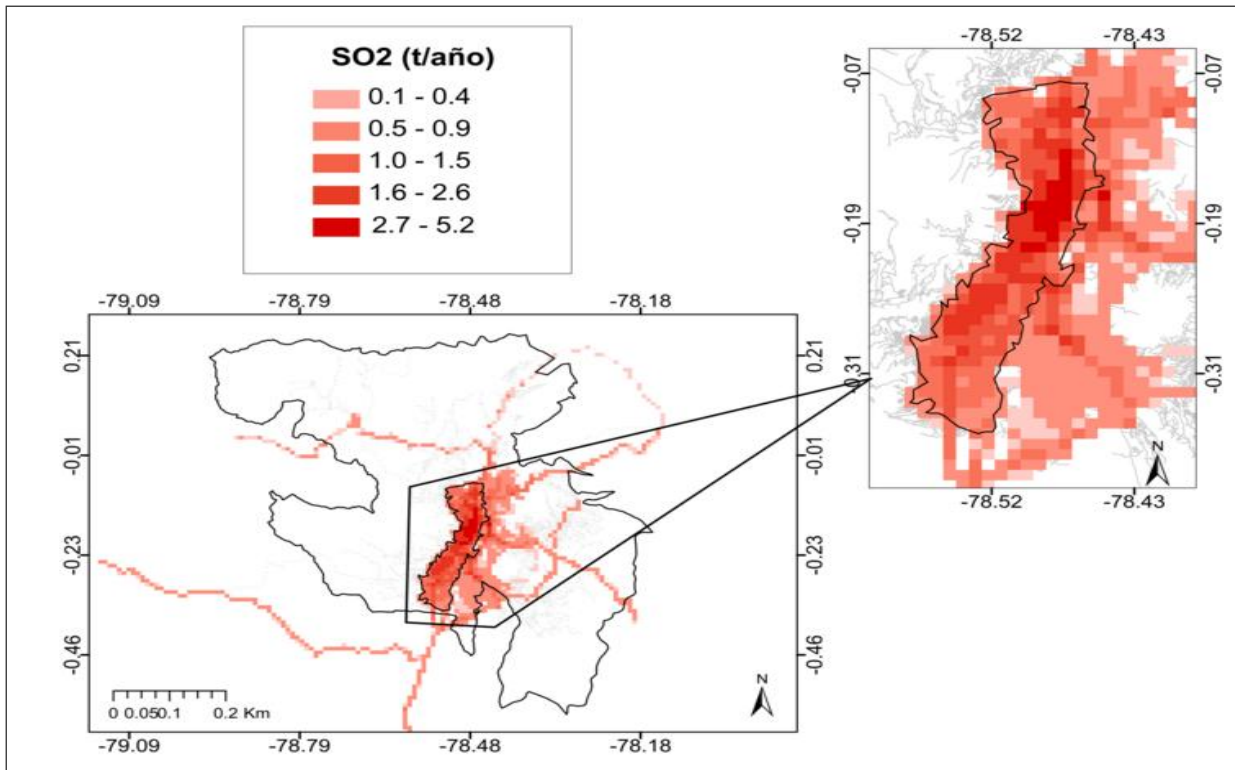


Figura 15. Mapa de emisiones de SO₂ (t/año), provenientes del tráfico vehicular. Año 2012.

4.5.2. Mapa de emisión de contaminantes de las gasolineras y “El Beaterio”.

Las emisiones de contaminantes primarios desde esta fuente se ubicaron mediante el enfoque *bottom-up*. La Figura 16 muestra la ubicación geográfica de las gasolineras y “El Beaterio” del DMQ y sus alrededores. Las emisiones de COVNM se muestran en la Figura 17, éstas son directamente proporcionales al volumen de combustible gestionado en cada locación.

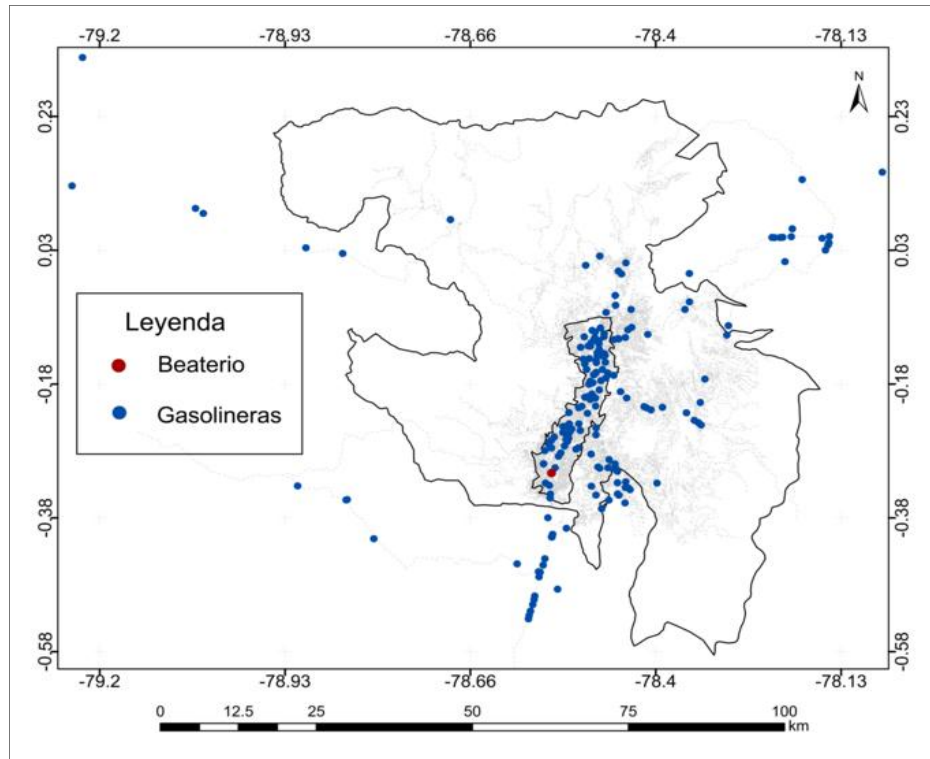


Figura 16. Ubicación de las gasolineras y “El Beaterio” en el DMQ y sus alrededores.

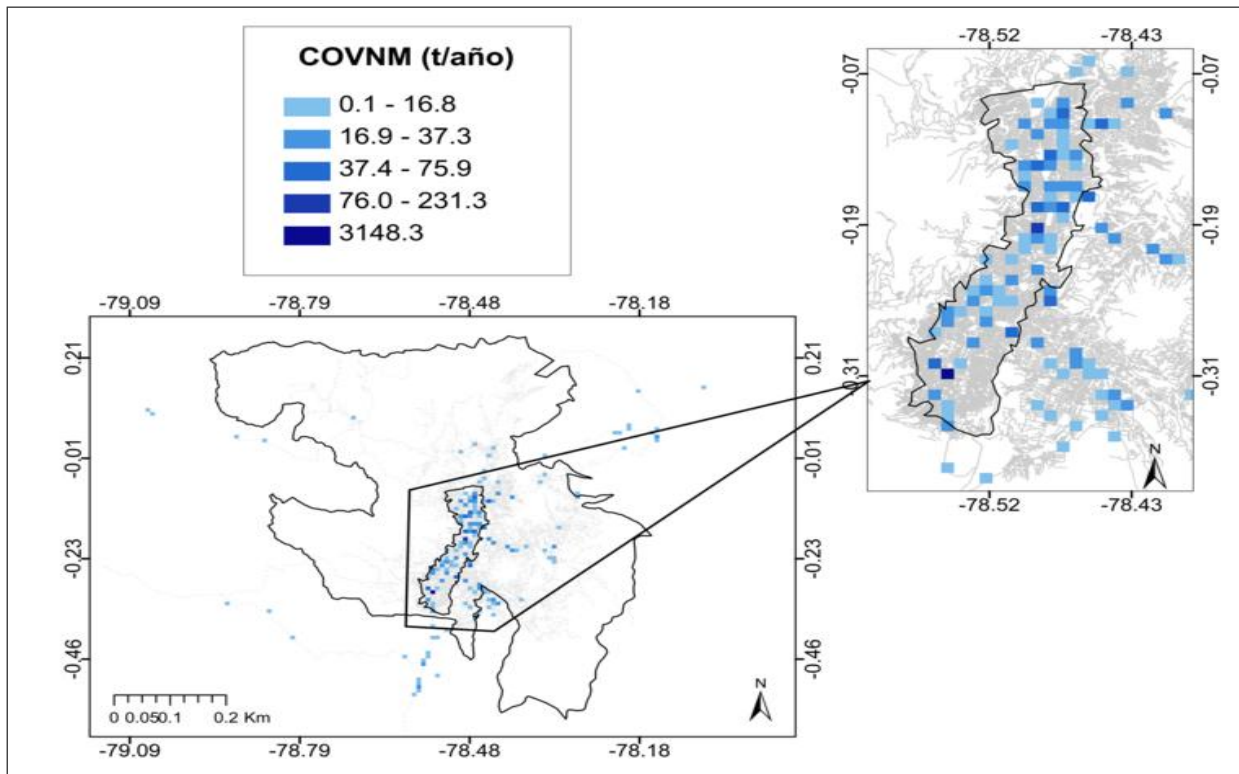


Figura 17. Mapa de emisiones de COVNM (t/año), provenientes de las gasolineras y “El Beaterio”. Año 2012.

4.5.3. Mapa de emisiones totales de COVNM.

Las emisiones totales de COVNM se obtienen al sumar las emisiones de COVNM procedentes del tráfico vehicular, las gasolineras y de “El Beaterio” (Figura 18). Se identifica una fuerte emisión en la zona sur, donde está ubicado “El Beaterio”. En esta celda el aporte de emisiones de “El Beaterio” es 111.5 veces mayor a la del tráfico vehicular.

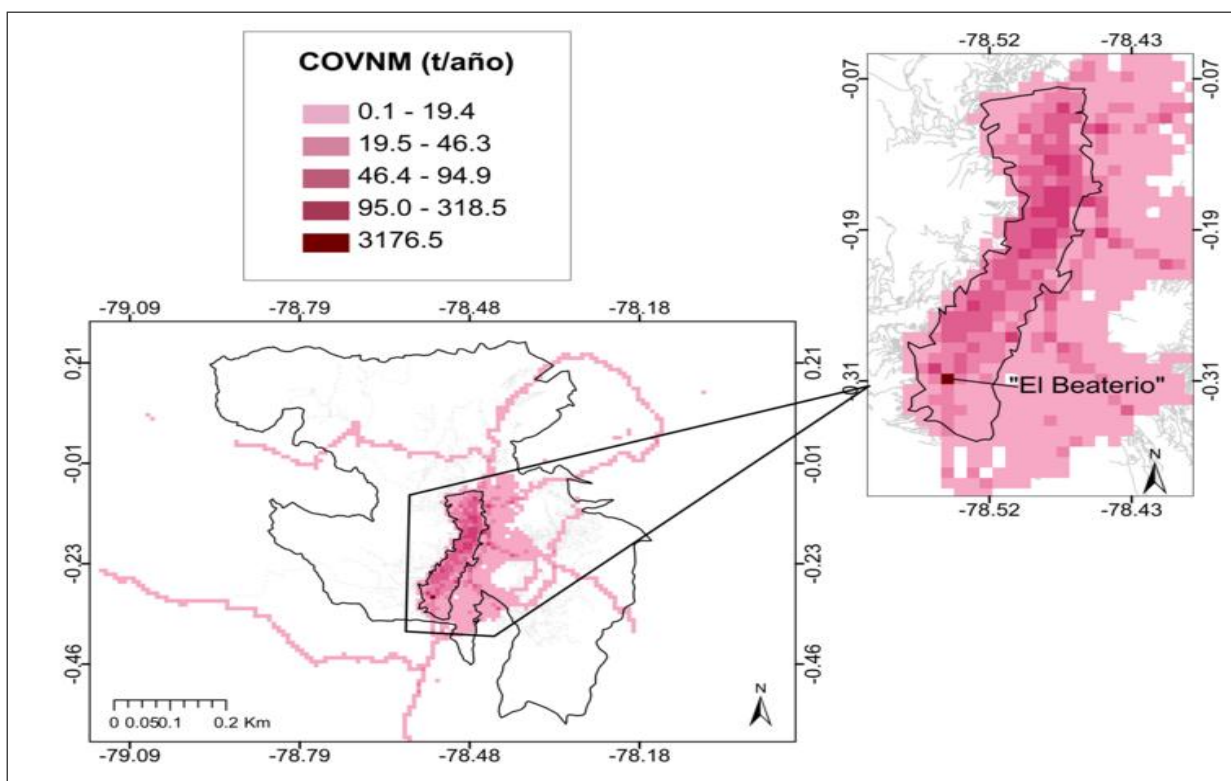


Figura 18. Mapa de emisiones totales de COVNM (t/año), provenientes del tráfico vehicular, las gasolineras y “El Beaterio”. Año 2012.

4.6. Análisis de incertidumbre.

A la actividad del tráfico vehicular se le asignó una calificación de “B” ya que la estadística sobre distancia recorrida y consumo de combustible por categoría es información fiable; sin embargo, presenta cierta variabilidad temporal y espacial respecto a las características del presente estudio. A la actividad de las gasolineras y “El Beaterio” se le asignó una calificación de “A”, ya que el volumen de venta y almacenamiento de combustible corresponden a información documentada por una entidad oficial competente en el área (ARCH, 2014 a).

La calificación para los factores de emisión varía entre “A” y “D”. A las categorías de vehículos y tipos de contaminantes para los cuales se priorizó información local, se asignó una calificación de “C” (emisiones de NO_x y CO de vehículos livianos). Sin embargo, al factor de emisión de los COVNM se le asignó una calificación de “D”, ya que este compuesto proviene de varios tipos de emisión (caliente, frío y evaporativas) y su cálculo presenta mayor incertidumbre. El factor de emisión del SO₂ depende netamente del contenido de azufre en el combustible, esta información se obtuvo de mediciones realizadas por la SA por lo que se le dio una calificación de “A” (Secretaría de Ambiente, 2012 b). La calificación para los demás factores de emisión, del tráfico vehicular y de las gasolineras y “El Beaterio”, se seleccionó de cada una de las fuentes del modelo de cálculo (US-EPA, 1998), (US-EPA, 2008 a), (Pulles & Kuenen, 2013), (IPCC, 2006).

En la Tabla 20 y Tabla 21 se muestra la evaluación de incertidumbre para el presente inventario.

Tabla 21. Analisis de incertidumbre para las emisiones de las gasolineras y “El Beaterio”.

Fuente	COVNM			
	Actividad	%	Factor de emisión	Estimación
Gasolineras	A	40.4	D	C
Beaterio	A	59.6	D	C
Total		100.0		

La calificación global del inventario (Estimación) varía entre “B” y “C”; por lo que la calidad del mismo está entre alta y media. Se considera que la estimación es medianamente fiable y a futuro se pueden tomar acciones para mejorar su incertidumbre.

5. CONCLUSIONES

- ❖ El inventario de las emisiones atmosféricas del DMQ para el tráfico vehicular, gasolineras y “El Beaterio” está actualizado al año 2012 y fue desarrollado con la mejor información disponible (consumo de combustible, contenido de azufre en el combustible, conformación del parque vehicular, factores de emisión locales y mapa de intensidad media diaria de tráfico vehicular). Por ello se puede afirmar que este inventario de emisiones presenta menor incertidumbre con respecto a inventarios anteriores.
- ❖ Las emisiones anuales de contaminantes primarios para el DMQ, desde las fuentes inventariadas fueron: CO -102 667.4 t/año, NO_x -20 808.1 t/año, COVNM-18 428.0, MP₁₀ -1656.5 t/año, MP_{2.5} -1211.2 t/año y SO₂ -451.1 t/año; las emisiones de GEI fueron: CO₂-2 572 892.1 t/año, CH₄-680.9 t/año, N₂O-163.3 t/año.
- ❖ Los vehículos a gasolina son los que más aportan a la emisión de CO (86.3%), de COVNM (77.0%) y SO₂ (75.3%). En cambio los vehículos a diésel aportan principalmente a las emisiones MP_{2.5} (82.5%), MP₁₀ (76.4%) y NO_x (60.6%).
- ❖ Los automóviles livianos a gasolina y los vehículos de carga, sin clasificar, a diésel son las categorías que más aportan a las emisiones contaminantes en el DMQ.
- ❖ Aproximadamente 128 787 vehículos no asistieron a la RTV en el 2012, lo que corresponde a un 25% de evasión.
- ❖ Comparando con inventarios previos, el inventario desarrollado es coherente y presenta una mejor redistribución de las emisiones entre las subcategorías de vehículos. La emisión, para la mayor parte de contaminantes, muestra una tendencia al incremento. Esto como consecuencia del aumento del parque vehicular en el

DMQ y del uso de factores de emisión locales. Las emisiones de SO_2 son menores respecto a inventarios anteriores debido a la reducción de azufre en los combustibles.

- ❖ Se cuenta con mapas de emisión anual de contaminantes elaborados con una alta resolución espacial, para los compuestos contaminantes: CO , NO_x , COVNM , SO_2 , MP_{10} y de $\text{MP}_{2.5}$. Estos mapas son la base para la generación de mapas de emisiones a escala temporal más baja (mapas diarios y horarios); información indispensable para estudios de transporte químico de contaminantes del aire mediante del uso de modelos numéricos.
- ❖ De los mapas de contaminantes se observa que las emisiones de contaminantes del tráfico vehicular se concentran principalmente en la zona norte de la ciudad de Quito y en las vías periféricas de mayor circulación como la Panamericana Norte, Autopista General Rumiñahui y Av. Simón Bolívar.
- ❖ Del análisis de incertidumbre se concluye que la calificación del inventario es mediana. Sin embargo, por la magnitud de las emisiones, para futuros inventarios, es necesario reducir el nivel de incertidumbre.

6. RECOMENDACIONES

- ❖ Completar el inventario con otras fuentes de emisión, como las emisiones industriales, generadores eléctricos, vegetación y erosión eólica.
- ❖ Validar el inventario de emisiones por medio de la simulación de la calidad del aire mediante modelos de transporte químico, cuyos resultados deben ser comparados con registros de calidad del aire en el DMQ.
- ❖ Considerando que el tráfico vehicular es la principal fuente de emisión de contaminantes en el DMQ, se recomienda promover la determinación de los factores de emisión locales, para un mayor número de vehículos de diferentes categorías.
- ❖ Caracterizar mejor la velocidad promedio por sectores para mejorar el cálculo de emisiones en frío y por abrasión.
- ❖ Promover la actualización permanente de la información para mejorar los mapas de tráfico. Impulsar el uso de modelos de transporte para la actualización de los mismos.
- ❖ Realizar la actualización de la información sobre distancia anual recorrida y consumo de combustible de las diferentes categorías de vehículos.
- ❖ Dado el porcentaje de emisiones y el nivel de incertidumbre, se recomienda tomar acciones para mejorar la estimación de las emisiones de NO_x , MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$ de los vehículos pesados, y de las emisiones de COVNM de los automóviles livianos.

7. REFERENCIAS

- AEADE. (2013). *Anuario 2012*. Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, Quito
- ARCH. (2014 a). *Volumen de Venta de Combustibles en el año 2012, en la Provincia de Pichincha y sus Cantones*. Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero, Quito
- ARCH. (2014 b). *Certificados de Calidad. Resumen mensual del año 2012*. Sistema interno de Información. Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero, Quito
- Boulter, P., Borken-Kleefeld, J., & Ntziachristos, L. (2013). The Evolution and Control of NO_x Emissions in Europe. *Urban Air Quality in Europe, Hdb Env Chem* 26: 31–54.
- CICCEV-CAF-MAE. (2012). *Determinación de la línea base de factores de emisiones contaminantes en motores de combustión interna con el combustible de actual venta en el país*. Quito: Centro de transferencia tecnológica para la capacitación e investigación en control de emisiones vehiculares.
- Colville, R., Hutchinson, E., Mindell, J., & Warren, R. (2001). The transport sector as a source of air pollution. *Atmospheric Environment*, 35(9), 1537–1565.
- CORPAIRE. (2006). *Inventario de Emisiones del Distrito Metropolitano de Quito. Año 2003*. Quito: Corporación Municipal para el Mejoramiento del Aire de Quito.
- CORPAIRE. (2008). *Inventario de Emisiones del Distrito Metropolitano de Quito. Año 2005*. Quito: Corporación Municipal para el Mejoramiento del Aire de Quito.
- CORPAIRE. (2009). *Inventario de Emisiones del Distrito Metropolitano de Quito. Año 2007*. Quito: Corporación Municipal para el Mejoramiento del Aire de Quito.
- De Castro, M. (1987). *El motor diésel en el automóvil. Enciclopedia CEAC del motor y automóvil*. Barcelona: Ediciones CEAC, S.A.
- De Nevers, N. (1998). *Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire*. McGraw-Hill.
- Domínguez, E., & Ferrer, J. (2008). *Mecánica del vehículo*. Editex.
- Dora, C., Honsking, J., & Mudu, P. (2011). *Urban transport and Health*. OMS. Eschborn: Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- EEA. (2014). Volatile Organic Compound. *European Environmental Agency*. Obtenido el 30 de Octubre 2014 de <http://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality/resources/glossary/voc>

- EPMOP. (2010). *Plan Maestro de Movilidad. 2009. Hacia un nuevo modelo de movilidad en el DMQ*". Empresa Municipal de Movilidad y Obras Públicas del Distrito Metropolitano de Quito.
- Estevez, S. (1971). *El motor de Gasolina. Enciclopedia CEAC del motor y automóvil*. Barcelona: Ediciones CEAC, S.A.
- Faiz, A., Weaver, C. & Walsh, M. (1996). *Air Pollution from Motor Vehicles*. Washington, D.C.: The World Bank.
- Ferrer, G. (2012). *Inventario de las emisiones de contaminantes atmosféricos por tráfico rodado en España en el año 2009*. Barcelona: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona.
- Fitzgerald, B., Muntifering, R., McGrath, M., Burkey, K., Decoteau, D., Fiscus, E., Manning, W., Krupa, S., Chappelka, A & Grantz, D. (2009). The Ozone Component of Global Change: Potential Effects on Agricultural and Horticultural Plant Yield, Product Quality and Interactions with Invasive Species. *Journal of Integrative Plant Biology*, 10.1111/j.1744-7909.2008.00805.x.
- Han, X., & Naeher, L. (2006). A review of traffic-related air pollution exposure assessment studies in the developing countries. *Environment International*, 106-120.
- IARC. (1987). Overall evaluations of carcinogenicity: an updating of IARC Monographs volumes 1 to 42. *IARC Monogr Eval Carcinog Risk Hum Suppl*, 1-440.
- IARC. (17 de Octubre de 2013). Outdoor air pollution a leading environmental cause cancer deaths. Press Release N°221. *International Agency for Research on Cancer*, (Oct 17). Obtenido el 12 de Diciembre 2014 de <http://www.iarc.fr/>
- IEA. (2014). Oil Productos. *International Energy Agency* .Obtenido el 12 de Noviembre 2014 de <https://www.iea.org/stats/defs/sources/petrol.asp#motgas>
- INEC. (2013). Proyección de la población ecuatoriana, por años calendario, según cantones 2010-2020. *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos*. Obtenido el 7 de enero 2015 de http://www.inec.gob.ec/inec/index.php?option=com_content&view=article&id=560:inec-presenta-sus-proyecciones-poblacionales-cantonales&catid=68:boletines&Ite
- INEN. (2012 a). *NT INEN 935:2012. Gasolina. Requisitos. Octava Revisión*. Quito.
- INEN. (2012 b). *NT INEN 1489:2012. Productos derivados del petroleo. Diésel. Requisitos*. Quito.
- IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero*.

- IPCC. (2007). Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis. Greenhouse Gases. *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Obtenido el 10 de Noviembre 2014 de http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/tssts-2-1.html
- Kansal, A. (2009). Sources and reactivity of NMHCs and VOCs in the atmosphere: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 17-26.
- Londoño, J., Correa, M., & Palacio, C. (2011). Estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, Colombia. *Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 16*, p. 149-162.
- MAE. (2010). *Plan Nacional de la Calidad del Aire*. Quito: MAE-COSUDE.
- MAE. (2013). *Inventario Preliminar de las Emisiones de Contaminantes del Aire, de los cantones de Ambato, Riobamba, Santo Domingo de los Colorados, Latacunga, Ibarra, Manta, Protoviejo, Esmeraldas y Milagro*. Quito: Proyecto Calidad del Aire. Fase III. Ministerio del Ambiente de Ecuador.
- Mellios, G., & Ntziachristos, L. (2013). *Gasoline Evaporation from vehicles*. EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013.
- Molina, M., & Molina, L. (2004). Megacities and Atmospheric Pollution. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54:6, 644-680
- Ntziachristos, L., & Boulter, P. (2013). *Road, tyre and brake wear*. EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013.
- Ntziachristos, L., & Samaras, Z. (2000). *COPERT II. Computer programme to calculate emissions from transport*. European Environmental Agency.
- Ntziachristos, L., & Samaras, Z. (2013). *Exhaust emission from road transport*. EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013.
- Ocaña, L. (2014). *Cálculo de factores de emisión vehicular para el Distrito Metropolitano de Quito en base al análisis estadístico de los registros de la Revisión Técnica Vehicular del año 2012 y una ruta de campo establecida*. Quito: Universidad San Francisco de Quito.
- OMS. (2004). *Guías para la Calidad del Aire*. Ginebra: Departamento de Protección del Medio Ambiente.

- OMS. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Organización Mundial de la Salud.
- OMS. (2014). Calidad del aire (exterior) y salud. Nota descriptiva N°313. *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido el 2 de Diciembre 2014 de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
- OPS. (2001). *Incremento de enfermedades respiratorias en escolares de Quito por contaminación atmosférica de origen vehicular*. Quito: OPS-COSUDE-Fundación Natura.
- OPS. (2010). *Determinantes ambientales y sociales de la Salud*. México: ISBN:978-92-75-33129-3.
- Pacyna, J., & Graedel, T. (1995). *Inventories: Status and Prospects*. Annual Review. Energy Environmental Inc.
- Palermo, F. (2014). *Procesamiento de parámetros físicos e inventario de emisiones atmosféricas antropogénicas en la cuenca hidrográfica del río Napo*. Quito. Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniero Ambiental : Universidad San Francisco de Quito.
- Parra, R. (2004). *Desarrollo del modelo EMICAT2000 para estimación de emisiones de contaminantes del aire en Cataluña y su uso en modelos de dispersión fotoquímica*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña. PhD tesis.
- PNUMA. (2014). *UNEP Year Book 2014 emerging issues update*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Pulles, T., & Kuenen, J. (2013). *Uncertainties*. EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013.
- Sánchez, M. E. (2013). *Estimación de las Emisiones de PM10 y PM2.5 por Resuspensión Eólica en Ecuador durante el Año 2010*. Quito: Quito. Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniero Ambiental.
- Secretaría de Ambiente. (2012 a). *Inventario de Emisiones del DMQ del año 2009. Borrador*. Quito.
- Secretaría de Ambiente. (2012 b). *Análisis de combustibles del Distrito Metropolitano de Quito. Informe Técnico*.
- Secretaría de Ambiente. (2014). *Datos meteorológicos. Secretaría de Ambiente del DMQ*. Obtenido el 10 de octubre 2014 de <http://190.152.144.75/reportes/Reporte10MinutoGraph.aspx>

- Sher, E. (1998). *Handbook of Air Pollution from Internal Combustion Engines. Pollutant formation and Control* . Academic Press.
- STHV. (2012). *Plan metropolitano de ordenamiento territorial 2012-2022* . Quito: Secretaría de Territorio. Hábitat y Vivienda del Distrito Metropolitano de Quito.
- UC San Diego. (28 de Marzo de 2015). The keeling Curve. *Scripps Institution of Oceanography. UC San Diego*. Obtenido el 28 de Marzo de 2015 de <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/>
- US-EPA. (1996). *Evaluating the Uncertainty of Emission Estimates*. Emission inventory improvement program.
- US-EPA. (1997). *Introduction to the Emission Inventory Improvement Program*. Emission Inventory Improvement Program.
- US-EPA. (1998). *Locating and Estimating Air Emissions from Sources of Benzene*.
- US-EPA. (2008 a). *Transportation And Marketing of Petroleum Liquids*. Emission Inventory Improvement Program.
- US-EPA. (2008 b). *Integrated Science Assessment for Oxides of Nitrogen-Health Criteria*. EPA's Integrated Science Assessments (ISAs).
- US-EPA. (2009). *Integrated Science Assessment for Sulfur Oxides-Health Criteria*. EPA's Integrated Science Assessments (ISAs).
- US-EPA. (2010 a). *Integrated Science Assessment for Carbon Monoxide*. EPA's Integrated Science Assessments (ISAs).
- US-EPA. (2010 b). *Conversion Factors for Hydrocarbon Emission Components*. Assessments and Standards Division.EPA Oficce of transportation and Air Quality.
- US-EPA. (2010 c). *Integrated Science Assessment for Particulate Matter*. EPA's Integrated Science Assessments (ISAs).
- Vallero, D. (2008). *Fundamentals of Air Pollution. Fourth Edition*. Duke University
- Van Aardenne, J. (2002). *Uncertainties in emission inventories*. PhD thesis. Wageniniger University.
- Vega, D., & Parra, R. (2014). Caracterización de la intensidad media diaria y de los perfiles horarios del tráfico vehicular. *Avances en Ciencias e Ingenierias*, C40-C45.

- Viteri, R. (2012). *Estimación de la emisiones de compuestos orgánicos volátiles de la vegetación en el Ecuador*. Quito: Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniera. Universidad San Francisco de Quito.
- Wallace, J., & Hobbs, P. (2006). *Atmospheric Science. An introductory Survey. Second Edition*. University of Washington.
- Wark, K., & Warner, C. (1992). *Contaminación del aire. Origen y control*. Mexico D.F.: LIMUSA.
- Webber, E. (1982). *Air Pollution. Assessment Methodology and Modeling. Vol 2*. New York: Springer Science+Business Media.