



# Energy demand and vehicle emissions estimate in Aburrá Valley from 2000 to 2010 using LEAP model

María Victoria Toro-Gómez <sup>a</sup> & Diana Marcela Quiceno-Rendón <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería Química, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia. victoria.toro@upb.edu.co

<sup>b</sup> Facultad de Ingeniería Química, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia. diana.quiceno@upb.edu.co

Received: February 10th, 2014. Received in revised form: November 19th, 2014. Accepted: December 2th, 2014.

## Abstract

This article shows a retrospective analysis of energy demand and atmospheric pollution by urban transport in Aburrá Valley, where Medellín is the main city. The study was carried out using LEAP model between 2000 and 2010, in order to generate information for defining strategies to help reduce air pollution in Aburrá Valley. The results show that despite the rapid increase of vehicles, the energy demand and CO<sub>2</sub> emissions grew slowly, while criteria pollutant emissions decreased during the last decade. Also, the study shows that during the modeled period trucks were an important source of CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> and PM<sub>2.5</sub>. Motorcycles (2-cycles) were also important contributors to VOC vehicular emissions.

*Keywords:* emission inventory; LEAP model; atmospheric emissions; vehicle fleet; criteria pollutants; CO<sub>2</sub> emissions; Aburrá Valley.

## Estimación de la demanda energética y de las emisiones vehiculares en el Valle de Aburrá durante el periodo 2000-2010, usando el modelo LEAP

### Resumen

Este artículo presenta un análisis retrospectivo de la demanda de energía y las emisiones atmosféricas generadas por el parque automotor del Valle de Aburrá, región que tiene a Medellín como municipio central. El estudio fue desarrollado usando el modelo LEAP y se llevó a cabo para el periodo comprendido entre los años 2000 y 2010, con el objetivo de generar información para la definición de estrategias que contribuyan a disminuir la contaminación atmosférica en la región. Los resultados mostraron que a pesar del crecimiento acelerado del parque automotor, la demanda de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> crecieron lentamente, mientras las emisiones de contaminantes criterio decrecieron durante la última década. Además, se encontró que los camiones hicieron una importante contribución a las emisiones de CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y PM<sub>2.5</sub>, mientras las emisiones de VOC de las motos 2T representaron una proporción considerable de las emisiones totales de dicho contaminante.

*Palabras clave:* inventario de emisiones; modelo LEAP; emisiones atmosféricas; parque automotor; contaminantes criterio; emisiones de CO<sub>2</sub>; Valle de Aburrá.

### 1. Introducción

En los países desarrollados el consumo de energía y el transporte de personas está dominado por el uso del automóvil. Así, a pesar de la mejora en la eficiencia energética de los vehículos, y la desaceleración en la compra y uso de automóviles, el transporte automotor consume aproximadamente el 9% de la energía total en los países miembros de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OECD). En los países en

desarrollo, la proporción es pequeña pero se incrementa rápidamente [1].

En el Valle de Aburrá (subregión que congrega los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Envigado, Itagüí, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Medellín, este último como municipio central), con el aumento en el nivel de ingresos, las facilidades para adquirir vehículo, las deficiencias en el servicio de transporte público y la expansión sin restricciones de los municipios, el número de automóviles y motocicletas ha



crecido cerca del 11% anual en la última década. Dicho incremento se caracteriza por el aumento en las longitudes de viaje y de la densidad de tráfico, lo que genera los consecuentes problemas de congestión, consumo de energía y contaminación atmosférica. El problema de la congestión en Medellín no es un problema reciente, éste ha estado latente en la cotidianidad de la ciudad desde hace varios años, y por esto se han implementado medidas para tratar de mitigar sus efectos sobre la movilidad y el transporte. La administración municipal ha tratado de buscar respuestas a la saturación de las vías, implementando medidas que buscan incrementar la capacidad de éstas con el fin de lograr una mejor situación de la movilidad en la ciudad, por ejemplo, ampliación de carriles, nuevas vías, intercambios viales, etc. [2], sin embargo se ha comprobado empíricamente que la construcción de más vías tiene como consecuencia principal el incremento del tráfico, y no su disminución; un fenómeno conocido como tráfico inducido [3].

Bajo este panorama y teniendo en cuenta la relación energía y ambiente, por primera vez se calcula la demanda de energía y las emisiones atmosféricas del parque automotor del Valle de Aburrá usando el modelo energético LEAP (*Long-range Energy Alternatives Planning System*). Este modelo ha tenido un impacto significativo en políticas energéticas y ambientales a nivel mundial. En California fue usado para pronosticar la demanda de energía e identificar combustibles alternativos; en México se usó para determinar la factibilidad de escenarios futuros teniendo en cuenta el uso moderado y alto de biocombustibles en los sectores del transporte y generación de electricidad; en el Líbano se evaluaron opciones de mitigación con el fin de reducir emisiones en el sector de generación de electricidad con énfasis en el uso de recursos renovables; en Irán se analizó el consumo de energía y varios tipos de emisiones. En lo relacionado con el transporte urbano, en el Valle de Katmandú y en la ciudad de Delhi, se analizaron las emisiones de contaminantes atmosféricos y el uso de energía [4]. En las mega ciudades de Beijing, Shanghai y Guangzhou en China, se evaluó la tendencia de las emisiones vehiculares entre 1995 y 2005 [5]. En Colombia, el modelo LEAP ha sido utilizado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) para la formulación estratégica del plan de uso racional de energía y de fuentes no convencionales de energía [6], por la Universidad Nacional de Colombia que desarrolló el modelo ModerGIS, el cual se basa en los sistemas de información geográfica, en el análisis multicriterio para la toma de decisión y en el modelo LEAP [7]. Sin embargo, en el país no existen publicaciones sobre el uso del modelo LEAP en el análisis del transporte, por lo que este primer acercamiento es de gran importancia.

## 2. Metodología

### 2.1. Modelo LEAP

El modelo LEAP fue desarrollado por el *Stockholm Environment Institute* de Boston (SEI-B), y es un modelo de

simulación del tipo *bottom-up*, que permite el desarrollo de estudios de planeamiento energético integral y de mitigación de gases de efecto invernadero y otros contaminantes del aire [8].

### 2.2. Cálculos

#### 2.2.1. Demanda de energía

La demanda de energía del parque automotor fue calculada a través de la ecuación (1):

$$D = \sum_t (EV_t \times VKT_t \times N_t) \times 10^{-8} \quad (1)$$

Donde  $D$  es la demanda de energía en TJ;  $EV_t$  es la eficiencia energética de la categoría vehicular  $t$  en MJ/100 km;  $VKT_t$  es kilometraje anual recorrido por la categoría vehicular  $t$ , en km; y  $N_t$  es el número de vehículos de la categoría  $t$ . Los valores de  $EV_t$  fueron estimados a través del modelo *International Vehicle Emission* (IVE) [9] para cada tecnología vehicular;  $VKT_t$  fue estimado con hipótesis específicas basadas en las ventas de vehículos usados; y  $N_t$  fue calculado a través de los datos proporcionados por las secretarías de transporte y tránsito del Valle de Aburrá (Fig. 1).

El análisis de la Fig. 1 permite establecer que en la última década el número de vehículos en el Valle de Aburrá creció a una tasa del 9% anual, donde sobresalen especialmente el crecimiento de los taxis y las motos cuatro tiempos (4T) con tasas anuales del 18% y el 26%, respectivamente, mientras el resto de las categorías vehiculares crecieron a una tasa aproximada del 7% anual, a excepción de las motos 2T que decrecieron a una tasa anual del 1%.

Los valores iniciales de las variables  $EV_t$  y  $VKT_t$  son ajustados y validados haciendo que la demanda energética estimada a través del modelo LEAP no difiera en  $\pm 5\%$  de la demanda energética real (ver Fig. 2). Los consumos para la última década de gasolina y diésel fueron proporcionados por la UPME y de Gas Natural Vehicular (GNV) por Empresas Públicas de Medellín.

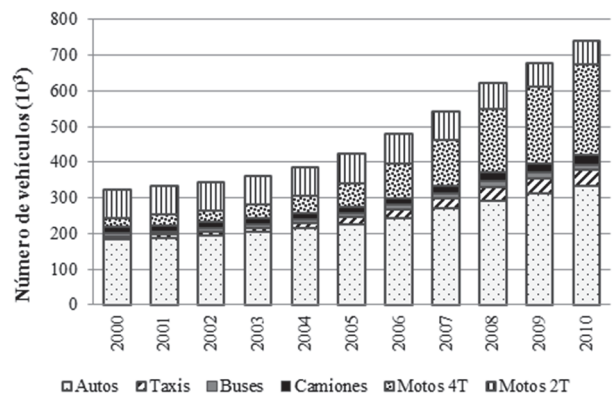


Figura 1. Número de vehículos en el Valle de Aburrá, 2000-2010. Fuente: elaboración propia.

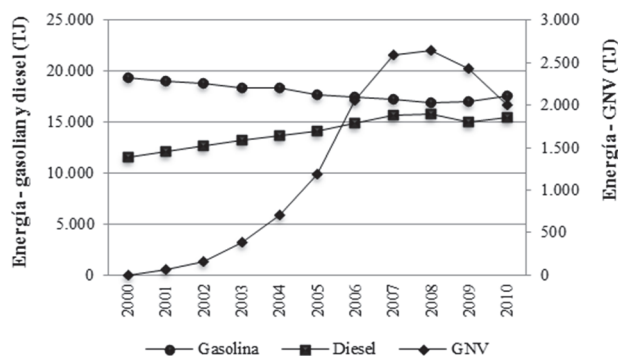


Figura 2. Demanda de energía del parque automotor del Valle de Aburrá, 2000-2010.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Factores de emisión de CO<sub>2</sub>

Combustible	C (%)	PCI (MJ/kg)	FE CO <sub>2</sub> (kg/TJ)
Gasolina	86,5	45,02	70.450,4
Diésel	86,4	43,98	72.034,0
GNV	73,0	47,12	56.804,4

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Factores de emisión de SO<sub>2</sub>

Combustible	Periodo	S (ppm)	FE SO <sub>2</sub>
Gasolina	2000-2010	1000	44,42
	2000-2006	4500	204,62
Diésel	2007	4000	181,88
	2008	3000	136,41
	2009	2500	113,68
	2010	500	22,74
GNV	2000-2010	23	1,15

Fuente: elaboración propia.

### 2.2.2. Emisiones de CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>

Las emisiones vehiculares de CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> se calcularon usando la ecuación (2):

$$E_j = \sum_t (FE_{j,t} \times EV_t \times VKT_t \times N_t) \times 10^{-11} \quad (2)$$

Donde  $E_j$  son las emisiones del contaminante  $j$  (CO<sub>2</sub> o SO<sub>2</sub>) en Mg, y  $FE_{j,t}$  es el factor de emisión del contaminante  $j$  para la categoría vehicular  $t$ , en kg/TJ. Los factores de emisión CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> fueron calculados de acuerdo al contenido de carbono y azufre en el combustible, y se presentan en la Tabla 1 y Tabla 2 respectivamente.

### 2.2.3. Emisiones de contaminantes criterio

Las emisiones vehiculares para cada uno de los contaminantes criterio considerados fueron calculadas a través de la ecuación (3):

$$E_i = \sum_t (FE_{t,i} \times VKT_t \times N_t) \times 10^{-6} \quad (3)$$

Donde  $E_i$  representa la emisión anual del contaminantes

$i$  en Mg; y  $FE_{t,i}$  es el factor de emisión del contaminante  $i$  para la categoría vehicular  $t$ , en g/km.

$FE_{t,i}$  fue estimado usando el modelo IVE para lo cual fue necesario desarrollar un calendario de introducción de tecnologías vehiculares y de desulfurización de combustibles en Colombia (ver Tabla 3). Además los factores de emisión fueron corregidos de acuerdo a las condiciones de humedad, altura, contenido de azufre en la gasolina y el diésel, y contenido de etanol en la gasolina de 10% V/V. Aunque el diésel también se encuentra mezclado con aceite de palma (10% V/V), no se hace corrección de los factores de emisión pues el modelo IVE no dispone de factores de corrección para este tipo de mezcla. En la Tabla 4 se presenta algunos de los factores de emisión utilizados en este estudio.

## 3. Resultados

### 3.1. Evolución de la demanda energética

La Fig. 3 presenta la evolución de la demanda de combustibles ligada al crecimiento vehicular en el Valle de Aburrá.

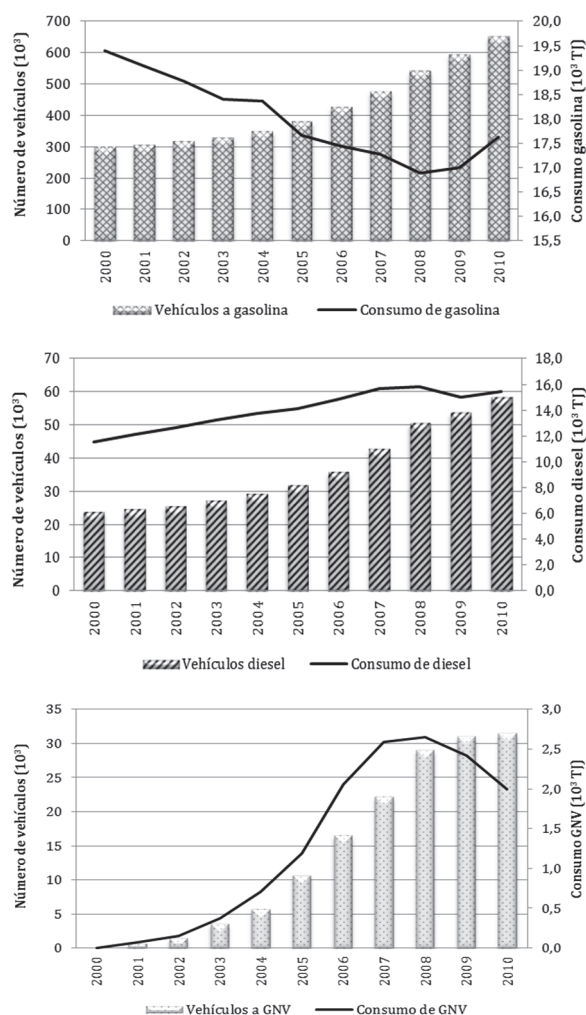


Figura 3. Evolución de la demanda de combustibles y el parque automotor en el Valle de Aburrá, 2000-2010.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Calendario de introducción de tecnologías vehiculares y contenido de azufre en el combustible en Colombia.

Combustible	Tecnología/contenido de azufre	1990 y antes	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
		Gasolina	Control de emisiones por el tubo de escape	Ninguno									Catalizador de 2 ó 3 vías										Euro 2	Euro 3			
Dispositivo para la mezcla aire/combustible	Carburador			SPFI						MPFI																	
S (ppm) – Colombia	1000																			300		150					
S (ppm) – Bogotá																											
S (ppm) – Medellín																											
Diésel	Control de emisiones por el tubo de escape	Pre Euro																	Euro 2			Euro 4					
	Dispositivo para la mezcla aire/combustible	Inyección en pre-cámara									Inyección directa																
	S (ppm) - Colombia	4500									4000			3000			2500			500			50				
	S (ppm) - Bogotá	4500									1200			500			50										
S (ppm) - Medellín	4500									4000			3000			2500			500			50					

SPFI: Inyección de combustible monopunto (*Single Point Fuel Injection*). MPFI: Inyección de combustible multipunto (*Multi Point Fuel Injection*).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Factores de emisión del modelo IVE para algunas tecnologías vehiculares del Valle de Aburrá (g/km).

Descripción	Combustible	Peso	Control aire/combustible	Control de emisiones		VOC	CO	NO <sub>x</sub>	PM2.5
				Tubo de escape	Evaporativas				
Auto	Gasolina	Ligero	MPFI	3-vías	PCV	0,065	1,120	0,264	0,003
Auto	GNV Reconvertido	Pesado	Carburador	Ninguno	PCV	0,317	42,535	2,452	0,002
Moto	Gasolina	Ligero	2 tiempos	Ninguno	Ninguno	7,998	17,991	0,023	0,180
Moto	Gasolina	Mediano	4 tiempos, carburador	Alta tecnología	Ninguno	0,955	4,381	0,128	0,063
Bus/Camión	Gasolina	Ligero	FI	3-vías	PCV	0,274	5,748	0,219	0,033
Bus/Camión	Diésel	Mediano	FI	Euro 2	Ninguno	0,571	2,101	5,050	0,077
Bus/Camión	GNV	Mediano	FI	3-vías/EGR	PCV	0,019	4,671	0,173	0,002

MPFI: Inyección de combustible multipunto (*multi point fuel injection*). FI: Inyección de combustible (*fuel injection*). PCV: Válvula de ventilación positiva (*positive crankcase ventilation*).

Fuente: elaboración propia.

En relación con la gasolina, a pesar del crecimiento sostenido de los vehículos que usan este combustible, el consumo de gasolina presentó una disminución continuada entre el año 2000 y el 2008, y solo en el año 2009 comenzó a recuperarse nuevamente. Las causas de ésta disminución sostenida pueden atribuirse a la competencia del gas natural como combustible vehicular, a las medidas de restricción vehicular (pico y placa) que influyen directamente sobre el kilometraje recorrido y por ende el consumo de combustible, al aumento continuo en el precio de la gasolina, y a las crisis económicas mundiales que desaceleraron la economía nacional. También hay que considerar que las nuevas tecnologías vehiculares traen consigo el aumento en el rendimiento del combustible (km/gal). En el caso de los vehículos diésel y el consumo de este combustible, su demanda ha sido proporcional al crecimiento de los vehículos que usan éste combustible fósil, con una leve desaceleración en el año 2009. Y en cuanto al GNV, tanto el crecimiento de los vehículos a GNV como su consumo presentaron un crecimiento exponencial que se ve interrumpido en el año 2009, debido quizá a algunas técnicas de reconversión vehicular que ocasionaron problemas en los usuarios e hicieron que algunos volvieran a la gasolina. En general, la demanda de energía total durante los años 2000 a 2010 creció a una tasa del 1,2% anual.

### 3.2. Evolución de la emisión de contaminantes

La Fig. 4 presenta la evolución de las emisiones vehiculares de contaminantes criterio y dióxido de carbono en el Valle de Aburrá, durante los años 2000 a 2010. En ella se observa un decrecimiento de las emisiones de contaminantes criterio a pesar del crecimiento del parque automotor y de los VKT totales, que pasaron de ser  $6,03 \times 10^9$  km en el año 2000 a  $9,61 \times 10^9$  km en el año 2010, creciendo a una tasa anual del 4,8%. Mientras tanto las emisiones de CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, VOC y PM2.5 decrecieron a tasas del 4,3%, 2,4%, 9,7%, 5,3% y 2,2% respectivamente, lo que se atribuye a la introducción de mejores tecnologías vehiculares y a la desulfurización del diésel, que pasó de contener 4.500 ppm S en el año 2000 a 50 ppm S en el año 2010. [La reducción en la emisión de contaminantes criterio coincide con la mejora de la calidad del aire en el Valle de Aburrá [10], y es importante resaltar el esfuerzo y compromiso de la administración municipal y la autoridad ambiental por mejorar la calidad de los combustibles en la región [11]. Durante el periodo de reducción de azufre del diésel en la región, Gómez et al demostraron el vínculo entre el contenido de azufre en el diésel y la composición y concentraciones de PM2.5, lo que demuestra la gran influencia de los vehículos diésel en la calidad del aire local y la importancia de la desulfurización de los combustibles; el impacto fue bastante claro, pues mostró en la composición

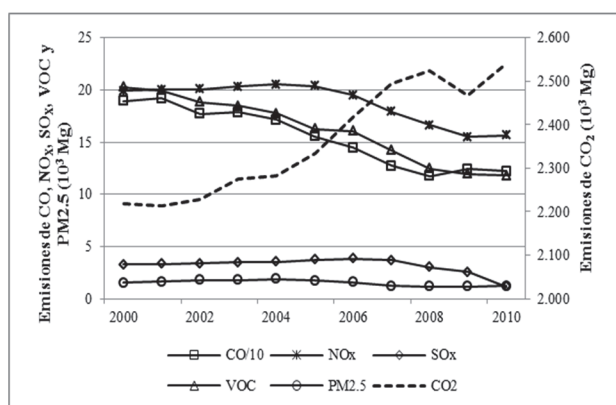


Figura 4. Evolución de emisiones vehiculares en el Valle de Aburrá, 2000-2010.

Fuente: elaboración propia

química del PM2.5 una significativa disminución de sales de sulfato y nitrato [12].

En cuanto al CO<sub>2</sub> sus emisiones crecieron al 1,4% anual, una tasa baja si se considera el crecimiento del parque y de los VKT totales. Este crecimiento desacelerado se atribuye al mejoramiento en la eficiencia energética de los vehículos.

### 3.3. Emisión de contaminantes por tipo de combustible y categoría vehicular

La Fig. 5 muestra la contribución por tipo de combustible y por categoría vehicular a la emisión de cada uno de los contaminantes considerados en este estudio. El análisis por tipo de combustible permite ver que la gasolina es la gran responsable de las emisiones de CO y VOC, y en los últimos años del periodo analizado pasó a emitir la mayor proporción de SO<sub>x</sub> pues su contenido de azufre permaneció constante a lo largo del periodo (1.000 ppm S). El diésel se desulfuró rápidamente en la última década, por lo que su aporte a las emisiones de SO<sub>x</sub> fue disminuyendo, pero se mantuvo como el principal responsable de las emisiones de NO<sub>x</sub> y PM2.5. El GNV hizo su mayor contribución a las emisiones de CO, donde ha ido desplazando lentamente las emisiones de la gasolina. Por su parte, a las emisiones de CO<sub>2</sub> aportaron la gasolina con un promedio del 54%, el diésel con un 43% aproximadamente y el GNV apenas contribuyó con el 3%, pues este último apenas comenzó a posicionarse como un combustible alternativo a los combustibles fósiles tradicionales.

Los resultados por categoría vehicular, muestran que a las emisiones de CO contribuyen los autos y los camiones de manera significativa, pues a lo largo del periodo estudiado aportaron aproximadamente el 79% de las emisiones de este contaminante; así, mientras los autos aportaron aproximadamente el 32% en promedio, los camiones contribuyeron con el 47% restante. Cabe anotar que los camiones cuentan con un número importante de vehículos que operan con gasolina y su VKT promedio de 42.000 km/año-veh, es bastante más alto que el promedio estimado para los autos en la última década, que fue alrededor de 20.000 km/año-veh. También sobresalen las motos 4T, que al inicio

del periodo aportaban tan solo el 1% de las emisiones de CO y al finalizar la década estaban aportando el 9%, lo que representó un incremento del 25% anual.

El análisis de las emisiones de NO<sub>x</sub> para el periodo 2000-2010 mostró que sus principales aportantes son las categorías buses y camiones, que contribuyeron con el 77%, primando las emisiones de los camiones que aportaron en promedio el 51% mientras los buses emitieron alrededor del 26%.

El comportamiento de las emisiones de SO<sub>x</sub> fue muy similar al de los NO<sub>x</sub>, por lo menos hasta el 2009, pues para el 2010 bajó drásticamente el contenido de azufre en el diésel pasando de 2.500 ppm S a 500 ppm S, lo que representa una reducción del 80%. De este modo, hasta el año 2009 el aporte promedio de los buses y camiones fue del 75%, pero en el 2010 su aporte pasó a ser de tan solo el 31%.

Como puede verse en la Fig. 5, los camiones y motos 2T hacen una importante contribución a las emisiones de VOC, y en el transcurso de la última década aportaron en promedio el 59% de las emisiones de este contaminante. Las emisiones generadas por los camiones, al igual que las de CO, son generadas principalmente por los vehículos que utilizan gasolina como combustible, y en promedio fueron alrededor del 33%. Las emisiones de las motos 2T a lo largo de la década representaron el 26% en promedio, a pesar del pequeño número que constituyen dentro del parque, pues eran el 25% de la flota en el año 2000, pero tan solo el 9% en el año 2010.

Las emisiones del contaminante PM2.5 se encuentran claramente dominadas por los camiones, que emitieron en promedio el 74% de las emisiones de dicho contaminante. Así, mientras en el año 2000 emitían el 80% de sus emisiones, para el año 2010 pasaron a emitir el 68%, lo que indica que su aporte decreció a una tasa anual del 1,6% en la década de estudio. También sobresale en la Fig. 5, el aporte de las motos 2T y 4T, cuyo aporte pasó del 9% en el primer año al 16% en el último año de la década analizada, lo que representa una tasa anual de crecimiento del 6% en el aporte a las emisiones de PM2.5.

Los autos y los camiones son las principales fuentes de CO<sub>2</sub>, pues como puede observarse en la Fig. 5 contribuyeron en promedio con el 70% de las emisiones de este gas de efecto invernadero, mientras los buses aportaron cerca del 17%.

El Plan de descontaminación del aire para la región metropolitana del Valle de Aburrá, diagnosticó que las concentraciones ambientales de PM2.5 en el área urbana superaban ampliamente las referencias de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y que los altos niveles de radiación solar y emisión de gases precursores (NO<sub>x</sub> y VOC) propiciaban las condiciones adecuadas para la formación de O<sub>3</sub> troposférico, por lo que se presentaban frecuentes superaciones de la norma horaria y octohoraria de este contaminante [13]. Por ello, el control de las emisiones vehiculares deberá enfocarse principalmente en los camiones, que como pudo verse en este estudio, dominan gran parte de las emisiones de PM2.5 y gases precursores de O<sub>3</sub>, sin olvidar a las motos de 2T y 4T que también se posicionaron como fuentes importantes de VOC.

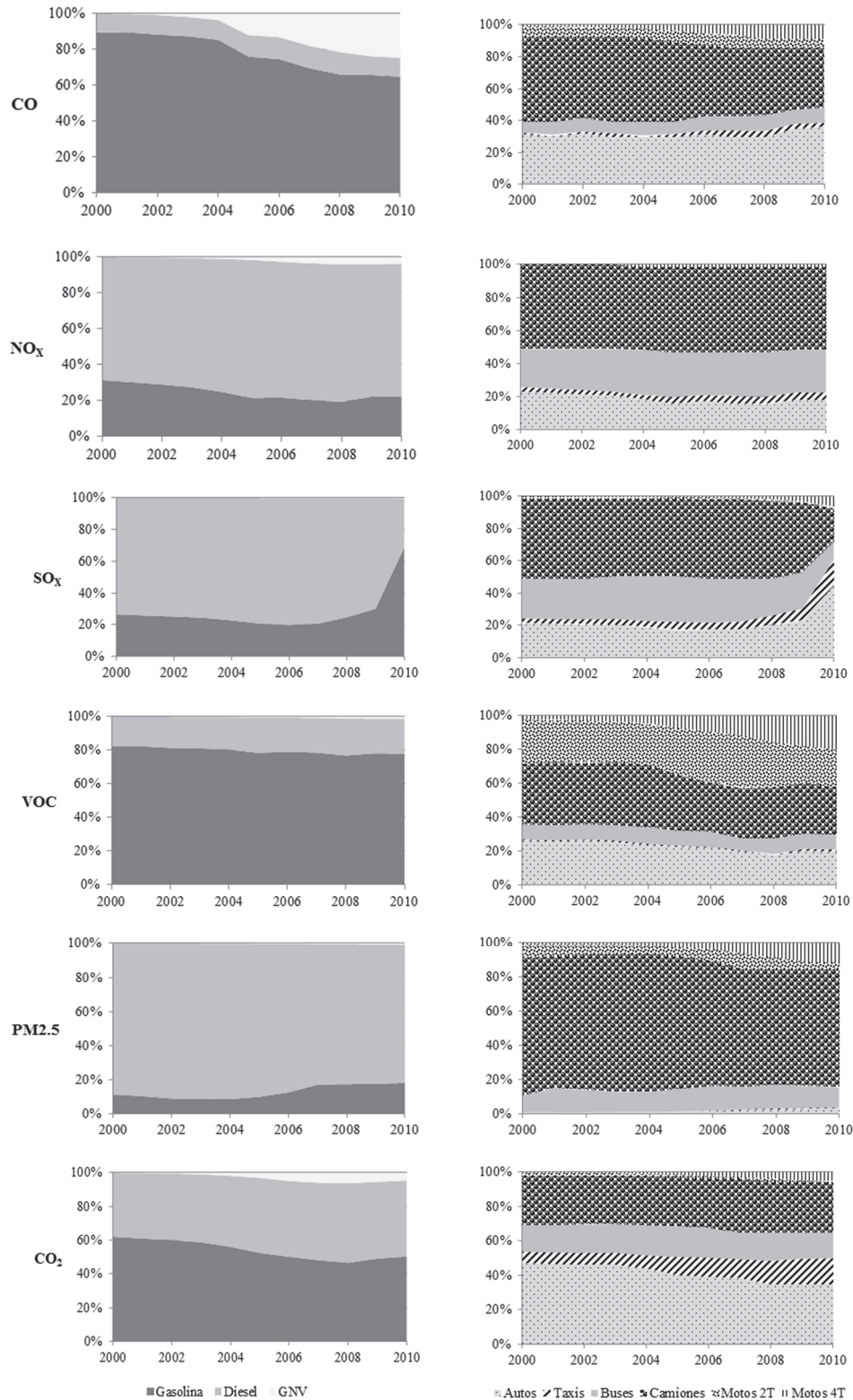


Figura 5. Distribución de emisiones de acuerdo al tipo de combustibles y a las categorías vehiculares, 2000-2010. Fuente: elaboración propia.

#### 4. Conclusiones

El estudio de la evolución de la demanda energética y de la emisión de contaminantes criterio a través del modelo LEAP

permitió determinar que en el Valle de Aburrá el parque automotor ha crecido a una tasa del 9% anual, en el cual sobresale el crecimiento de las motos 4T y los taxis, que crecieron a una tasa anual del 26% y el 18% respectivamente.

La demanda de energía también creció a lo largo del periodo de estudio, aunque a una tasa más baja que la del parque automotor, situándose alrededor del 1%.

En relación con la emisión de contaminantes criterio, su tasa de crecimiento fue negativa, y se encontró una disminución en la emisión de este tipo de contaminantes relacionada con la desulfurización del combustible diésel y la introducción de mejores tecnologías vehiculares, que a su vez conllevan factores de emisión más bajos y mejores rendimientos de combustible; además en el periodo estudiado apareció el GNV para diversificar la canasta de combustibles del parque automotor. También es importante resaltar la contribución a las emisiones de CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y PM<sub>2.5</sub> de la categoría camiones, y el aporte de las motos de 2T y 4T a las emisiones de VOC.

### Agradecimientos

Este trabajo fue desarrollado en el marco del Convenio 243 de 2012 con el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Además, se ejecutó gracias al apoyo del proyecto *South American Emissions, Megacities and Climate* (SAEMC). También queremos agradecer a la UPME, a Empresas Públicas de Medellín y a las secretarías de transporte y tránsito del Valle de Aburrá por el suministro de información sin el que no hubiese sido posible la elaboración de este trabajo.

### Referencias

- [1] Schipper, L., Automobile use, fuel economy and CO<sub>2</sub> emissions in industrialized countries: Encouraging trends through 2008? *Transport Policy*, 18, pp. 358-372, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.10.011>
- [2] Posada, J.J., Farbiar, V. and González, C.A., Análisis del “pico y placa” como restricción a la circulación vehicular en Medellín - basado en volúmenes vehiculares. *DYNA*, 78, (165) pp. 112-121, 2011.
- [3] Litman, T., Generated Traffic; implications for Transport Planning. *ITE Journal*, 71, pp. 38-47, 2001.
- [4] Shabbir, R. and Ahmad, S.S., Monitoring urban transport air pollution and energy demand in Rawalpindi and Islamabad using leap model. *Energy*, 35, pp. 2323-2332, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.025>
- [5] Wang, H., Fu, L., Zhou, Y., Du, X. and Ge, W., Trends in vehicular emissions in China's mega cities from 1995 to 2005. *Environmental Pollution*, 158, pp. 394-400, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2009.09.002>
- [6] Unidad de Planeación Minero Energética y Consorcio Bariloche. Consultoría para la formulación estratégica del plan de uso racional de energía y de fuentes no convencionales de energía 2007-2025. Bogotá. 2007.
- [7] Quijano, R., Botero, S. and Domínguez, J., MODERGIS application: Integrated simulation platform to promote and develop renewable sustainable energy plans, Colombian case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (7), pp. 5176-5187, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.006>
- [8] Heaps, C.G., Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) system. [Software version 2012.0017]. Stockholm Environment Institute. Somerville, MA, USA. 2012.
- [9] Davis, N., Lents, J., Osses, M., Nikkila, N. and Bart, M., Development and application of an international vehicle emissions model. *Transportation Research Board 81st Annual Meeting*, pp. 1-20, 2005.
- [10] Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Monitoreo de la calidad del aire en el Valle de Aburrá [online], Medellín. [Dato de consulta enero 13 de 2014] Disponible en: [http://www.aredigital.gov.co/CalidadAire/Paginas/resumen\\_calidadaire.aspx](http://www.aredigital.gov.co/CalidadAire/Paginas/resumen_calidadaire.aspx).
- [11] Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Acciones en el pacto por la calidad del aire [online], Medellín. [Dato de consulta enero 13 de 2014]. Disponible en:

[http://www.metro-pol.gov.co/aire/compartidos/docs/avances\\_en\\_el\\_desarrollo\\_del\\_pacto\\_por\\_la\\_calidad\\_del\\_aire.pdf](http://www.metro-pol.gov.co/aire/compartidos/docs/avances_en_el_desarrollo_del_pacto_por_la_calidad_del_aire.pdf)

- [12] Posada, E. and Gómez, M., The effect of the diesel fuel sulfur content on the PM<sub>2.5</sub> pollution problem in the Aburrá Valley region around Medellín, Colombia. *Transport related Air Pollution and Health impacts – Integrated methodologies for Assessing Particulate Matter (TRANSPHORM)*, pp. 18-21, 2010.
- [13] Toro, M.V., Molina, E., Serna, J.A., Fernández, M. y Ramírez, G.E., Plan de descontaminación del aire en la región metropolitana del Valle de Aburrá. *Producción + Limpia*, 5 (1), pp. 10-26. Medellín. 2010.

**M.V. Toro-Gómez**, es Ingeniera Química de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, MSc. en Contaminación Ambiental de la Universidad Politécnica de Madrid, España y Ph.D. en Ingeniería de la Universidad Politécnica de Cataluña, España. Desde el año 1991 ha trabajado en la Universidad Pontificia Bolivariana, actualmente se desempeña como Coordinadora Científica del Grupo de Investigaciones Ambientales de esta institución. También se ha desempeñado como docente en la Facultad de Ingenierías y como directora de los programas de posgrado de Ciencias del Medio Ambiente de esta Universidad. Ha sido becaria de institutos como ICI (Instituto de Cooperación Iberoamericana), el JICA (Agencia de Cooperación Internacional del Japón) y el INPE (Instituto de Pesquisas Espaciales de Brasil).

**D.M. Quiceno-Rendón**, es Ingeniera Química de la Universidad de Antioquia, Colombia y Especialista en Ingeniería Ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia. En el año 2007 comenzó su ejercicio profesional con el Área Metropolitana del Valle de Aburrá; allí llevó a cabo actividades de control y vigilancia sobre fuentes fijas industriales asentadas en el Valle de Aburrá. En el año 2008 le fue otorgada una beca de la Agencia Sueca para el Desarrollo Internacional (ASDI), para realizar el Programa de Entrenamiento Internacional Avanzado *Air Pollution Management* en Norrköping, Suecia. En el año 2009 inició labores con el Grupo de Investigaciones Ambientales de la Universidad Pontificia Bolivariana donde continúa trabajando en actividades enmarcadas en el desarrollo y actualización del inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Medio Ambiente

Oferta de Posgrados

Especialización en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos  
Especialización en Gestión Ambiental  
Maestría en Ingeniería Recursos Hidráulicos  
Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo  
Doctorado en Ingeniería - Recursos Hidráulicos  
Doctorado Interinstitucional en Ciencias del Mar

Mayor información:

E-mail: [acia\\_med@unal.edu.co](mailto:acia_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 5105