

Un proyecto de



PURA VIDA

Inventario de **emisiones atmosféricas** del Valle de Aburrá, año base 2011



**Universidad
Pontificia
Bolivariana**

Un proyecto de



Inventario de **emisiones atmosféricas** del Valle de Aburrá, año base 2011

363.7392
U58

Universidad Pontificia Bolivariana. Cidi. Grupo de Investigaciones Ambientales
Inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá, año base 2011
[Formato digital] / Grupo de Investigaciones Ambientales -- Medellín: UPB, 2014.
1 PDF de 153 p.
ISBN: 978-958-764-150-9

1. Contaminación ambiental– 2. Emisiones atmosféricas – 3. Área Metropolitana
del Valle de Aburrá (Antioquia, Colombia) – 4. Transporte automotor – 5. Efecto
invernadero – I. Tit.

© Grupo de Investigaciones Ambientales, Universidad Pontificia Bolivariana
María Victoria Toro Gómez - Diana Marcela Quiceno Rendón
© Área Metropolitana del Valle de Aburrá
© Editorial Universidad Pontificia Bolivariana

Inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá

Un proyecto del Área Metropolitana del Valle de Aburrá
ISBN: 978-958-764-150-9
Primera edición, 2013

Carlos Mario Montoya Serna, **Director**
Gloria Amparo Alzate Agudelo, **Subdirectora Ambiental**

Interventoría,

Gloria Estela Ramírez Casas, Profesional universitaria
Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Gran Canciller UPB y Arzobispo de Medellín: Mons. Ricardo Tobón Restrepo

Rector General: Pbro. Julio Jairo Ceballos Sepúlveda

Vicerrector Académico: Pbro. Jorge Iván Ramírez Aguirre

Editor: Juan José García Posada

Coordinadora de Producción: Ana Milena Gómez C.

Diseño y Diagramación: Ana Mercedes Ruiz M.

Corrector de estilo: César Alejandro Buriticá Arbeláez

Dirección editorial:

Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 2014
Email: editorial@upb.edu.co
www.upb.edu.co
Telefax: (57)(4) 354 4565
A.A. 56006 - Medellín - Colombia

Radicado: 1167-18-09-13

Prohibida la reproducción total o parcial, en cualquier medio o para cualquier propósito,
sin la autorización escrita de la Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.

Contenido

Introducción.....	15
Antecedentes.....	17
1. Objetivos.....	19
1.1 Objetivo general	19
1.2 Objetivos específicos.....	19
2. Marco teórico.....	21
2.1 Aspectos generales del Valle de Aburrá.....	24
2.1.1 Variables demográficas.....	24
2.1.2 Variables económicas	26
2.1.3 Variables energéticas	28
3. Fuentes móviles.....	33
3.1 Metodología	35
3.1.1 Variables de entrada del modelo LEAP.....	36
3.1.2 Cálculos para el análisis del transporte automotor.....	38
3.2 Datos de entrada	40
3.2.1 Existencias y ventas de vehículos.....	40

3.2.2	Existencias y ventas de vehículos de acuerdo con los rangos de cilindraje y al tipo de combustible utilizado.....	40
3.2.3	Perfil de antigüedad de los vehículos existentes (Stock vintage profile)	43
3.2.4	Perfil de supervivencia de los vehículos nuevos (Survival profile).....	45
3.2.5	Kilometraje.....	47
3.2.6	Rendimiento de combustible	50
3.2.7	Factores de emisión	52
3.3	Resultados.....	56
3.3.1	Demanda energética del parque automotor.....	56
3.3.2	Composición del parque automotor y emisión de contaminantes criterio	58
3.3.2.1	<i>Autos</i>	62
3.3.2.2	<i>Taxis</i>	64
3.3.2.3	<i>Buses</i>	66
3.3.2.4	<i>Camiones</i>	68
3.3.2.5	<i>Motos</i>	70
3.3.3	Emisiones de gases de efecto invernadero, GEI.....	74
3.4	Análisis retrospectivo de emisiones.....	78
3.4.1	Datos de entrada para el modelo LEAP	79
3.4.2	Resultados.....	80
3.4.2.1	<i>Evolución del parque automotor</i>	80
3.4.2.2	<i>Evolución de la demanda energética</i>	82
3.4.2.3	<i>Evolución de las emisiones de contaminantes criterio</i>	86
3.4.2.4	<i>Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero</i>	91
4.	Fuentes fijas	95
4.1	Metodología	96
4.2	Resultados.....	102
4.2.1	Demanda energética.....	107
4.2.2	Emisión de contaminantes criterio.....	112
4.2.3	Emisión de gases de efecto invernadero	120

5. Inventario de emisiones del Valle de Aburrá, año 2011	127
5.1 Demanda energética.....	127
5.1 Emisión de contaminantes criterio.....	129
5.3 Emisión de gases de efecto invernadero.....	130
Conclusiones	133
Bibliografía	143
Anexos	147
Anexo A – Emisiones de contaminantes criterio, periodo 2000-2011	
Anexo B – Emisiones de gases de efecto invernadero, periodo 2000-2011	

Índice de tablas

Tabla 3.1. Estructura metodológica del parque automotor del Valle de Aburrá en LEAP	35
Tabla 3.2. Existencias y ventas de automóviles en el Valle de Aburrá para el año 2011	40
Tabla 3.3. Distribución porcentual por tipo de vehículo, rangos de cilindradas y tipo de combustible, año 2011	41
Tabla 3.4. Condiciones para los factores de emisión base	53
Tabla 3.5. Factores de corrección disponibles para los factores de emisión base	53
Tabla 3.6. Calendario de introducción de tecnologías vehiculares y contenido de azufre en el combustible en Colombia	54
Tabla 3.7. Factores de emisión de CO ₂ y SO ₂	55
Tabla 3.8. Emisión de contaminantes criterio por categoría vehicular (Mg), año 2011	60
Tabla 3.9. Emisión de contaminantes criterio por tipo de combustible (Mg), año 2011	61
Tabla 3.10. Emisión de contaminantes criterio de la categoría autos (Mg), año 2011	63
Tabla 3.11. Emisión de contaminantes criterio de la categoría taxis (Mg), año 2011	65
Tabla 3.12. Emisión de contaminantes criterio de la categoría buses (Mg), año 2011	67
Tabla 3.13. Emisión de contaminantes criterio de la categoría camiones (Mg), año 2011	69

Tabla 3.14. Emisión de contaminantes criterio de la categoría motos (Mg), año 2011	71
Tabla 3.15. Emisión de contaminantes criterio clasificadas de acuerdo a la categoría, el cilindraje y el tipo de combustible (Mg), año 2011.....	73
Tabla 3.16. Potenciales de calentamiento global.....	74
Tabla 3.17. Emisión de GEI por tipo de combustible (Mg), año 2011.....	75
Tabla 3.18. Emisión de GEI por categoría vehicular (Mg), año 2011.....	76
Tabla 3.19. Emisión de gases de efecto invernadero clasificadas de acuerdo a la categoría, el cilindraje y el tipo de combustible (Mg), año 2011.....	77
Tabla 3.20. Kilometraje total anual recorrido por el parque automotor del Valle de Aburrá.....	79
Tabla 3.21. Factores de emisión de SO ₂ en el periodo 2000-2010.....	80
Tabla 3.22. Parque automotor del Valle de Aburrá, periodo 2000-2011.....	81
Tabla 3.23. Tasa de motorización en algunas ciudades de Latinoamérica.....	82
Tabla 3.24. Consumo de combustible en el Valle de Aburrá, periodo 2000-2011.....	83
Tabla 4.1. Actividades productivas susceptibles de tener descargas atmosféricas en el Valle de Aburrá	99
Tabla 4.2. Equipos o procesos generadores de emisiones en el Valle de Aburrá.....	100
Tabla 4.3. Poderes caloríficos de los combustibles usados por fuentes fijas en el Valle de Aburrá.....	102
Tabla 4.4. Demanda energética de las fuentes industriales del Valle de Aburrá, año 2011.....	107
Tabla 4.5. Emisiones de contaminantes criterio por actividad productiva (Mg), año 2011.....	113
Tabla 4.6. Emisiones de contaminantes criterio por tipo de combustible (Mg), año 2011.....	117
Tabla 4.7. Emisiones de gases de efecto invernadero por actividad productiva (Mg), año 2011	121
Tabla 4.8. Emisiones de gases de efecto invernadero por tipo de combustible (Mg), año 2011.....	123
Tabla 5.1. Demanda de energía de acuerdo al tipo de fuente (Mg), año 2011	128
Tabla 5.2. Emisiones de contaminantes criterio de acuerdo al tipo de fuente (Mg), año 2011.....	129
Tabla 5.3. Emisiones de gases de efecto invernadero por tipo de fuente (Mg), año 2011.....	131

Índice de figuras

Figura 2.1. Dominios del modelo MODEAM.....	23
Figura 2.2. Valle de Aburrá y sus municipios.....	25
Figura 2.3. Contribución del Valle de Aburrá al valor agregado nacional, año 2003	27
Figura 2.4. Contribución del Valle de Aburrá al valor agregado nacional, año 2005	27
Figura 2.5. Consumo de energía eléctrica en el Valle de Aburrá, 2000-2010	29
Figura 2.6. Consumo de gas natural en el Valle de Aburrá	29
Figura 2.7. Consumo de gasolina y diesel en el Valle de Aburrá, 2003-2011	30
Figura 2.8. Consumo de gas natural vehicular (GNV) en el Valle de Aburrá, 2001-2011	31
Figura 3.1. Algunas de las tecnologías de conversión de energía.....	36
Figura 3.2. Perfiles de antigüedad de algunas tecnologías.....	44
Figura 3.3. Perfiles de supervivencia de algunas tecnologías.....	46
Figura 3.4. Distancia anual promedio ponderada en el primer año de vida del vehículo, año 2011.....	48
Figura 3.5. Perfiles de degradación del kilometraje anual.....	50

Figura 3.6. Rendimiento promedio ponderado del combustible, año 2011.....	51
Figura 3.7. Balance energético real y estimado, año 2011.....	56
Figura 3.8. Demanda de energía por categoría vehicular, año 2011	57
Figura 3.9. Demanda energética por categoría vehicular y por tamaño, año 2011	58
Figura 3.10. Distribución del parque automotor del Valle de Aburrá, año 2011	59
Figura 3.11. Distribución de emisiones por categoría vehicular, año 2011.....	60
Figura 3.12. Distribución de emisiones por tipo de combustible, año 2011.....	61
Figura 3.13. Distribución de la categoría autos, año 2011.....	63
Figura 3.14. Distribución de emisiones de la categoría autos, año 2011.....	64
Figura 3.15. Distribución de la categoría taxis, año 2011.....	65
Figura 3.16. Distribución de emisiones de la categoría taxis, año 2011.....	66
Figura 3.17. Distribución de la categoría buses, año 2011	67
Figura 3.18. Distribución de emisiones de la categoría buses, año 2011.....	68
Figura 3.19. Distribución de la categoría camiones, año 2011.....	69
Figura 3.20. Distribución de emisiones de la categoría camiones, año 2011.....	70
Figura 3.21. Distribución de la categoría motos, año 2011	71
Figura 3.22. Distribución de emisiones de la categoría motos, año 2011.....	72
Figura 3.23. Distribución de emisiones de GEI por tipo de combustible, año 2011	75
Figura 3.24. Distribución de emisiones de GEI por categoría vehicular, año 2011.....	76
Figura 3.25. Crecimiento del parque automotor, periodo 2000-2011.....	81
Figura 3.26. Evolución del número de vehículos a gasolina y demanda energética de gasolina.....	85
Figura 3.27. Evolución del número de vehículos diesel y demanda energética de diesel.....	86
Figura 3.28. Evolución del número de vehículos a GNV y demanda energética de GNV	87
Figura 3.29. Evolución de las emisiones de monóxido de carbono (CO).....	87

Figura 3.30. Evolución de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO _x).....	88
Figura 3.31. Evolución de las emisiones de óxidos de azufre (SO _x)	89
Figura 3.32. Evolución de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (VOC).....	90
Figura 3.33. Evolución de las emisiones de material particulado fino (PM _{2,5}).....	90
Figura 3.34. Evolución de las emisiones de dióxido de carbono (CO ₂).....	92
Figura 3.35. Evolución de las emisiones de metano (CH ₄).....	92
Figura 3.36. Evolución de las emisiones de óxido nitroso (N ₂ O).....	93
Figura 4.1. Actividades realizadas para la elaboración del inventario de fuentes fijas.....	97
Figura 4.2. Empresas y fuentes fijas de emisión por municipio.....	103
Figura 4.3. Empresas y fuentes fijas de emisión por actividad productiva	104
Figura 4.4. Equipos o procesos generadores de emisiones	105
Figura 4.5. Distribución de fuentes con y sin emisiones calculadas.....	106
Figura 4.6. Demanda de energía y número de fuentes.....	108
Figura 4.7. Distribución de la demanda energética de las fuentes fijas del Valle de Aburrá, año 2011.....	109
Figura 4.8. Distribución de la demanda energética por actividad productiva	110
Figura 4.9. Evolución en el uso de combustibles.....	111
Figura 4.10. Evolución en la demanda de energía	111
Figura 4.11. Distribución de emisiones de contaminantes criterio de acuerdo a la actividad productiva.....	114
Figura 4.12. Composición de las fuentes y emisiones en el sector Textil y confección (TXT).....	115
Figura 4.13. Composición de las fuentes y emisiones en el sector Bebidas, Alimentos y Tabaco (BAT)	116
Figura 4.14. Composición de las fuentes y emisiones en el sector Cerámicos y Vítreos (CVL).....	117
Figura 4.15. Distribución de emisiones de contaminantes criterio de acuerdo al tipo de combustible.....	118
Figura 4.16. Evolución de las emisiones de contaminantes criterio, años 2009 y 2011.....	119
Figura 4.17. Distribución de emisiones de gases de efecto invernadero de acuerdo a la actividad productiva	122
Figura 4.18. Composición de las emisiones de gases de efecto invernadero en los sectores TXT, CVL y BAT.....	123

Figura 4.19. Distribución de emisiones de gases de efecto invernadero de acuerdo al tipo de combustible.....	124
Figura 4.20. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero, años 2009 y 2011	125
Figura 5.1. Distribución de la demanda energética.....	129
Figura 5.2. Distribución de emisiones de contaminantes criterio de acuerdo al tipo de fuente	130
Figura 5.3. Distribución de emisiones de gases de efecto invernadero de acuerdo al tipo de fuente	131



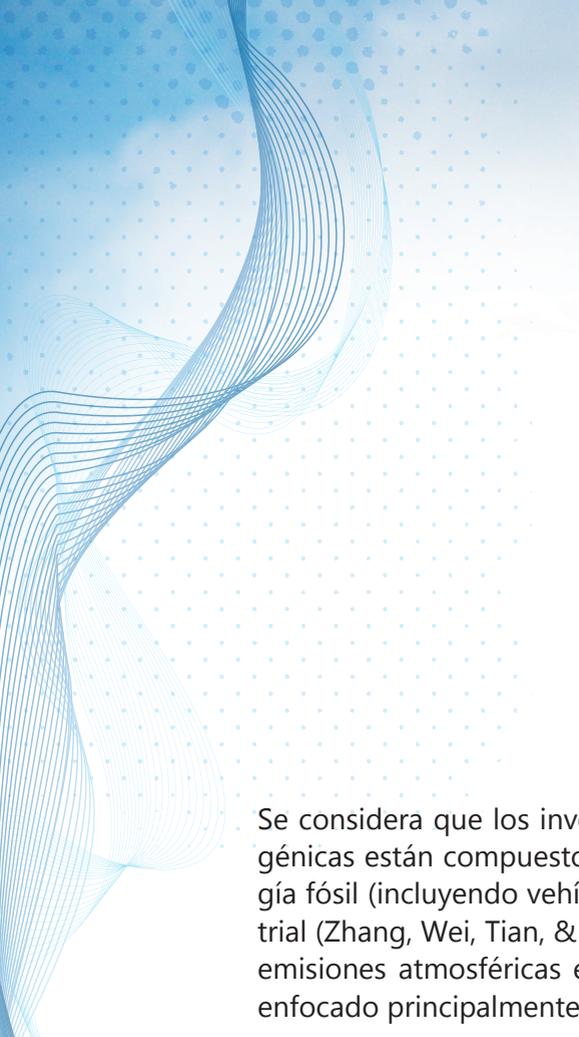
Introducción

En el Valle de Aburrá la contaminación del aire genera cada vez mayor preocupación pública a medida que crece el tráfico, la industrialización y la urbanización. De acuerdo con la Encuesta de Percepción Ciudadana 2011 (Medellín, cómo vamos, 2011), los habitantes de Medellín (municipio que alberga aproximadamente el 65% de la población del Valle de Aburrá) perciben que los problemas ambientales que requieren mayor atención son la congestión vehicular, la calidad del aire y la contaminación de las fuentes de agua.

Así, consciente de la preocupación de la ciudadanía por la calidad del aire de la región y de acuerdo con las disposiciones de las normas nacionales, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá como autoridad ambiental urbana viene trabajando desde hace más de una década en diferentes estrategias de descontaminación del aire, entre las que se cuentan los instrumentos de comando y control, la adquisición de herramientas para la toma de decisiones y el diseño e implementación de planes de reducción de la contaminación.

De este modo, con el ánimo de adquirir herramientas para la toma de decisiones, el Grupo de Investigaciones Ambientales de la Universidad Pontificia Bolivariana elabora el presente inventario de emisiones atmosféricas, en el marco del Convenio 243 de 2012 con el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, el cual tiene como objeto aunar

esfuerzos para evaluar y monitorear la calidad del aire en el Valle de Aburrá. Así, se presenta aquí información fundamental para el entendimiento de la formación y el transporte de contaminantes, para la gestión y para el pronóstico de la calidad del aire.



Antecedentes

Se considera que los inventarios de emisiones de fuentes antropogénicas están compuestos principalmente por el consumo de energía fósil (incluyendo vehículos) y los procesos de producción industrial (Zhang, Wei, Tian, & Yang, 2008). Es así como los inventarios de emisiones atmosféricas elaborados para el Valle de Aburrá se han enfocado principalmente en estos dos tipos de fuentes.

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en convenio con la Universidad Pontificia Bolivariana, la Universidad de Antioquia y el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, desarrolló el primer inventario de emisiones atmosféricas para el año base 1996. De ahí en adelante se han realizado varias actualizaciones en el marco de diferentes convenios entre la autoridad ambiental e instituciones educativas de la región.

De acuerdo con la Guía de Elaboración y Usos de Inventarios de Emisiones (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Western Governors Association, 2005), los primeros inventarios se caracterizan por tener información faltante y otras imperfecciones, pero la calidad de inventarios posteriores y actualizados mejora gradualmente. Es así como el Área Metropolitana del Valle de Aburrá ha procurado la actualización y mejora constante de sus inventarios, los cuales se encuentran disponibles para

los años 1996, 1999, 2005, 2007 y 2009, representando así la continuidad del trabajo que requiere su actualización.

Desde el primer inventario hasta la fecha son muchas las mejoras que se han introducido en los inventarios de emisiones para el Valle de Aburrá, dentro de ellas la creación del Modelo de Inventario de Emisiones MODEAM V2, base de datos que almacena la información relacionada con el inventario de emisiones, permitiendo generar mapas de emisiones y reportes en formato gráfico y tabular. También cabe mencionar que además de las fuentes fijas y móviles, se desarrolló el inventario de fuentes biogénicas (Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Universidad Pontificia Bolivariana, 2005) y fuentes de área (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - Universidad Pontificia Bolivariana, 2010), este último incluyó las principales emisiones evaporativas industriales y de estaciones de servicio de combustibles, del relleno sanitario Curva de Rodas y de la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando.

Por último, es importante resaltar la anotación que hace la Guía de Elaboración y Usos de Inventarios de Emisiones, en cuanto a que la meta final será desarrollar inventarios de emisiones más precisos y que representen las emisiones reales, aunque las limitaciones prácticas ameritan un enfoque continuo para alcanzar este objetivo. Con el tiempo, el desarrollo sistemático del inventario reducirá la incertidumbre y mejorará su calidad general (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Western Governors Association, 2005).



1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Generar información para la definición de estrategias que contribuyan a disminuir la contaminación atmosférica del Valle de Aburrá.

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el parque automotor del Valle de Aburrá teniendo en cuenta variables como el tipo de vehículo, modelo, cilindraje y combustible utilizado.
- Utilizar el modelo energético LEAP para estimar la demanda de energía del parque automotor del Valle de Aburrá en el año 2011.
- Calcular la emisión de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero del parque automotor del Valle de Aburrá en el año 2011, a través del modelo LEAP.
- Analizar la evolución del parque automotor del Valle de Aburrá y sus respectivas emisiones atmosféricas en la última década (2000-2010) utilizando el modelo LEAP.
- Caracterizar la industria asentada en el Valle de Aburrá de acuerdo con la actividad productiva, tipo de fuentes que generan la emisión y combustible utilizado.

- Establecer la demanda energética de la industria del Valle de Aburrá en el año 2011.
- Cuantificar las emisiones de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero generados las fuentes industriales asentadas en el Valle de Aburrá.



2. Marco **teórico**

Los inventarios de emisiones reúnen información fundamental para el entendimiento de la formación y el transporte de contaminantes, para la gestión de la calidad del aire y para el pronóstico de la misma (Tang, Zhang, Yi, Ma, & Pu, 2012).

Así, un inventario de emisiones debe contener todas las fuentes de contaminantes y sus precursores, además de la cantidad emitida de cada contaminante por cada fuente. Para el desarrollo de inventarios de emisiones, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) clasifica las emisiones en varios tipos: estacionarias, móviles y biogénicas. Las fuentes estacionarias se dividen a su vez en fuentes mayores (cuyas emisiones exceden un nivel mínimo o umbral que varía con el contaminante) y fuentes de área (cuyas emisiones están por debajo del nivel mínimo). Las fuentes móviles incluyen tanto vehículos en vía como motores fuera de vía (por ejemplo equipos de jardinería, vehículos recreacionales, equipos de construcción, embarcaciones comerciales, locomotoras y aeronaves). Mientras las fuentes biogénicas incluyen plantas, árboles, cultivos y animales de granja (Cook, Touma, Beidler, & Strum, 2006).

Puede decirse que el cálculo de emisión de contaminantes para cualquier tipo de fuente está basado en una metodología general que

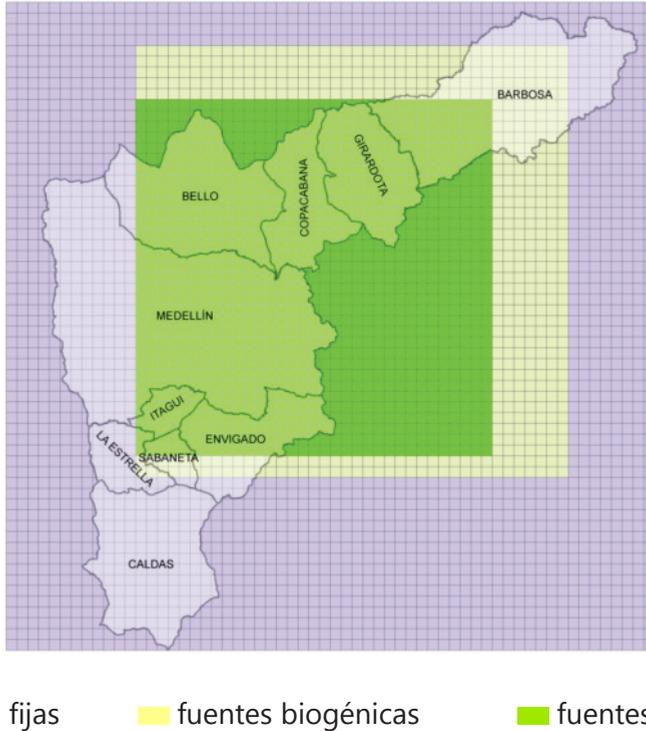
involucra factores de emisión y un determinado nivel de actividad. Esto puede expresarse a través de la siguiente ecuación:

$$\text{ECUACIÓN 2.1 } E_i(s) = EF_i(s) \times A(s)$$

Donde $E_i(s)$ es la tasa de emisión (masa por unidad de tiempo) del contaminante i generado por la fuente s , $EF_i(s)$ es el factor de emisión (masa por unidad de actividad) del contaminante i generado por la fuente s , y $A(s)$ es el nivel de actividad de la fuente s en un periodo de tiempo determinado.

En lo relacionado con inventarios de emisiones, es importante mencionar que éstos deben considerar tres componentes principales: la cantidad total de emisiones, la distribución espacial y la desagregación temporal, información escasa en los países en desarrollo, pues usualmente solo se reporta la cantidad total de emisiones (Saide, Zah, Osses, & Osse's de Eicker, 2009). Esto es una excepción en el Valle de Aburrá, región que da cuenta tanto de la cantidad total de emisiones, como de la distribución espacial y desagregación temporal, pues esta es información básica para el modelo de pronóstico de la calidad del aire que se viene implementando desde el año 2004 (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - Universidad Pontificia Bolivariana, 2004). Así, los tres componentes del inventario de emisiones son administrados a través del modelo de emisiones MODEAM V2, que como se mencionó en un apartado anterior es una base de datos que almacena la información relacionada con el inventario de emisiones. El modelo está desarrollado para trabajar dominios específicos para cada una de las fuentes de emisión consideradas. De este modo, para las fuentes estacionarias o fijas (industria) se asume un dominio de $60 \times 60 \text{ km}^2$, el cual incluye todos los municipios localizados en el Valle de Aburrá. Las fuentes biogénicas correspondientes a la vegetación se calculan en un dominio de $40 \times 40 \text{ km}^2$, y las fuentes móviles se estiman dentro de un dominio de $33 \times 33 \text{ km}^2$ (ver Figura 2.1). Todos los dominios están ubicados estratégicamente para que representen efectivamente las condiciones de contaminación del Valle de Aburrá, y cada uno de ellos está anidado dentro del dominio de emisiones de fuentes fijas, con una resolución de mallas de $1 \times 1 \text{ km}^2$ y una resolución temporal de una hora.

FIGURA 2.1. DOMINIOS DEL MODELO MODEAM



Por último, es importante anotar que el inventario de emisiones del Valle de Aburrá se ha desarrollado con un enfoque bottom-up, el cual combina estadísticas de actividad (como kilometraje anual, consumo de energía, producción industrial, entre otros) y factores de emisión específicos para cada tipo de fuente.

A continuación se presentan algunos aspectos generales del Valle de Aburrá relacionados con las variables demográficas, económicas y energéticas, las cuales hablan sobre el nivel de desarrollo de la región e influyen directamente en el nivel de emisión de contaminantes.

2.1 Aspectos generales del Valle de Aburrá

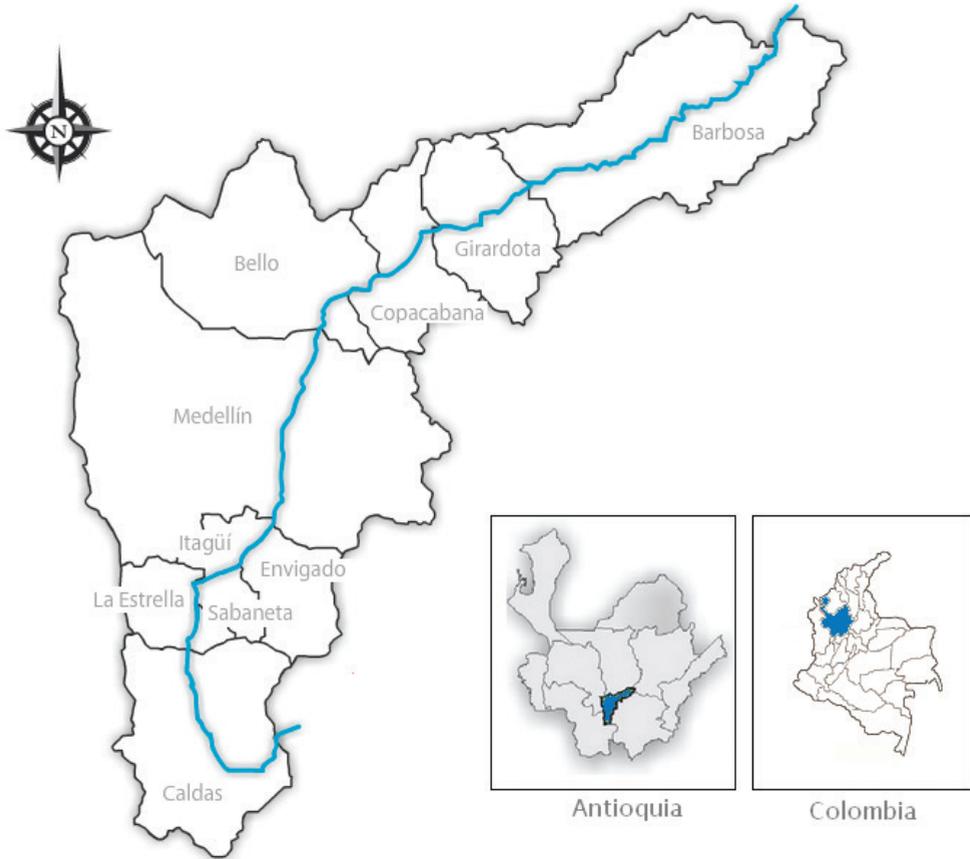
El Valle de Aburrá es una subregión ubicada en el centro-sur del departamento de Antioquia, en medio de la cordillera central de los Andes. Este valle congrega 10 municipios, que ubicados de norte a sur son Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Medellín, Envigado, Itagüí, Sabaneta, La Estrella y Caldas (ver Figura 2.2).

El Valle de Aburrá cuenta con una población de 3.312.165 habitantes (DANE, 2005) en una extensión de 1.152 km² a lo largo de una longitud aproximada de 60 km y una amplitud variable. La conformación del Valle de Aburrá es el resultado de la unidad geográfica determinada por la cuenca del río Aburrá, principal arteria fluvial que lo recorre de sur a norte y por una serie de afluentes que caen a lo largo de su recorrido. Está enmarcado por una topografía irregular y pendiente, que oscila entre 1.300 y 2.800 metros sobre el nivel del mar. Las cordilleras que lo encierran, dan lugar a la formación de diversos microclimas, saltos de agua y bosques (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2011).

2.1.1 Variables demográficas

El Valle de Aburrá alberga la mayor población del departamento (58% aproximadamente) y es el principal polo de desarrollo constituyéndose así en el segundo conglomerado urbano más grande del país. Es una región densamente poblada (3.118 habitantes por kilómetro cuadrado para el 2011) con características eminentemente urbanas, en que el primordial atractivo poblacional es la oferta de servicios, empleo y en general, de oportunidades, en contraste con el resto de subregiones de Antioquia (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2011).

FIGURA 2.2. VALLE DE ABURRÁ Y SUS MUNICIPIOS



Fuente: Área Metropolitana del Valle de Aburrá – Universidad Pontificia Bolivariana

De los 1.152 km² de extensión que tiene el Valle de Aburrá, 340 km² son suelo urbano y 812 km² son suelo rural. La mayoría de la población urbana y rural está localizada en Medellín, seguida de lejos de los municipios de Bello, Itagüí y Envigado, mientras Barbosa y La Estrella se destacan por su talla demográfica rural. La representatividad poblacional de Medellín, como municipio núcleo, frente a la población de todo el departamento, aumentó de forma moderada entre 1951 y 2005, pasando del 23% al 39% en 50 años, mientras que la población del Valle de Aburrá prácticamente duplicó su representati-

vidad departamental en la última mitad del siglo XX, pasando del 32% a casi el 60%, pues la población tendió a concentrarse como consecuencia del auge en el desarrollo industrial. Así, en términos generales, en el periodo intercensal 1964-1973, la población aumentó drásticamente en un 51%; en el periodo 1985-1993 el aumento fue menor, 10%; mientras en el periodo 1993-2005 el incremento fue nuevamente drástico, 49% (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2007).

2.1.2 Variables económicas

En el Valle de Aburrá el ingreso per cápita es menor en Medellín y Caldas, y superior en Envigado y Sabaneta; es mayor para las personas que habitan zonas urbanas que para las de zonas rurales, que en la mayoría de los municipios del Valle representa casi una tercera parte o más de la población. El Producto Interno Bruto (PIB) generado en el Valle de Aburrá en el año 2005 ascendió a 18.732.310 millones de pesos a precios constantes del 2000, lo que representa el 58,4% del PIB departamental y el 13,5% del PIB nacional (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2007).

De acuerdo con el Anuario Estadístico de Antioquia, en el año 2003 la generación de valor agregado en el Valle de Aburrá se originó principalmente en dos sectores: establecimientos financieros, seguros y otros, cuya participación fue del 28,4%, e industrial con 25%. Para el año 2005 la situación cambió y el sector Servicios sociales, comunales y personales encabezó la generación de valor agregado con un 33,5%, seguido por el sector industrial con el 23,4%.

En cuanto al aporte del Valle de Aburrá al valor agregado nacional, en el año 2003 su contribución fue del 10,6% y el aporte del departamento fue del 15,4% (ver Figura 2.3) a precios constantes de 1994. Para el año 2005 dicha contribución disminuyó un poco, y los aportes del Valle de Aburrá y Antioquia al valor agregado nacional fueron del 10,6% y 15,4% respectivamente (ver Figura 2.4) a precios constantes del año 2000.

FIGURA 2.3. CONTRIBUCIÓN DEL VALLE DE ABURRÁ AL VALOR AGREGADO NACIONAL, AÑO 2003

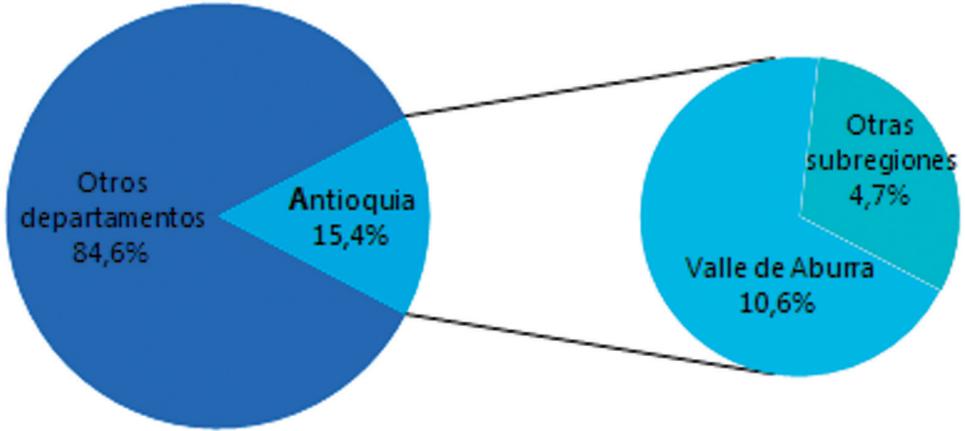
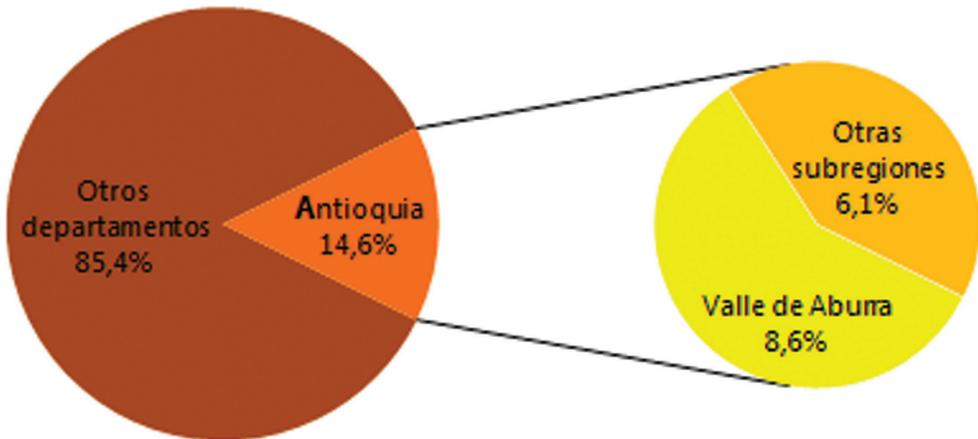


FIGURA 2.4. CONTRIBUCIÓN DEL VALLE DE ABURRÁ AL VALOR AGREGADO NACIONAL, AÑO 2005

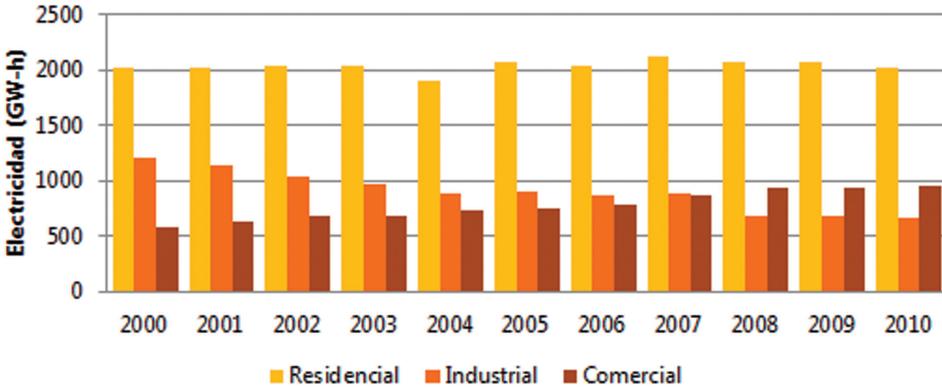


En relación con el tejido empresarial, en el Valle de Aburrá se concentran 51% de las empresas de Antioquia. Por tamaño de empresas se localizan en la zona, principalmente, microempresas y pequeñas empresas con una participación del 94,9% y 3,8% respectivamente. Si bien se habla de una emigración de la industria desde el Valle de Aburrá hacia otras subregiones del departamento y regiones del país, la actividad industrial continúa teniendo una participación importante dentro del PIB de Antioquia. Desde 1990, el sector agropecuario ha decaído en 2% y en total la participación de los sectores tradicionales del departamento ha disminuido en un 6%. La industria y el comercio parecieran ser las actividades más afectadas en esta pérdida de participación; mientras que el sector de Intermediación Financiera y Servicios conexos ha ampliado su aporte al PIB departamental. Las actividades que mantienen su participación son la generación de energía y la prestación de servicios públicos domiciliarios, los servicios de salud y el sector de la construcción (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2007).

2.1.3 Variables energéticas

En el año 2010, en el Valle de Aburrá se consumieron 4.944 GWh de energía, de los cuales el 44% fue consumido por el sector residencial, el 23% por el sector comercial, el 24% por el sector industrial y el porcentaje restante por otros sectores. Dicho consumo energético equivale a un consumo anual promedio per cápita de 1.414 kWh. En la Figura 2.5 se presenta el consumo de energía eléctrica para el periodo 2000-2010, en ella puede verse un consumo casi constante por parte del sector residencial, un decrecimiento y estabilización del consumo en el sector industrial y un leve aumento en el sector comercial. Dichas tendencias concuerdan con la contribución de estos sectores al PIB, que como se mencionó en el apartado anterior aumenta para el sector comercial y disminuye para el sector industrial.

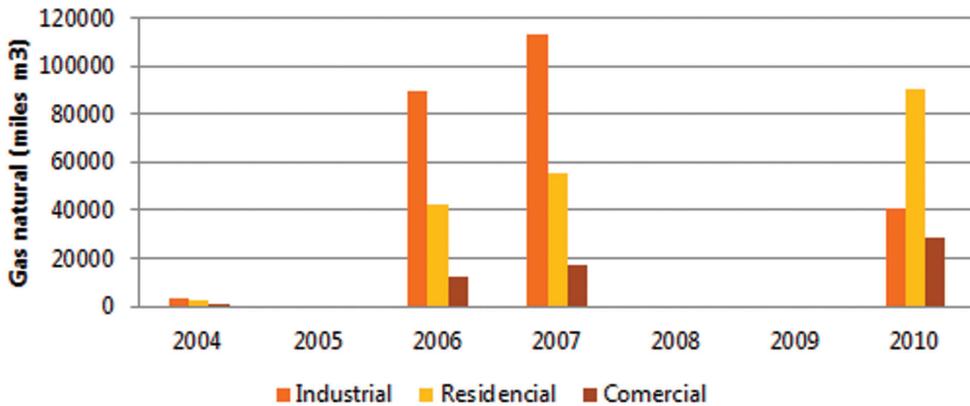
FIGURA 2.5. CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL VALLE DE ABURRÁ, 2000-2010



Fuente: Anuario Estadístico de Antioquia. 2010.

Mientras tanto, ese mismo año se consumieron 163 millones de metros cúbicos de gas natural; el 55% en el sector residencial, 25% en el sector industrial, 17% en el sector comercial y el porcentaje restante en otros sectores.

FIGURA 2.6. CONSUMO DE GAS NATURAL EN EL VALLE DE ABURRÁ

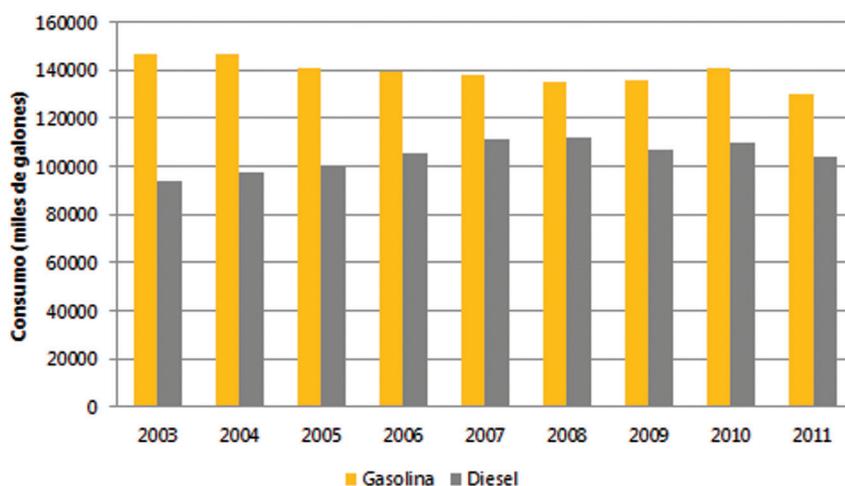


Fuente: Anuario Estadístico de Antioquia. 2010.

En la Figura 2.6 se presenta el consumo de gas natural urbano para los años en los que el Anuario Estadístico de Antioquia reportó tal información. En esta figura puede verse una tendencia creciente tanto en el sector residencial como en el comercial, y una marcada disminución en el sector industrial. Esta reducción en el consumo de gas natural pudo ser causada por la migración de la industria a otras subregiones del departamento, y también a un fenómeno de recambio de combustible, pues cuando empezó la distribución de gas natural por red muchas industrias decidieron satisfacer sus necesidades de calor con gas natural, sin embargo, este energético no pudo competir económicamente con el carbón por lo que muchas industrias decidieron volver al combustible que utilizaban antes.

En cuanto a la demanda de combustible del parque automotor, en la Figura 2.7 se presenta el consumo de gasolina y diesel para el periodo 2003 a 2011. En ella puede observarse un leve descenso en el consumo de gasolina, lo que podría atribuirse a un parque automotor más eficiente, al remplazo de gasolina por gas natural o a una disminución del kilometraje anual recorrido por los vehículos, tal vez a causa del incremento en el precio de combustible. En cuanto al diesel se observa un aumento sostenido hasta el año 2008, sin embargo, en 2009 se ve una disminución de la demanda, originada tal vez por la crisis económica que tocó a Colombia ese año.

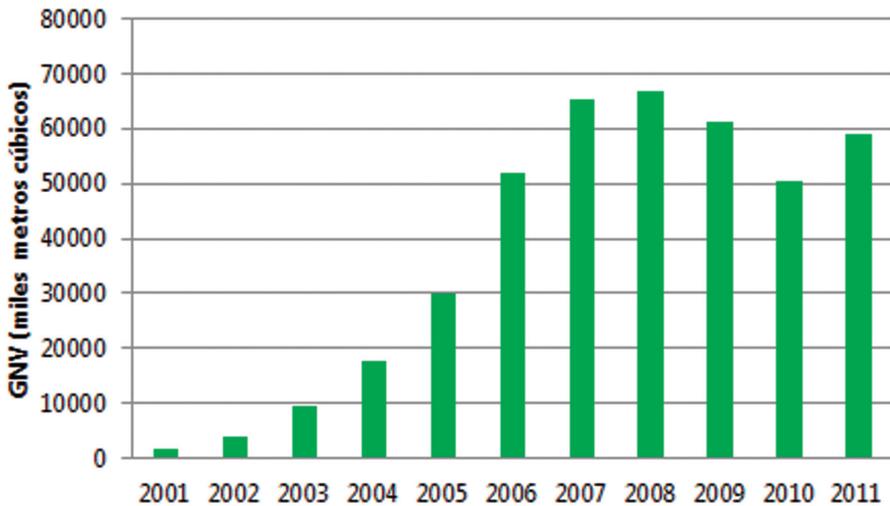
FIGURA 2.7. CONSUMO DE GASOLINA Y DIESEL EN EL VALLE DE ABURRÁ, 2003-2011



Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética. 2012.

En la Figura 2.8 se presenta el consumo de gas natural vehicular para el periodo 2001-2011, allí puede verse un aumento casi exponencial en la demanda hasta el año 2008, momento en el cual disminuye el consumo de gas natural, hasta empezar a recuperarse nuevamente en el año 2011.

FIGURA 2.8. CONSUMO DE GAS NATURAL VEHICULAR (GNV) EN EL VALLE DE ABURRÁ, 2001-2011



Fuente: Empresas Públicas de Medellín, 2012.

El análisis de las variables demográficas, económicas y energéticas del Valle de Aburrá permite entrever que la rápida urbanización de la región y el crecimiento económico están acompañados por el incremento en el consumo de energía, lo que conlleva a su vez a un aumento en la emisión de contaminantes atmosféricos y al deterioro de la calidad del aire de la región.



3. Fuentes **móviles**

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 OECD (Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos), donde sobresale Estados Unidos con una alta proporción; en lo relacionado con los países en desarrollo, la proporción es pequeña pero se incrementa rápidamente (Schipper, 2011).

En cuanto al Valle de Aburrá, con el aumento en el nivel de ingresos, las facilidades para adquirir vehículo, las fallas en el servicio de transporte público, la expansión sin restricciones de los municipios y la subvaloración de los vehículos no motorizados, el número de automóviles y motocicletas en el Valle de Aburrá ha crecido cerca del 12% anual en la última década. Dicho incremento se caracteriza por el aumento en las longitudes de viaje y de la densidad de tráfico (número de vehículos por unidad de longitud), lo que genera los consecuentes problemas de congestión, costos, consumo de energía y contaminación atmosférica.

Bajo este panorama y teniendo en cuenta la relación energía y ambiente, por primera vez se calcularán las emisiones y la demanda de

energía 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, por ejemplo, en California, donde 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 (Shabbir & Ahmad, 2010). En Colombia, el modelo LEAP ha sido utilizado por la Unidad de Planeación Minero Energética para la formulación estratégica del plan de uso racional de energía y de fuentes no convencionales de energía (UPME - Consorcio Bariloche, 2007), por la Universidad Nacional 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 (Quijano, Botero, & Domínguez, 2012), y de manera similar se encuentran otros casos de su utilización en planeación energética. 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. A continuación se presentan algunos aspectos generales del modelo LEAP.

Modelo LEAP

El Sistema de Planteamiento de Alternativas Energéticas a Largo Plazo, (LEAP, Long-range Energy Alternatives Planning System) 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. Fue desarrollado por el Stockholm Environment Institute (SEI) y ha sido adoptado por cientos de organizaciones en más de 150 países, cuyos usuarios incluyen agencias gubernamentales, academias, organizaciones no gubernamentales y compañías consultoras; cabe anotar que el software no tiene ningún costo para instituciones académicas y gubernamentales ubicadas en países en vías de desarrollo (Heaps, 2012).

La estructura de LEAP está desagregada en un árbol jerárquico de cuatro niveles: sector, sub-sector, uso final y dispositivos; en el caso del sector transporte, el análisis se centra en el uso final, donde la demanda de energía puede ser calculada como el producto del nivel de actividad y la intensidad energética. El nivel de actividad depende de factores como el número de vehículos y el kilometraje recorrido, mientras la intensidad energética depende de la eficiencia energética del vehículo. Las emisiones del vehículo pueden ser calculadas como el producto de la demanda de energía o los kilómetros recorridos por factores de emisión, los que a su vez dependen de la tecnología del vehículo y el tipo de combustible.

3.1 Metodología

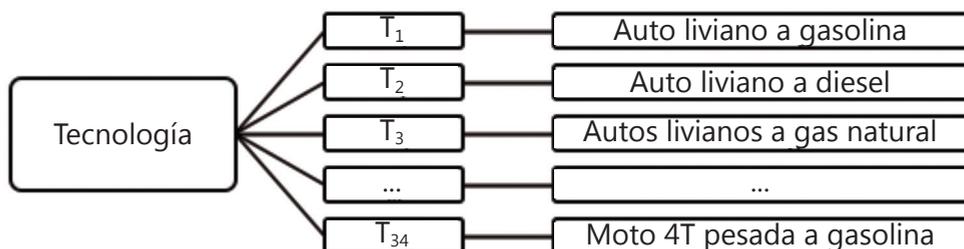
Para la introducción de los datos en LEAP, el parque automotor del Valle de Aburrá fue desagregado en lo que pueden llamarse niveles de actividad, estos niveles son sector (actividad 1), sub-sector (actividad 2), uso final (actividad 3) y dispositivo (actividad 4). En cuanto a la intensidad energética y los factores de emisión de cada contaminante, estos se asocian con cada dispositivo en el nivel 4. En la Tabla 3.1 se puede ver esta estructura metodológica aplicada al parque automotor del Valle de Aburrá.

TABLA 3.1. ESTRUCTURA METODOLÓGICA DEL PARQUE AUTOMOTOR DEL VALLE DE ABURRÁ EN LEAP

Sector (Actividad 1)	Sub-sector (Actividad 2)	Uso final (Actividad 3)	Dispositivo (Actividad 4)
Tipo de vehículo -Autos -Taxis -Buses -Camiones -Motos 2T -Motos 4T	Rangos de cilindraje -Livianos -Medianos -Pesados	Tecnología de conversión de energía: -Motor a gasolina -Motor a diesel -Motor a gas natural vehicular (GNV)	-Intensidad energética o rendimiento del combustible (MJ/100 km) -Factores de emisión (g/km o kg/TJ)

Un ejemplo de los usos finales de las diferentes tecnologías de conversión de energía del parque automotor se puede ver en la Figura 3.1.

FIGURA 3.1. ALGUNAS DE LAS TECNOLOGÍAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA



Finalmente, bajo cada nivel de actividad se deben introducir datos para al menos el año base. En el caso de realizar proyecciones para años futuros, el modelo estima la demanda de energía y las emisiones al aire usando factores de crecimiento específicos introducidos por el usuario, o de manera alternativa se pueden introducir datos para cualquiera de los años futuros y usar métodos de interpolación o extrapolación.

3.1.1 Variables de entrada del modelo LEAP

A continuación se da una breve explicación de las principales variables de entrada del modelo LEAP, para el análisis del transporte automotor (Heaps, 2012).

a. Existencias (Stock) y Ventas (Sales)

Cuando se llevan a cabo Análisis de Transporte o Análisis de Existencias en el modelo LEAP, es necesario especificar información acerca de las existencias (*stock*) y ventas (*sales*) de vehículos. Esta información es útil cuando se quiere modelar el costo de una nueva tecnología o en situaciones en que se quiere modelar como una nueva eficiencia energética, rendimiento de combustible o estándar de emisión se trasladará a una mejora gradual en el parque automotor.

De este modo, para el escenario base (*Current account*) se especifican las existencias de vehículos en el año base y un perfil de ciclo de vida describiendo la distribución etaria de esos vehículos, junto con las ventas de vehículos en el año base.

b. Kilometraje (Mileage)

El kilometraje se define como la distancia anual recorrida por un vehículo. El modelo permite seleccionar entre varias unidades de longitud estándar y especificar un perfil de ciclo de vida describiendo cómo cambia el kilometraje cuando el vehículo envejece, sin embargo, si no se tiene información, el perfil se deja como un valor constante por defecto.

Cuando se introduce la información sobre el kilometraje, es importante especificar los valores históricos para que el modelo calcule adecuadamente el valor promedio para las existencias en el año base, pues si se introduce un solo valor el modelo asume que el mismo valor se aplica a todos los vehículos vendidos en los años previos.

c. Rendimiento de combustible (Fuel Economy)

El rendimiento de combustible se define como el consumo de energía por unidad de distancia recorrida por el vehículo (o su inverso, por ejemplo kilómetros/galón). En el escenario base se pueden seleccionar varias unidades estándar que incluyen millas/galón, litros/kilómetro, MJ/km, entre otras.

Adicionalmente se puede especificar un perfil de ciclo de vida que describa cómo el rendimiento de combustible empeora a medida que el vehículo envejece. Aquí se debe tener cuidado, pues en el caso de un rendimiento en unidades de distancia/volumen de combustible, el perfil de ciclo de vida debe ser constante o disminuir, y en el caso de datos especificados en unidades de volumen de combustible/distancia, el perfil debe ser constante o aumentar. En caso de no tener información sobre cómo el rendimiento de combustible varía con el tiempo, el perfil de ciclo de vida se deja como un valor constante por defecto.

d. Factores de emisión (Emission Factor)

Las cargas ambientales originadas por el consumo de combustible del parque automotor se especifican como un efecto (emisión de un contaminante) por unidad de energía consumida o por unidad de distancia recorrida. Du-

rante el cálculo, el software multiplica la carga ambiental por la cantidad total de energía consumida o el kilometraje total recorrido por todos los vehículos.

3.1.2 Cálculos para el análisis del transporte automotor

A continuación se presenta los principales cálculos realizados por el modelo LEAP en el análisis del parque automotor y su emisión de contaminantes (Heaps, 2012).

a. Rotación de las existencias de vehículos

ECUACIÓN 3.1 $Stock_{t,y,v} = Sales_{t,v} \times Survival_{t,y-v}$

Donde:

t es el tipo de vehículo.

v es el modelo del vehículo.

y es el año calendario.

Sales es el número de vehículos que entran al parque automotor en un año en particular, puede calculase con información sobre las ventas históricas.

Stock es el número de vehículos existentes en un año en particular.

Survival es la fracción de vehículos que sobreviven después de un determinado número de años.

b. Rendimiento del combustible

ECUACIÓN 3.2 $FuelEconomy_{t,y,v} = FuelEconomy_{t,y} \times FeDegradation_{t,y-v}$

Donde:

FuelEconomy es el combustible utilizado por unidad de distancia recorrida por el vehículo.

FeDegradation es un factor que representa el cambio en el rendimiento de combustible a medida que el vehículo envejece. Es igual a 1 cuando $y=v$.

c. **Kilometraje**

$$\text{ECUACIÓN 3.3 } \textit{Mileage}_{t,y,v} = \textit{Mileage}_{t,y} \times \textit{MiDegradation}_{t,y-v}$$

Donde:

Mileage es la distancia anual recorrida por el vehículo.

MiDegradation es un factor que representa el cambio en el kilometraje a medida que el vehículo envejece. Es igual a 1 cuando $y=v$.

d. **Consumo de energía**

$$\text{ECUACIÓN 3.4 } \textit{EnergyConsumption}_{t,y,v} = \textit{Stock}_{t,y,v} \times \textit{Mileage}_{t,y,v} \times \textit{FuelEconomy}_{t,y,v}$$

e. **Emisión de contaminantes basada en la distancia (e.g contaminantes criterio)**

ECUACIÓN 3.5

$$\textit{Emission}_{t,y,v,p} = \textit{Stock}_{t,y,v} \times \textit{Mileage}_{t,y,v} \times \textit{EmissionFactor}_{t,v,p} \times \textit{EmDegradation}_{t,y-v,p}$$

Donde:

p es cualquier contaminante criterio.

EmissionFactor es la emisión de contaminante p (e.g. gramos/kilómetro) de un vehículo nuevo de modelo v .

EmDegradation es un factor que representa el cambio en el factor de emisión del contaminante p a medida que el vehículo envejece. Es igual a 1 cuando $y=v$.

f. **Emisión de contaminantes basada en la energía (e.g. CO₂ y otros gases de efecto invernadero)**

ECUACIÓN 3.6

$$\textit{Emission}_{t,y,v,p} = \textit{EnergyConsumption}_{t,y,v} \times \textit{EmissionFactor}_{t,v,p} \times \textit{EmDegradation}_{t,y-v,p}$$

3.2 Datos de entrada

En esta sección se presentan los datos con los que se alimenta el modelo LEAP para obtener la demanda energética y las emisiones del parque automotor del Valle de Aburrá.

3.2.1 Existencias y ventas de vehículos

El número de vehículos existentes (*stock*) y las ventas de vehículos (*sales*) en el año 2011 se presenta en la Tabla 3.2. Esta información se obtuvo de las secretarías de transporte y tránsito (STT) de los diferentes municipios del Valle de Aburrá, en donde se supuso que todos los vehículos modelo 2011 correspondían a las ventas y todos los vehículos con modelo inferior correspondían a las existencias para el año en cuestión.

TABLA 3.2. EXISTENCIAS Y VENTAS DE AUTOMÓVILES EN EL VALLE DE ABURRÁ PARA EL AÑO 2011

Categoría vehicular	Stock	Sales
Autos	320.949	29.875
Taxis	40.860	5.496
Buses	16.436	819
Camiones	27.732	1.535
Motos de 2 tiempos	71.143	210
Motos de 4 tiempos	230.309	52.205
Sub-total	707.428	90.140
Total	797.568	

Fuente: Información procesada a partir de los datos de las secretarías de transporte y tránsito del Valle de Aburrá.

3.2.2 Existencias y ventas de vehículos de acuerdo con los rangos de cilindraje y al tipo de combustible utilizado

El modelo LEAP no solo requiere el total de existencias y ventas de cada categoría vehicular, sino que además necesita la distribución porcentual en cuanto a cilindrajes y tipo de combustible utilizado dentro de cada una de las

categorías vehiculares. Dichas distribuciones fueron obtenidas a partir de la información suministrada por los Centros de Diagnóstico Automotor (CDAs) al Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en cumplimiento a la Resolución 5624 de 2006 del Ministerio de Transporte. Así, después de procesar la información de veintisiete CDAs ubicados en todo el Valle de Aburrá, se validó la información de más de 250.000 vehículos analizados en estos lugares durante el año 2011, lo que se considera una muestra representativa del parque automotor de la región pues abarca cerca del 30% del mismo. En la Tabla 3.3 se presenta la distribución por rangos de cilindraje y tipo de combustible para el año 2011.

TABLA 3.3. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL POR TIPO DE VEHÍCULO, RANGOS DE CILINDRAJES Y TIPO DE COMBUSTIBLE, AÑO 2011

	Existencias	Ventas
AUTOS	50,8%	51,4%
Livianos (cc ≤ 1500)	50,0%	54,0%
Gasolina	92,6%	99,9%
Diesel	0,3%	0,1%
GNV	7,1%	0,0%
Medianos (1500 < cc ≤ 3000)	43,5%	43,0%
Gasolina	88,3%	26,7%
Diesel	6,3%	73,3%
GNV	5,4%	0,0%
Pesados (cc > 3000)	6,5%	3,0%
Gasolina	79,6,0%	100,0%
Diesel	7,0%	0,0%
GNV	13,4%	0,0%
TAXIS	7,1%	7,1%
Livianos (cc ≤ 1500)	90,8%	93,3%
Gasolina	68,6%	100,0%
GNV	31,4%	0,0%
Medianos (1500 < cc ≤ 3000)	9,2%	6,7%
Gasolina	28,4%	100,0%
Diesel	28,6%	0,0%
GNV	43,0%	0,0%

TABLA 3.3. CONTINUACIÓN

	Existencias	Ventas
BUSES	3,8%	2,6%
Livianos (cc ≤ 3000)	32,0%	2,0%
Gasolina	17,5%	0,0%
Diesel	69,9%	100,0%
GNV	12,6%	0,0%
Medianos (3000 < cc ≤ 6000)	55,4%	96,0%
Gasolina	0,4%	3,9%
Diesel	94,7%	96,1%
GNV	4,9%	0,0%
Pesados (cc > 6000)	12,6%	2,0%
Gasolina	3,0%	0,0%
Diesel	97,0%	100,0%
CAMIONES	3,6%	1,4%
Livianos (cc ≤ 3000)	12,2%	5,0%
Gasolina	5,2%	0,0%
Diesel	89,8%	100,0%
GNV	5,0%	0,0%
Medianos (3000 < cc ≤ 6000)	50,9%	5,0%
Gasolina	6,5%	0,0%
Diesel	88,5%	100,0%
GNV	5,0%	0,0%
Pesados (cc > 6000)	36,9%	90,0%
Gasolina	0,0%	28,8%
Diesel	100,0%	71,2%
MOTOS 2T	8,0%	-
Livianos (cc ≤ 100)	100,0%	-
Gasolina	100,0%	-
MOTOS 4T	25,8%	37,6%
Livianos (cc ≤ 100)	92,7%	98,5%
Gasolina	100,0%	100,0%
Medianos (100 < cc ≤ 300)	3,7%	0,0%
Gasolina	100,0%	100,0%
Pesados (cc > 300)	3,6%	1,5%
Gasolina	100,0%	100,0%

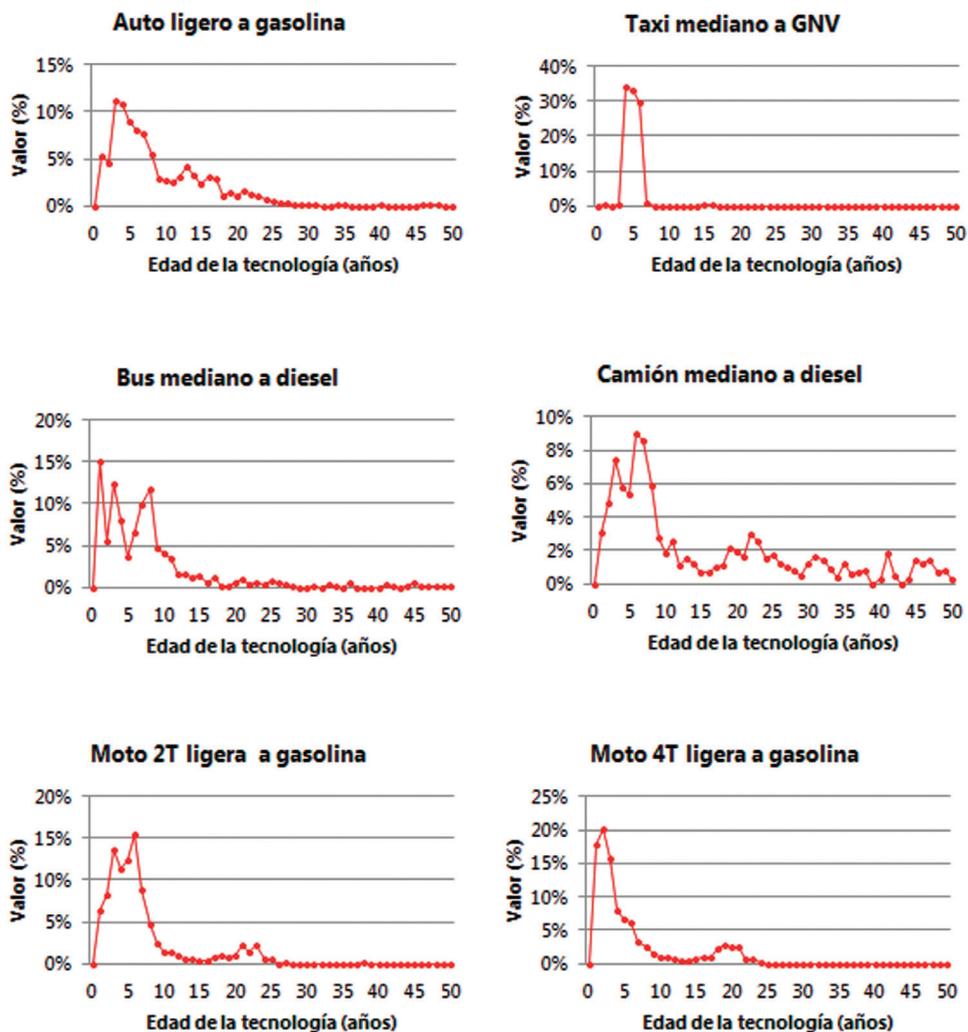
Fuente: Información procesada a través de los registros de los Centros de diagnóstico automotor del Valle de Aburrá.

En las columnas Existencias (*stock*) y Ventas (*sales*) de la Tabla 3.3 los números en negrita suman 100% (corresponde a las categorías autos, taxis, buses, camiones, motos 2T y motos 4T); los números en cursiva suman 100% dentro de cada categoría vehicular (corresponde a las subcategorías livianos, medianos, pesados) y los números en tipografía normal suman 100% dentro de cada subcategoría (corresponde a las tecnologías a gasolina, diesel y gas natural vehicular-GNV).

3.2.3 Perfil de antigüedad de los vehículos existentes (*Stock vintage profile*)

El perfil de antigüedad de los vehículos existentes es un perfil de ciclo de vida que describe la distribución etaria de la flota. Este perfil debe ser asociado a cada una de las tecnologías del parque automotor, y puede ser tan específica como se quiera, por ejemplo, puede crearse la distribución etaria por tipo de vehículo (autos, taxis, buses, camiones, motos 2T y motos 4T), o la distribución etaria por tipo de vehículo y cilindraje (autos livianos, autos medianos, autos pesados, taxis livianos, etc.), o la distribución etaria por tipo de vehículo, cilindraje y tipo de combustible (auto liviano a gasolina, auto liviano a diesel, auto liviano a gas natural, etc.). En el caso de este ejercicio se crean 34 perfiles de antigüedad con el fin de describir la flota con la mayor exactitud posible y en la Figura 3.2 se presentan algunos de los perfiles de antigüedad obtenidos. En estos perfiles puede verse por ejemplo que cerca del 30% de los autos livianos a gasolina tienen menos de cinco años de antigüedad, lo que indica que este sector del parque cuenta con una proporción importante de tecnologías nuevas; en cuanto a los taxis livianos a gas natural aproximadamente el 50% de ellos tienen menos de 10 años, debido a que un número importante de vehículos livianos a gasolina han sido reconvertidos a gas natural pues la rentabilidad de este combustible es mayor que el de la gasolina cuando se trata de recorrer largas distancias. Por su parte, alrededor del 80% de los buses medianos a diesel tienen menos de 10 años, mientras que solo el 40% de los camiones medianos a diesel tienen menos de 10 años. En el caso de las motos, el 27% de motos livianas de dos tiempos (2T) tienen menos de 5 años mientras el 84% de las motos livianas de cuatro tiempos (4T) se encuentran en ese mismo rango de edad, lo que demuestra el fenómeno en ventas de este tipo de vehículo en la última década.

FIGURA 3.2. PERFILES DE ANTIGÜEDAD DE ALGUNAS TECNOLOGÍAS



3.2.4 Perfil de supervivencia de los vehículos nuevos (*Survival profile*)

El perfil de supervivencia de los vehículos nuevos es un perfil de ciclo de vida que hace referencia a la fracción de estos vehículos que sobrevivirán después de un determinado número de años. Por ejemplo, las existencias de vehículos modelo 1990 en el año calendario 2000 serán las ventas de esos carros en 1990 multiplicado por la fracción que sobrevive 10 años (2000-1990).

Es necesario establecer el perfil de supervivencia cuando se hacen proyecciones del parque automotor, esto con el fin de definir qué vehículos irán saliendo de la flota a medida que pasan los años. Sin embargo, en el caso del análisis de un año específico no es necesario establecer la supervivencia, pues a través de las existencias (*stock*), el perfil de existencias (*stock vintage profile*) y las ventas (*sales*) queda claramente definida la composición del parque para el año en particular.

Así, a pesar de que para el año base 2011 no es obligatorio establecer el perfil de supervivencia, se han calculado estos perfiles con los datos aportados por las STT del área metropolitana en caso de que quieran hacerse proyecciones. Los perfiles fueron calculados a través de la siguiente ecuación:

$$\text{ECUACIÓN 3.7} \quad \text{Survival}_{t,y-v} = \frac{\text{Stock}_{t,y,v}}{\text{Sales}_{t,v}}$$

Donde:

t es el tipo de vehículo

v es el modelo del vehículo

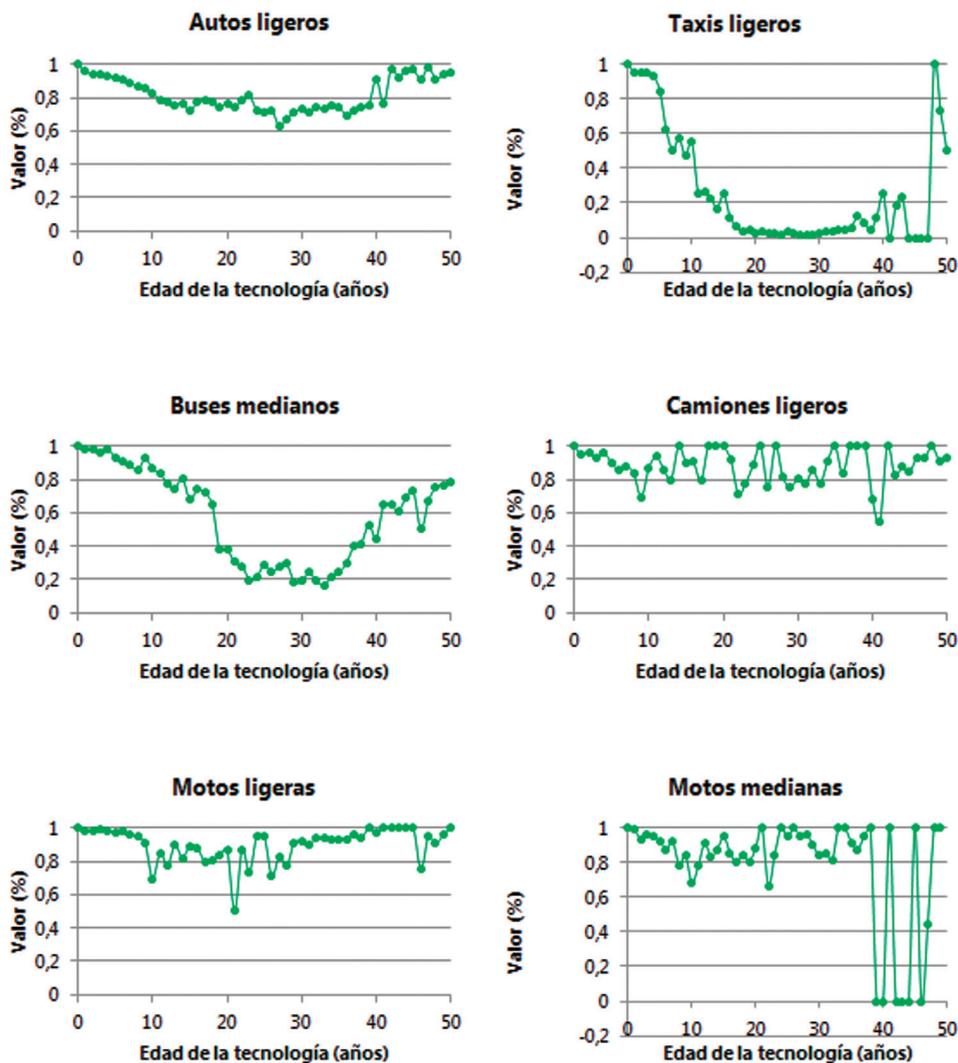
y es el año calendario

Así, las existencias (*stock*) de determinado vehículo con x años de antigüedad en el año calendario 2011 tendrán que cumplir el criterio de estar activo o circulando, mientras las ventas (*sales*) de ese mismo tipo de vehículo hace x años corresponderán al total de esos vehículos, es decir, se incluyen tanto los activos y como los no activos.

En la Figura 3.3 se presentan algunos de los perfiles obtenidos; cabe anotar que estos perfiles se tienen por tipo de vehículo y cilindraje, y no por tipo de combustible. pues esta información no está disponible en las bases de datos

de las STT, que en cambio sí cuenta con información sobre el estado del vehículo, es decir, si se encuentra circulando o no.

FIGURA 3.3. PERFILES DE SUPERVIVENCIA DE ALGUNAS TECNOLOGÍAS



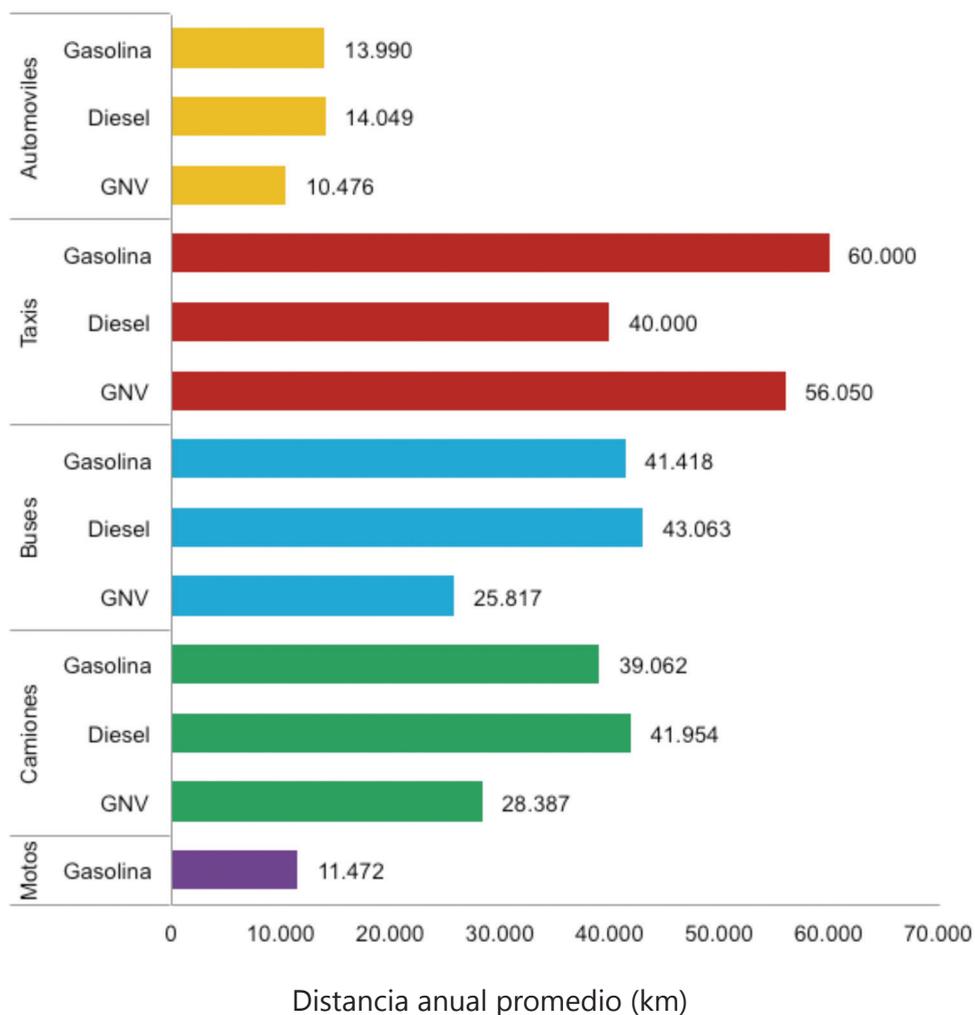
En las figuras anteriores puede verse que de acuerdo a los datos de las STT los autos livianos a gasolina tienen alta supervivencia, pues alrededor del 70 % de ellos aun circulan cuando tienen 30 años de antigüedad; de modo similar ocurre con los camiones livianos, y las motos livianas y medianas. Sin embargo, con los taxis livianos y los buses medianos ocurre algo diferente, pues sus tasas de supervivencia son menores; en el caso de los taxis solo sobrevive el 20% de ellos cuando tienen 10 años de antigüedad, mientras sobreviven alrededor del 40% de los buses cuando tienen 20 años de antigüedad. Esto es un indicativo de que los vehículos de transporte público se renuevan más a menudo que los de servicio privado, aunque cabe resaltar que continúa circulando una fracción importante de buses antiguos por los municipios del Valle de Aburrá.

3.2.5 Kilometraje

La distancia anual recorrida por vehículo (también conocido como VKT, *Vehicle Kilometer Travelled*) fue estimada a través de las ventas de vehículos en páginas web en el Valle de Aburrá, pues allí se encontró información sobre el tipo vehículo, modelo, cilindraje, combustible y kilometraje total. Así, se conformó un archivo con la información de aproximadamente 1.400 vehículos, se calculó su edad y se procedió a estimar la distancia anual recorrida en el primer año de vida (VKT_0) y la degradación de ese kilometraje inicial a medida que el vehículo envejecía.

Es importante anotar que solo se requiere una estimación inicial del VKT_0 , pues esta variable se ajusta junto con el rendimiento del combustible hasta cerrar el balance energético, es decir, hasta que la demanda total de energía estimada en el modelo LEAP sea igual a la demanda de energía real del parque automotor del Valle de Aburrá. Así, al ajustar el balance energético se estimaron las distancias anuales promedio recorridas en el primer año de vida, cuyos valores se presentan en la Figura 3.4 y fueron calculados como promedios ponderados de acuerdo a la categoría vehicular y al tipo de combustible.

FIGURA 3.4. DISTANCIA ANUAL PROMEDIO PONDERADA EN EL PRIMER AÑO DE VIDA DEL VEHÍCULO, AÑO 2011



La figura anterior muestra que los automóviles recorren una distancia anual que varía entre 10.000 y 14.000 km dependiendo del tipo de combustible. Los taxis, como era de esperarse, son los vehículos que recorren la mayor distancia anual, con un valor promedio ponderado de 60.000 km para los taxis a gasolina. En cuanto a buses y camiones la distancia anual recorrida se encuentra alrededor de los 35.000 km y para las motos se encuentra cerca de los 11.500 km anuales. Cabe anotar que los valores ajustados en el modelo LEAP fueron similares a los estimados a través de las ventas de autos.

Finalmente, es importante determinar el perfil de degradación del kilometraje anual, el cual describe el modo en que decrece la distancia anual recorrida a medida que el vehículo envejece. Para ello se representa el perfil de degradación por medio de una función exponencial como la siguiente (Heaps, 2012):

ECUACIÓN 3.8 $V(t) = V(t-1) \times \exp(t \times \text{constant})$

Donde:

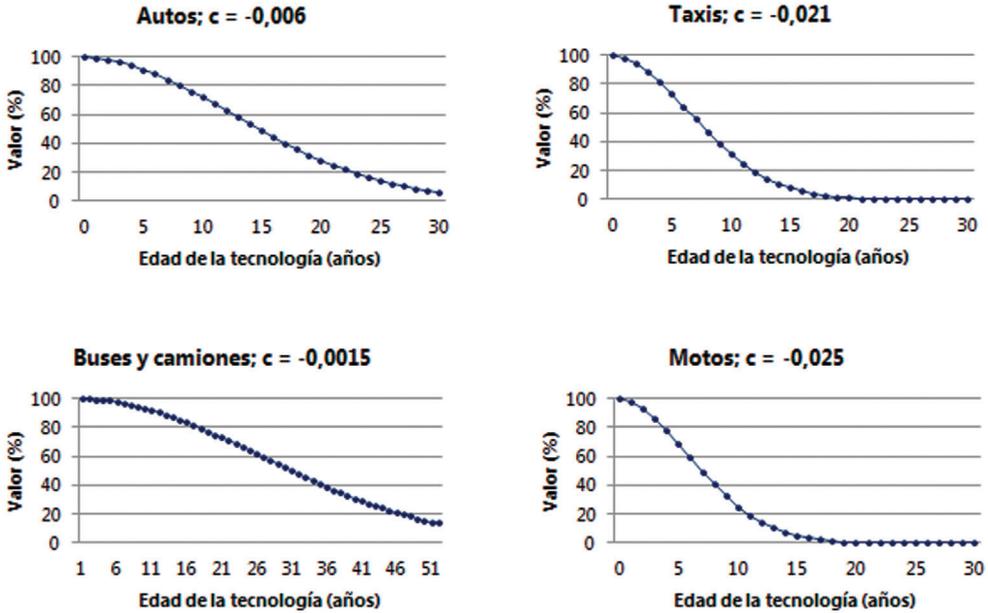
t es la edad del vehículo en años.

V es el valor de la variable que se degrada, en este caso el kilometraje anual.

$\text{Constant } (c)$ es un valor constante que se ajusta de acuerdo a los datos reales.

De esta manera, después de ajustar los datos encontrados a través de la venta de vehículos en páginas web a la función exponencial presentada en la Ecuación 3.8, se determinaron los perfiles que se presentan en la Figura 3.5, donde puede observarse que los taxis y las motos son los vehículos cuyo kilometraje se degrada más rápidamente pues cuando tienen cerca de 10 años de antigüedad, el kilometraje es alrededor del 20% de la distancia anual que recorría en el primer año de vida. En lo relacionado con autos, buses y camiones se encuentra que la degradación del kilometraje es mucho más lenta pues cuando tienen 10 años de antigüedad los autos tienen un kilometraje anual cercano al 70% del kilometraje en el primer año de vida, y los buses y camiones un kilometraje anual cercano al 90% del kilometraje inicial.

FIGURA 3.5. PERFILES DE DEGRADACIÓN DEL KILOMETRAJE ANUAL



3.2.6 Rendimiento de combustible

La información relacionada con el consumo de combustible fue obtenida del modelo International Vehicle Emissions, IVE, el cual fue desarrollado por el International Sustainable Systems Research Center (Davis, Lents, Osses, Nikkila, & Bart, 2005). Este modelo calcula la emisión de dióxido de carbono (CO₂) a partir del consumo de combustible, pues considera que el carbono presente en el combustible se convierte en CO₂ a excepción de una fracción que se convierte en monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (VOC) y material particulado (PM), tal y como lo expresa la siguiente ecuación:

ECUACIÓN 3.9

$$CO_2 = \left\{ \left[\frac{1}{FE \times 1,6} \times 3,785 \times 740 \times 0,82 \right] - CO \times \frac{12}{28} - VOC \times \frac{12}{14} - 0,9 \times PM \right\} \times \frac{44}{12}$$

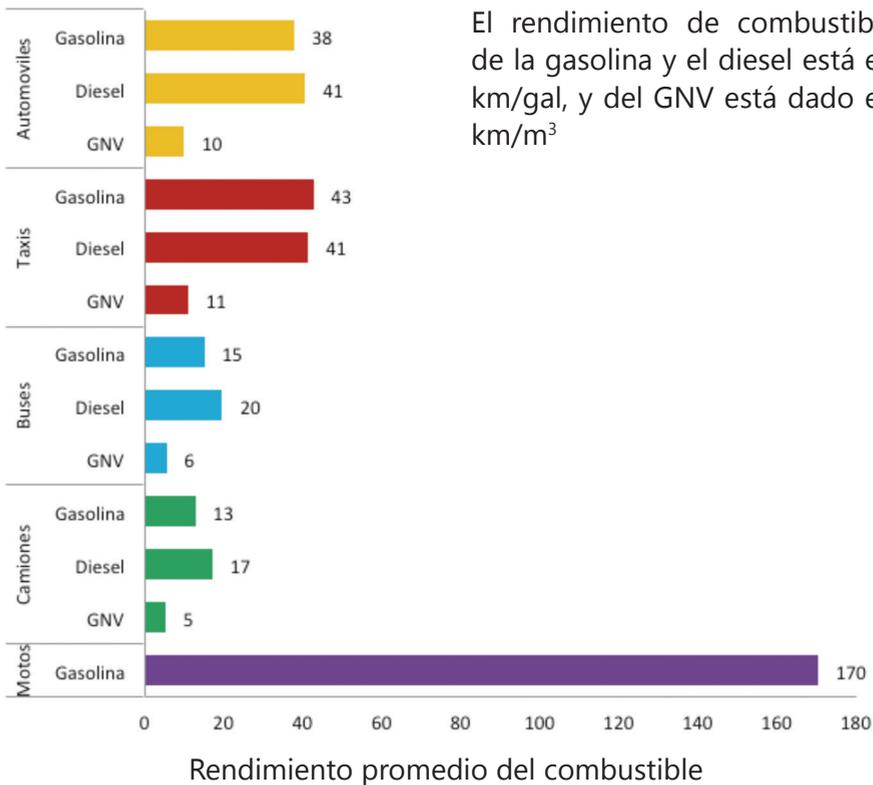
Donde:

CO_2 , CO , VOC y PM son los factores de emisión en g/km.

FE es el rendimiento del combustible en millas/galón de gasolina equivalente (galón de gasolina equivalente hace referencia a la cantidad de combustible alternativo necesario para igualar un galón de gasolina líquida).

Así, al despejar la variable FE en la Ecuación 3.9 es posible conocer el rendimiento teórico del combustible de las diferentes tecnologías vehiculares pues se tienen los factores de emisión de CO_2 , CO , VOC y PM para cada una de las respectivas categorías. Finalmente, los valores calculados son introducidos en el modelo LEAP con el fin de estimar la demanda energética del parque automotor del Valle de Aburrá. En la Figura 3.6 se presentan los rendimientos de combustible ponderados de acuerdo con la categoría vehicular y al tipo de combustible.

FIGURA 3.6. RENDIMIENTO PROMEDIO PONDERADO DEL COMBUSTIBLE, AÑO 2011



El rendimiento o eficiencia del combustible en un vehículo depende de la masa, la forma y el tamaño del mismo, así, el vehículo con la mayor eficiencia energética es la motocicleta que recorre cerca de 170 km por galón de gasolina, mientras los autos y taxis recorren alrededor de 40 km por galón de gasolina, y los buses y camiones cerca de 14 km por galón de gasolina. En cuanto a los vehículos diesel, los automóviles y taxis recorren 41 km por galón, y los buses y camiones aproximadamente 20 km por galón de éste tipo de combustible. Por último, los autos y taxis a gas natural recorren cerca de 11 km/m³, y los buses y camiones alrededor de 6 km/m³ de GNV.

3.2.7 Factores de emisión

Un factor de emisión vehicular se define como la relación entre una cantidad emitida de determinado contaminante por longitud y usualmente es expresado en gramos/kilómetro. Los factores de emisión utilizados en este inventario son los del modelo International Vehicle Emissions, IVE (Davis, Lents, Osses, Nikkila, & Bart, 2005), el cual posee factores de emisión para aproximadamente 450 tecnologías vehiculares clasificadas de acuerdo al tipo de vehículo (p. ej. auto, bus/camión, motores pequeños), tipo de combustible (p. ej. gasolina, diesel, gas natural), peso (liviano, mediano, pesado), tipo de dispositivo para la mezcla aire/combustible (p. ej. carburador, inyección directa, inyección de combustible multipunto), control de emisiones por el tubo de escape (p. ej. catalizador, 3-vías/EGR=*exhaust gas recirculation*, Euro II) y tipo de control de las emisiones evaporativas (PCV, *positive crankcase ventilation*). Además, para cada una de las tecnologías hay un factor de emisión de acuerdo a la edad del vehículo, que se da en términos del kilometraje, así: <79.000 km, 80.000-161.000 km y >161.000 km.

De esta manera, para estimar las emisiones vehiculares con los factores de emisión IVE se aplica un factor de emisión base (B) con una serie de factores de corrección (K) para estimar la cantidad de contaminante (Q) de una variedad de tipos de vehículo, con Q en unidades de masa sobre tiempo o distancia (ver Ecuación 3.10):

$$\text{ECUACIÓN 3.10} \quad Q_{[T]} = B_{[T]} \times K_{(1)[T]} \times K_{(2)[T]} \times \dots \times K_{(X)[T]}$$

Los factores de corrección para los factores de emisión pueden ser clasificados en varias categorías, de acuerdo con las variables locales y la calidad del

combustible. Dichos factores fueron desarrollados usando datos de modelos de emisiones vehiculares existentes, y se calcularon como la relación entre las emisiones del parámetro modelado indicado y la emisión base para cada tecnología. En la Tabla 3.4 se presentan las condiciones a las que están dados los factores de emisión base (BER, *Base Emission Rate*) y en la Tabla 3.5 los factores de corrección disponibles.

TABLA 3.4. CONDICIONES PARA LOS FACTORES DE EMISIÓN BASE

Variables locales	Variables de calidad del combustible
-Temperatura ambiente = 25°C -Humedad del ambiente = 50% -Altura = 950 msnm -Programas de inspección y mantenimiento (I/M) = no	-Gasolina = moderada/premezclada, motor de 2 tiempos -Azufre en la gasolina = moderado, 300 ppm -Plomo en la gasolina = no -Benceno en la gasolina = moderado, 1,5% -Gasolina oxigenada = 0% -Diesel = moderado -Azufre en el diesel = moderado, 500 ppm

Fuente: Attachment A, Development of the Base Emission Rates for Use in the IVE Model.

TABLA 3.5. FACTORES DE CORRECCIÓN DISPONIBLES PARA LOS FACTORES DE EMISIÓN BASE

Variables locales	Variables de calidad del combustible
Temperatura ambiente Humedad del ambiente Altura Programas de inspección y mantenimiento (I/M)	Gasolina Azufre en la gasolina Plomo en la gasolina Benceno en la gasolina Gasolina oxigenada Diesel Azufre en el diesel

Fuente: Attachment B, Development of the Correction Factors for Use in the IVE Model.

Por otra parte, es necesario especificar un calendario de introducción de tecnologías vehiculares con el fin de seleccionar adecuadamente los factores de emisión base y los factores de corrección. Dicho calendario se presenta en la Tabla 3.6 y fue construido con información de campo y del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, además se asume que si el combustible no cumple con los requerimientos de plomo y azufre de las tecnologías Euro, éstas no son introducidas al país.

TABLA 3.6. CALENDARIO DE INTRODUCCIÓN DE TECNOLOGÍAS VEHICULARES Y CONTENIDO DE AZUFRE EN EL COMBUSTIBLE EN COLOMBIA

Tipo de combustible y tecnología vehicular	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		2016		2017		2018		2019		2020		2021		2022		2023		2024		2025		2026		2027		2028		2029		2030	
	Control de emisiones por el tubo de escape	Ninguno	Carburador	SPFI	Catalizador de 2 ó 3 vías		Euro II	Euro III	Euro IV	Inyección en pre-cámara		Pre Euro	Euro II*	Euro IV	Euro V	Inyección directa		S (ppm) - Colombia		S (ppm) - Bogotá		S (ppm) - Medellín																																																												
Gasolina	Dispositivo para la mezcla aire/combustible	Carburador	SPFI	1000	300	150	50	Euro V	4500	4000	1200	500	50	10	10	10	4000	3000	2500	500	50	50	50																																																											
																								Control de emisiones por el tubo de escape	Pre Euro	Euro II*	Euro IV	Euro V	Inyección directa	S (ppm) - Colombia	S (ppm) - Bogotá	S (ppm) - Medellín																																																		
																																	Control de emisiones por el tubo de escape	Inyección en pre-cámara	4500	4000	1200	500	50	10	10	10	4000	3000	2500	500	50	50	50																																	
Diesel	S (ppm) - Colombia	S (ppm) - Bogotá	S (ppm) - Medellín	4000	1200	500	50	10	10	10	4000	3000	2500	500	50	50	50																																																																	

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

*Euro IV en Sistemas Integrados de Transporte Masivo desde enero de 2010 en Bogotá, y en Sistemas de Transporte Público de Pasajeros desde julio de 2010 en Bogotá y desde enero de 2011 en Medellín.

Entonces los factores de emisión base en este estudio son seleccionados acorde con las tecnologías vehiculares disponibles y corregidos de acuerdo a las condiciones del Valle de Aburrá, que son: humedad del 68%, altura de 1.538 msnm, contenido de azufre en la gasolina de 300 ppm, contenido de azufre en el diesel de 50 ppm y contenido de etanol en la gasolina de 10% V/V (aunque el diesel también se encuentra mezclado con aceite de palma (10% V/V), no se hace corrección de los correspondientes factores de emisión debido a que el modelo IVE no dispone de factores de corrección para este tipo de mezcla). De esta manera, del modelo IVE se obtienen los factores de emisión para los contaminantes VOC, CO, NO_x, PM, NH₃, N₂O y CH₄; es importante resaltar que las emisiones de partículas por los tubos de escape vehiculares se ubican principalmente en el rango de tamaño del PM_{2,5} por lo tanto todos los factores de emisión de PM corresponden a PM_{2,5}.

En cuanto a los factores de emisión de CO₂ y SO₂, estos se calculan por balance de masa asumiendo que todo el carbono y el azufre en el combustible se convierten en CO₂ y SO₂, suposición válida, pues aunque se generan otros contaminantes derivados del carbono y el azufre, las cantidades son mínimas si se comparan con el CO₂ y SO₂ producido. En la Tabla 3.7 se presentan los respectivos factores de emisión calculados, en unidades de kilogramo/Terajoule.

TABLA 3.7. FACTORES DE EMISIÓN DE CO₂ Y SO₂

Combustible	PCI (MJ/kg) ¹	Contenido de C (%) ¹	Contenido de S (ppm) ²	Factor de emisión (kg/TJ)	
				CO ₂	SO ₂
Gasolina	45,02	86,5	300	70.450,4	13,33
Diesel	43,98	86,4	50	72.034,0	2,27
Gas natural vehicular	47,12	73,0	23	56.804,4	1,15

¹ Unidad de Planeación Minero Energética. ² Ecopetrol.

Además de la estimación de emisiones de los contaminantes criterio, también es necesario especificar la especiación de los compuestos orgánicos volátiles, de óxidos de nitrógeno y de material particulado, ya que dicha especiación es necesaria para el modelo de pronóstico de la calidad del aire,

Comprehensive Air quality Model with extensions – CAMx, con el cual se realizan simulaciones especiales para la región.

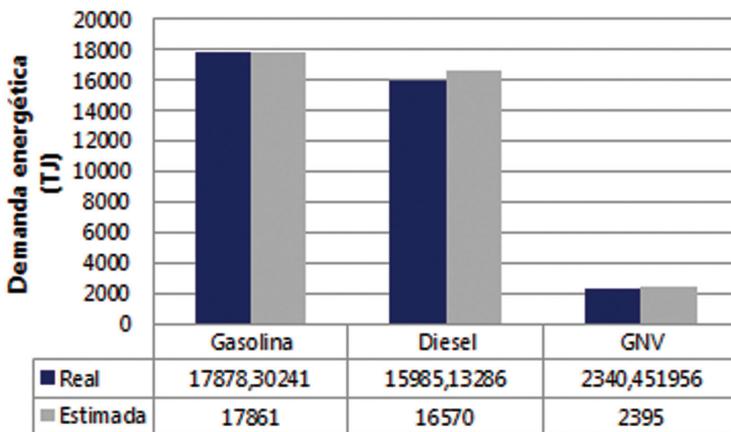
Por último, es necesario definir el perfil de degradación de los factores de emisión de los contaminantes, pues a medida que el vehículo envejece emite mayor cantidad de contaminantes. Dichos perfiles se obtienen a partir de la Ecuación 3.8 y los factores de emisión que define el IVE para cada tecnología a tres diferentes edades.

3.3 Resultados

3.3.1 Demanda energética del parque automotor

Con las variables de entrada del modelo LEAP totalmente definidas se procede a introducirlas en el modelo con el fin de ejecutarlo y ajustar el balance energético estimado y el real, lo que se logra con una diferencia inferior a $\pm 4\%$, tal y como se presenta en la Figura 3.7.

FIGURA 3.7. BALANCE ENERGÉTICO REAL Y ESTIMADO, AÑO 2011

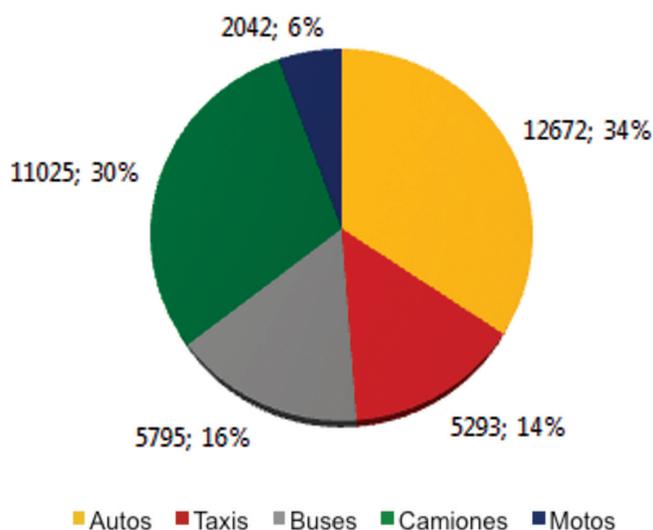


La demanda energética real se obtuvo a través de la información suministrada por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) sobre consumo de gasolina y diesel, y por Empresas Públicas de Medellín (EPM) sobre consumo de gas natural vehicular.

Ajustar el balance energético estimado al real disminuye la incertidumbre de los resultados, pues se está asegurando que el kilometraje y la eficiencia de combustible se acerquen en la mayor medida posible a los valores reales del parque automotor del Valle de Aburrá, lo que a su vez permite que las emisiones (calculadas en base al kilometraje recorrido y al consumo de combustible) se ajusten más a los valores reales.

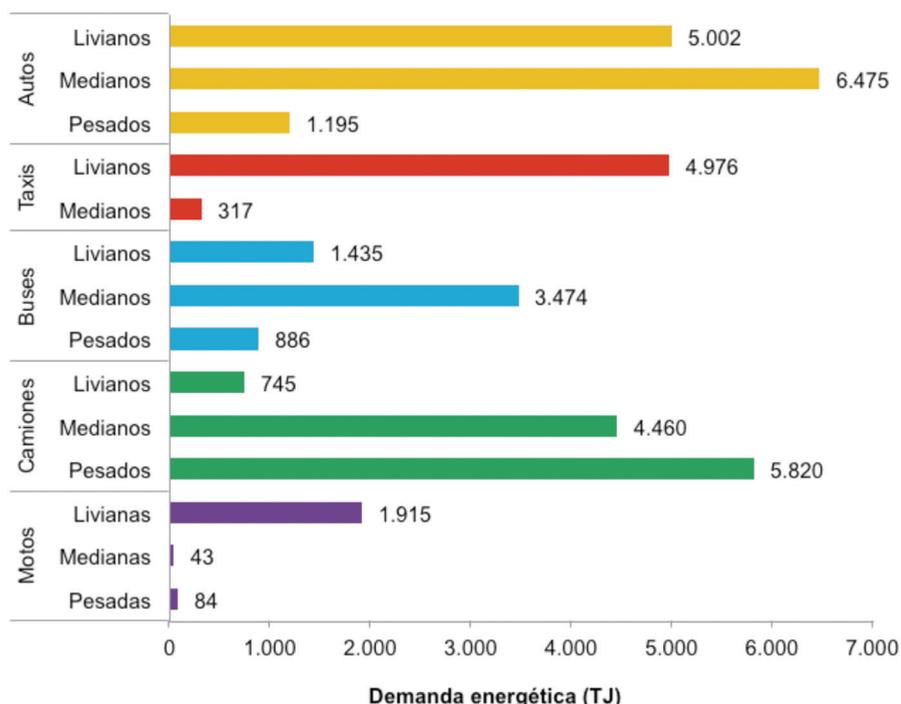
De acuerdo con los resultados arrojados por el modelo LEAP, en el Valle de Aburrá los automóviles y los camiones son las categorías vehiculares con la mayor demanda energética, pues en el año 2011 consumieron respectivamente el 34% y el 30% del total de energía; después de estas categorías se ubican los buses y los taxis demandando respectivamente el 16% y 14%, y por último se ubican las motos que consumen tan solo el 6%.

FIGURA 3.8. DEMANDA DE ENERGÍA POR CATEGORÍA VEHICULAR, AÑO 2011



En la Figura 3.9 se presenta la demanda de energía vehicular desagregada de acuerdo a la categoría vehicular y al tipo de combustible, mostrando que los autos livianos y medianos dominan la demanda energética en esta categoría; en cuanto a los camiones, que representan la segunda categoría que demanda más energía, son los vehículos medianos y pesados los principales consumidores de energía.

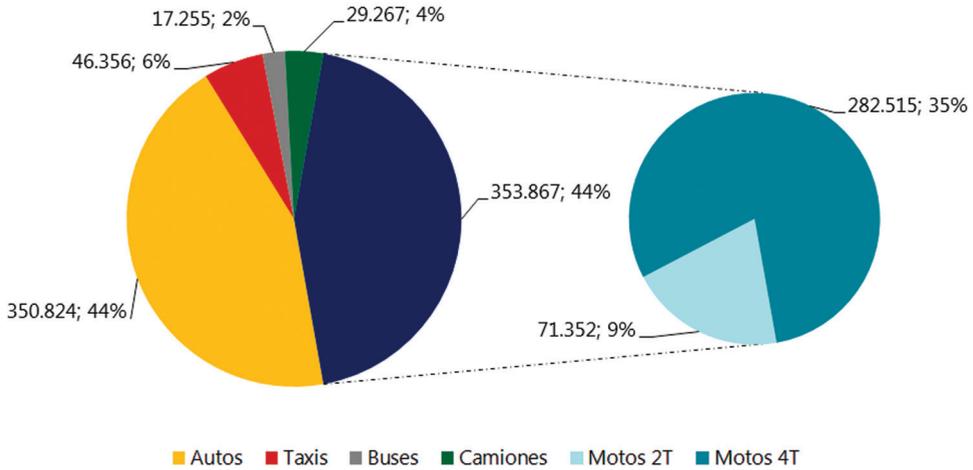
FIGURA 3.9. DEMANDA ENERGÉTICA POR CATEGORÍA VEHICULAR Y POR TAMAÑO, AÑO 2011



3.3.2 Composición del parque automotor y emisión de contaminantes criterio

Para el año 2011 el parque automotor del Valle de Aburrá se encontraba conformado por alrededor de 800.000 vehículos. Una mirada general a la composición de dicho parque permite ver que estaba conformado en un 44% por automóviles, y muy cerca se encuentran las motos aportando otro 44% de los vehículos motorizados. Dicha composición la completan los taxis, los camiones y los buses con aportes respectivos del 6%, 4% y 2% (ver Figura 3.10). De esta manera los vehículos para el transporte de particulares constituyen aproximadamente el 90% del parque, mientras el 10% restante lo conforman vehículos para el transporte público de pasajeros y de carga (taxis, buses y camiones).

FIGURA 3.10. DISTRIBUCIÓN DEL PARQUE AUTOMOTOR DEL VALLE DE ABURRÁ, AÑO 2011

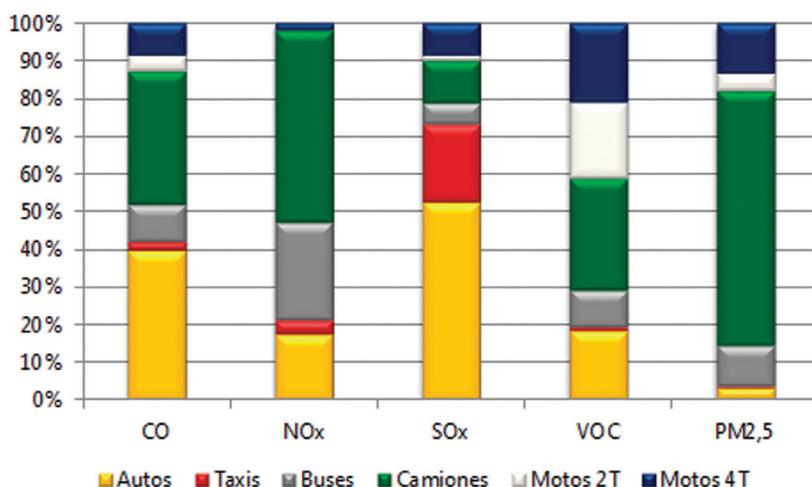


En cuanto a las emisiones de contaminantes criterio, en la Tabla 3.8 se presentan las emisiones estimadas en el modelo LEAP (en mega gramos o toneladas) y en la Figura 3.11 la distribución de esas emisiones por categoría vehicular. Los resultados muestran que aunque los camiones constituyen tan solo el 4% del parque, hacen una importante contribución a la emisión de CO, NO_x, VOC y PM_{2,5} aportando respectivamente el 35%, 51%, 30% y 67% de las emisiones de estos contaminantes. Por su parte los autos hacen una importante contribución a las emisiones de CO y SO_x pues participan con el 40% y 52% de las emisiones de estos dos contaminantes. Los taxis también hacen una contribución significativa a las emisiones SO_x, aportando el 21%, mientras los buses aportan el 26% de las emisiones de NO_x. Por último, también sobresalen las emisiones de VOC provenientes de las motos que contribuyen con el 41% de las emisiones de este contaminante. En las siguientes secciones de este capítulo se entrará en detalle en cada una de estas categorías vehiculares y las causas de sus aportes a las emisiones contaminantes.

TABLA 3.8. EMISIÓN DE CONTAMINANTES CRITERIO POR CATEGORÍA VEHICULAR (Mg), AÑO 2011

Categoría	CO	NO _x	SO _x	VOC	PM2,5
Autos	53.202	2.819	146	2.172	36
Taxis	3.085	624	58	110	7
Buses	13.402	4.209	17	1.187	123
Camiones	47.510	8.256	31	3.501	751
Motos 2T	5.408	6	3	2.366	53
Motos 4T	11.443	296	24	2.446	147
Total	134.050	16.211	279	11.783	1.116

FIGURA 3.11. DISTRIBUCIÓN DE EMISIONES POR CATEGORÍA VEHICULAR, AÑO 2011

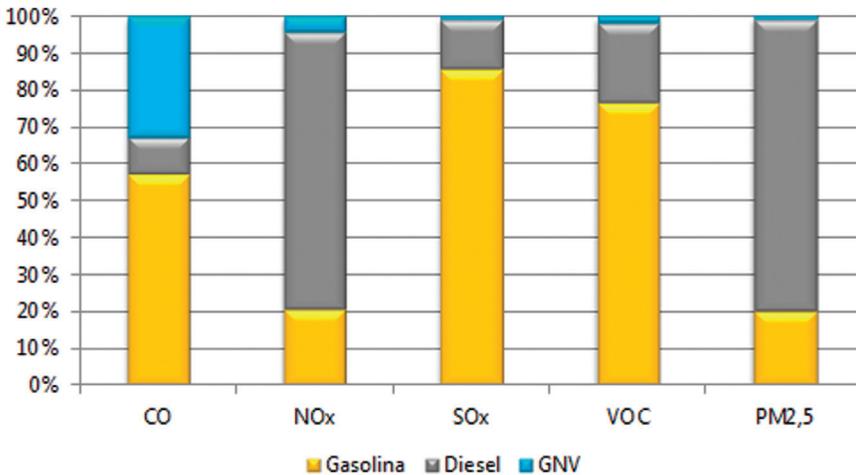


Ahora, si se analizan las emisiones por tipo de combustible, tal y como se presenta en la Tabla 3.9 y en la Figura 3.12, puede verse que la gasolina es responsable del 56% de las emisiones de CO, del 86% de las emisiones de SO_x y del 74% de las emisiones de VOC. Por su parte, el diesel contribuye con el 77% de las emisiones de NO_x y el 75% de las emisiones de PM_{2,5}, y en cuanto al gas natural vehicular este hace un importante aporte a las emisiones de CO, mientras las emisiones de los contaminantes restantes originadas por el GNV son poco significativas.

TABLA 3.9. EMISIÓN DE CONTAMINANTES CRITERIO POR TIPO DE COMBUSTIBLE (Mg), AÑO 2011

Categoría	CO	NO _x	SO _x	VOC	PM2,5
Gasolina	76.904	3.390	238	9.027	226
Diesel	13.304	12.136	38	2.510	878
GNV	43.842	686	3	245	12
Total	134.050	16.211	279	11.783	1.116

FIGURA 3.12. DISTRIBUCIÓN DE EMISIONES POR TIPO DE COMBUSTIBLE, AÑO 2011



La razón por la cual la gasolina es la responsable de la mayor proporción de CO es porque este tipo de motores (funcionan con el ciclo termodinámico Otto) queman el combustible de una manera un poco menos eficiente que los motores diesel (funcionan con el ciclo termodinámico Diesel), por lo que producen más CO que un motor similar a diesel; cabe anotar que el CO es el producto de la combustión incompleta ocurrida cuando el carbono en el combustible es oxidado parcialmente en lugar de ser oxidado completamente y convertido en dióxido de carbono.

En lo relacionado con los VOC, la gasolina emite mayor cantidad de ellos debido a que es más volátil que el diesel, no solo por sus los constituyentes base sino por los aditivos que le son agregados.

En cuanto al SO_2 , hasta hace pocos años el gran responsable del aporte de este contaminante era el diesel, pues poseía una mayor concentración de este elemento que la gasolina (dicho contenido de azufre tiene su origen en los compuestos sulfurados presentes en el petróleo en un amplio rango de formas aromáticas y alifáticas que se concentran principalmente en la fracción pesada del petróleo). Sin embargo, en el año 2011 el contenido de azufre en la gasolina era de 300 ppm, mientras el diesel tenía seis veces menos cantidad de azufre, es decir 50 ppm, motivo por el cual la gasolina pasó a ocupar el primer lugar en las emisiones de SO_2 .

El motivo por el cual el diesel es el responsable del 77% de las emisiones de NO_x es porque la cámara de combustión en un motor diesel alcanza grandes presiones y altas temperaturas que oxidan el N_2 presente en el aire y lo convierten en NO_x .

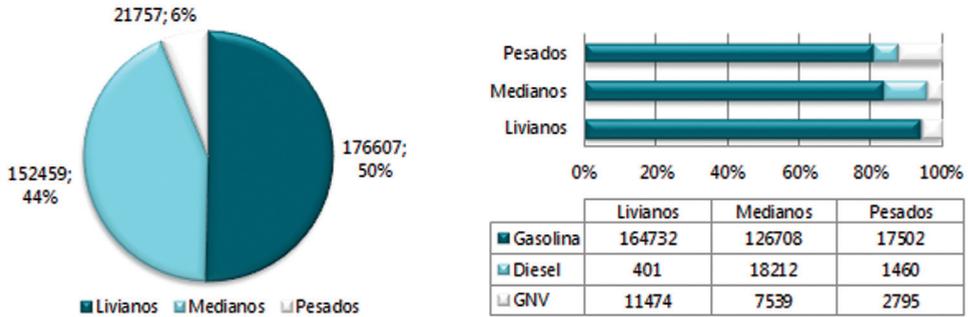
En lo relacionado con el $\text{PM}_{2,5}$ proveniente del diesel, dependiendo de las condiciones de operación, la composición del combustible, la tecnología de control y el tamaño del motor, livianos y pesados, estos pueden emitir respectivamente de 50 a 80 veces, y de 100 a 200 veces, más material particulado que un motor a gasolina equipado con catalizador (National Toxicology Program, Department of Health and Human Services, 2011).

A continuación se analizará con mayor detalle la distribución y emisiones del parque automotor del Valle de Aburrá de acuerdo con la categoría vehicular, el tamaño del vehículo y el tipo de combustible.

3.3.2.1 Autos

De acuerdo con los datos recopilados en las secretarías de transporte y tránsito del Valle de Aburrá, la región cuenta con un poco más de 350.000 autos. En la Figura 3.13 se presenta la distribución de la categoría autos para el año 2011 discriminada por cilindrajes y tipo de combustible. En la figura puede apreciarse que el 50% de esta flota la conforman los vehículos livianos (cilindraje menor de 1,5 L), el 44% los vehículos medianos (cilindraje entre 1,5 y 3,0 L) y el porcentaje restante lo constituyen los vehículos pesados (cilindraje mayor de 3,0 L). En cuanto al tipo de combustible utilizado, el 88% usa gasolina, el 6% usa diesel y el 6% restante usa GNV.

FIGURA 3.13. DISTRIBUCIÓN DE LA CATEGORÍA AUTOS, AÑO 2011

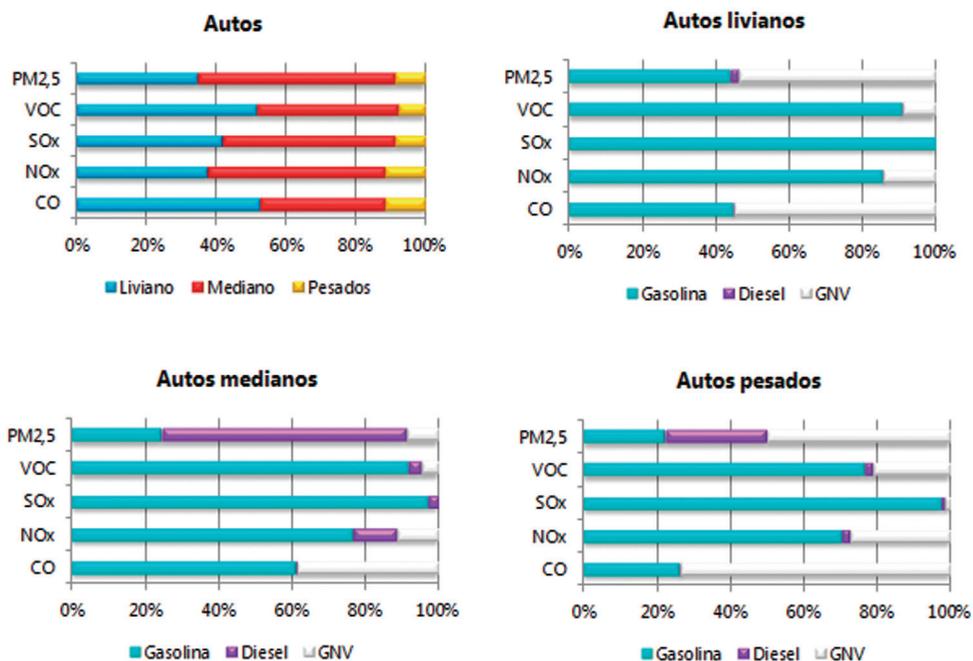


En lo relacionado con la emisión de contaminantes, en la Tabla 3.10 y en la Figura 3.14 se presentan las emisiones de la categoría autos distribuidas de acuerdo al cilindraje y al tipo de combustible. En la figura se aprecia cómo las emisiones de contaminantes criterio se encuentran dominadas por los autos de cilindraje liviano y mediano. A su vez, dentro de los autos livianos, la gasolina es la responsable de la emisión de la mayor parte de los contaminantes a excepción del CO y el PM_{2,5} donde el GNV hace un aporte importante. El comportamiento de los autos medianos y pesados es similar al de los autos livianos aunque aparece el diesel haciendo un aporte a las emisiones de PM_{2,5}.

TABLA 3.10. EMISIÓN DE CONTAMINANTES CRITERIO DE LA CATEGORÍA AUTOS (Mg), AÑO 2011

Categoría	Cilindraje	Combustible	CO	NO _x	SO _x	VOC	PM _{2,5}
Autos	Liviano	Gasolina	12.449,04	894,98	60,12	1.003,58	5,53
		Diesel	2,06	2,47	0,02	0,91	0,25
		GNV	15.438,22	155,69	0,59	106,65	6,77
	Mediano	Gasolina	11.473,40	1.093,87	69,51	806,20	5,00
		Diesel	116,82	166,31	1,89	30,80	13,74
		GNV	7.336,28	169,27	0,53	43,52	1,91
	Pesado	Gasolina	1.662,26	236,44	12,50	138,01	0,72
		Diesel	8,56	7,06	0,10	3,84	0,90
		GNV	4.715,48	93,27	0,26	38,93	1,62
Total			53.202	2.819	146	2.172	36

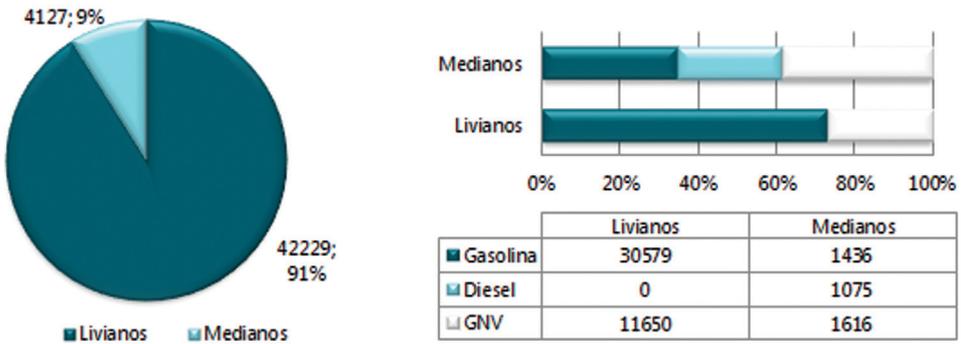
FIGURA 3.14. DISTRIBUCIÓN DE EMISIONES DE LA CATEGORÍA AUTOS, AÑO 2011



3.3.3.2 Taxis

El Valle de Aburrá cuenta con cerca de 46.000 taxis. En la Figura 3.15 se presenta la distribución de esta categoría de acuerdo al cilindraje (livianos: menores de 1,5 L; medianos: entre 1,5 y 3,0 L) y al tipo de combustible. Así, puede verse que el 91% de los taxis son livianos y están conformados en un 70% por vehículos a gasolina y el porcentaje restante a GNV. Mientras tanto, los taxis medianos que representan el 9% de esta categoría, están conformados en un 35% por vehículos a gasolina, cerca del 26% a diesel y el 39% a GNV.

FIGURA 3.15. DISTRIBUCIÓN DE LA CATEGORÍA TAXIS, AÑO 2011

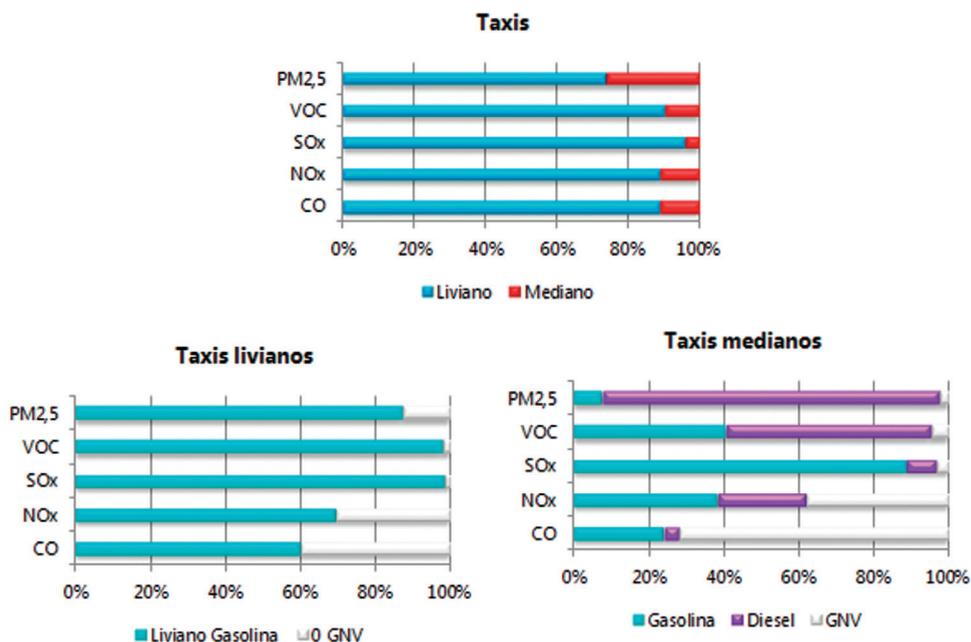


En cuanto a la distribución de las emisiones contaminantes de esta categoría del parque, en la Tabla 3.11 y en la Figura 3.16 se presentan los respectivos resultados. En ellas puede observarse que los taxis livianos dominan la emisión de contaminantes, aunque los taxis medianos aportan más del 20% a las emisiones del PM_{2,5}. Específicamente, en la categoría taxis livianos, la gasolina aporta la mayor proporción de los contaminantes y el gas natural hace un aporte importante a las emisiones de CO y NO_x. En la categoría taxis medianos el diesel hace un aporte significativo a las emisiones de NO_x, VOC y PM_{2,5}; y el GNV es representativo para las emisiones de CO y NO_x.

TABLA 3.11. EMISIÓN DE CONTAMINANTES CRITERIO DE LA CATEGORÍA TAXIS (Mg), AÑO 2011

Categoría	Cilindraje	Combustible	CO	NO _x	SO _x	VOC	PM _{2,5}
Taxis	Liviano	Gasolina	1.642,57	383,35	54,19	96,90	4,31
		GNV	1.098,76	169,85	1,12	2,48	0,65
	Mediano	Gasolina	82,96	27,21	2,13	4,37	0,14
		Diesel	13,52	16,71	0,20	5,91	1,58
		GNV	247,24	27,28	0,09	0,55	0,05
Total			3.085	624	58	110	7

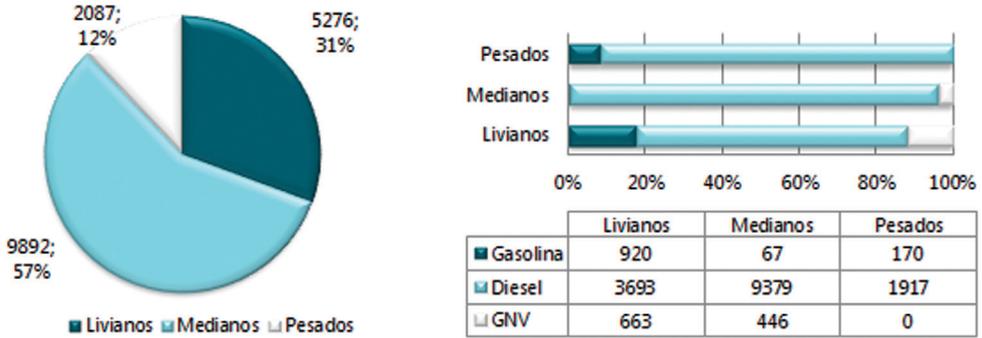
FIGURA 3.16. DISTRIBUCIÓN DE EMISIONES DE LA CATEGORÍA TAXIS, AÑO 2011



3.3.2.3 Buses

De los más de 17.000 buses que circulan por el Valle de Aburrá, el 57% de ellos son vehículos medianos (cilindraje entre 3,0 y 6,0 L), mientras el 31% son livianos (cilindraje menor de 3,0 L) y el 12% restante son pesados (cilindraje mayor de 6,0 L). Todos ellos en su mayoría utilizan diesel como combustible, aunque sobresale una pequeña proporción que usa gasolina (la mayoría son vehículos con edades superiores a los 15 años) y otra pequeña fracción de buses livianos con GNV (ver Figura 3.17).

FIGURA 3.17. DISTRIBUCIÓN DE LA CATEGORÍA BUSES, AÑO 2011

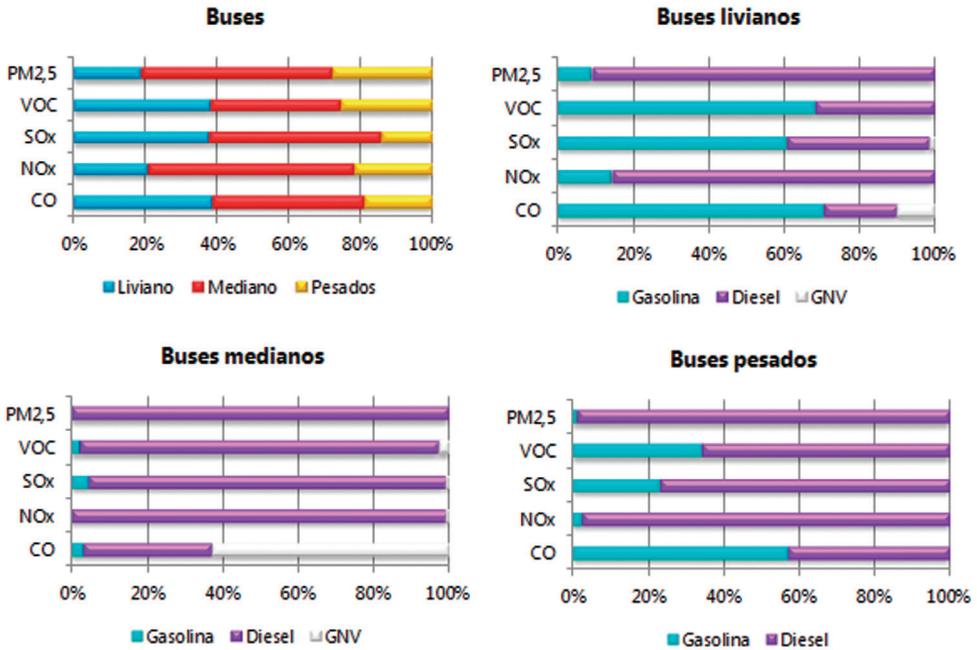


En la Tabla 3.12 y en la Figura 3.18 se presentan las emisiones y la distribución de ellas en esta categoría del parque. Los resultados arrojados por el modelo LEAP muestran que a la emisión de contaminantes contribuyen de manera similar los buses livianos y medianos, y en una menor proporción los buses pesados. En la subcategoría buses livianos, la gasolina hace un aporte significativo de CO, SO_x y VOC, mientras el diesel domina las emisiones de NO_x y PM_{2,5}. Mientras tanto en la categoría buses medianos las emisiones están influenciadas principalmente por el diesel, a excepción del GNV que aporta más del 60% de las emisiones de CO. Por último, las emisiones de los buses pesados están igualmente dominadas por el diesel aunque la gasolina nuevamente hace un aporte significativo a las emisiones de CO, VOC y SO_x.

TABLA 3.12. EMISIÓN DE CONTAMINANTES CRITERIO DE LA CATEGORÍA BUSES (Mg), AÑO 2011

Categoría	Cilindraje	Combustible	CO	NO _x	SO _x	VOC	PM _{2,5}
Buses	Liviano	Gasolina	3.616,67	123,98	3,85	305,53	2,01
		Diesel	1.015,63	730,26	2,41	141,86	20,76
		GNV	520,35	6,55	0,11	1,74	0,07
	Mediano	Gasolina	181,96	2,19	0,35	10,40	0,13
		Diesel	1.935,23	2.390,52	7,64	408,32	65,16
		GNV	3.539,76	20,98	0,10	12,15	0,15
	Pesado	Gasolina	1.467,78	24,72	0,58	105,06	0,43
		Diesel	1.124,22	909,46	1,91	202,03	33,88
	Total			13.402	4.209	17	1.187

FIGURA 3.18. DISTRIBUCIÓN DE EMISIONES DE LA CATEGORÍA BUSES, AÑO 2011



3.3.2.4 Camiones

En el año 2011 existían un poco menos de 30.000 camiones en el Valle de Aburrá, la Figura 3.19 presenta la distribución de esta categoría para ese año. Al igual que los buses, esta categoría del parque está constituida en mayor proporción por vehículos de tamaño mediano (cilindrajes entre 3,0 y 6,0 L) con un porcentaje del 48%. Sin embargo, la situación con los camiones livianos y pesados es contraria a la de los buses, pues aquí los camiones pesados (cilindraje mayor de 6,0 L) aportan el 40% y los livianos (cilindraje menor de 3,0 L) el 12%. El tipo de combustible usado por esta categoría del parque es en una gran proporción combustible diesel, existe otro pequeño número de vehículos a gasolina y una pequeña cantidad de camiones que funcionan con GNV.

FIGURA 3.19. DISTRIBUCIÓN DE LA CATEGORÍA CAMIONES, AÑO 2011

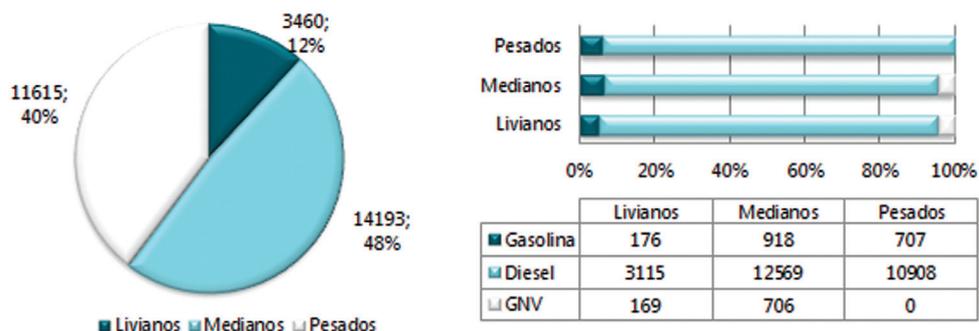


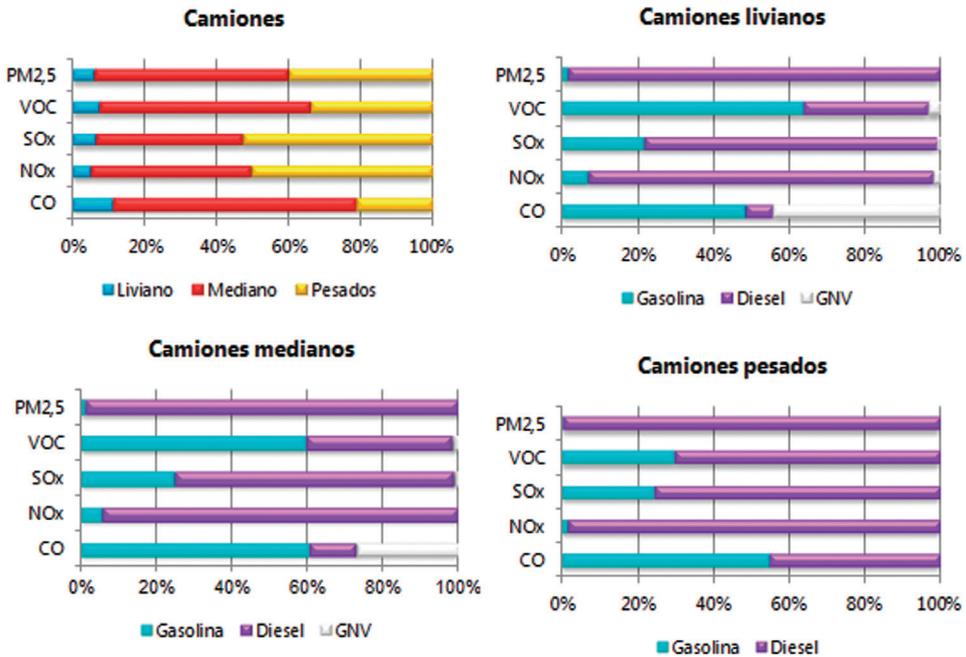
TABLA 3.13. EMISIÓN DE CONTAMINANTES CRITERIO DE LA CATEGORÍA CAMIONES (Mg), AÑO 2011

Categoría	Cilindraje	Combustible	CO	NO _x	SO _x	VOC	PM2,5
Camiones	Liviano	Gasolina	2.564,46	30,71	0,44	165,84	0,89
		Diesel	412,33	401,60	1,57	87,45	44,80
		GNV	2.341,73	8,34	0,02	8,57	0,15
	Mediano	Gasolina	19.358,16	203,63	3,17	1.219,65	5,00
		Diesel	4.027,62	3.402,82	9,35	787,97	396,95
		GNV	8.603,78	34,51	0,13	30,86	0,56
	Pesado	Gasolina	5.553,75	66,52	4,04	359,45	1,85
		Diesel	4.648,28	4.108,33	12,52	840,73	300,32
	Total			47.510	8.256	31	3.501

La emisión de contaminantes estimada en el modelo LEAP para la categoría camiones se puede observar en la Tabla 3.13 y en la Figura 3.20. En este caso, a la emisión de contaminantes aportan principalmente las categorías de camiones medianos y pesados, y en una proporción menor del 10% los camiones livianos. Específicamente en la sub-categoría camiones livianos, las emisiones de NO_x, SO_x y PM2,5 están dominadas por el diesel, las emisiones de VOC por la gasolina, y las de CO por la gasolina y el GNV. En las sub-categorías de camiones medianos y pesados, el comportamiento es muy similar

entre ambas, es decir, nuevamente las emisiones de NO_x , SO_x y $\text{PM}_{2,5}$ están influenciadas en mayor medida por el diesel, mientras las emisiones de VOC y SO_x están dominadas por la gasolina, a excepción del CO en la categoría de camiones medianos, en la cual, como es de esperarse el GNV hace un aporte cercano al 30% de las emisiones de este contaminante.

FIGURA 3.20. DISTRIBUCIÓN DE EMISIONES DE LA CATEGORÍA CAMIONES, AÑO 2011



3.3.2.5 Motos

De acuerdo con los datos de las secretarías de transporte y tránsito del Valle de Aburrá, en el año 2011 existían un poco más de 350.000 motocicletas, lo que significa una contribución del 44% al parque automotor de la región. Esta categoría está conformada en un 80% por motos 4T y en un 20% por motos 2T. A su vez, las motos 4T se clasifican de acuerdo al cilindraje en livianas (menores de 0,15 L) con un aporte del 75%, medianas (cilindraje entre 0,15 y 0,3 L) con un aporte del 2%, y pesadas (cilindrajes superiores a 0,3 L) con una contribución del 3%. En cuanto a las motos 2T, todas son livianas, y tanto las motos de 2T como las de 4T son a gasolina.

FIGURA 3.21. DISTRIBUCIÓN DE LA CATEGORÍA MOTOS, AÑO 2011

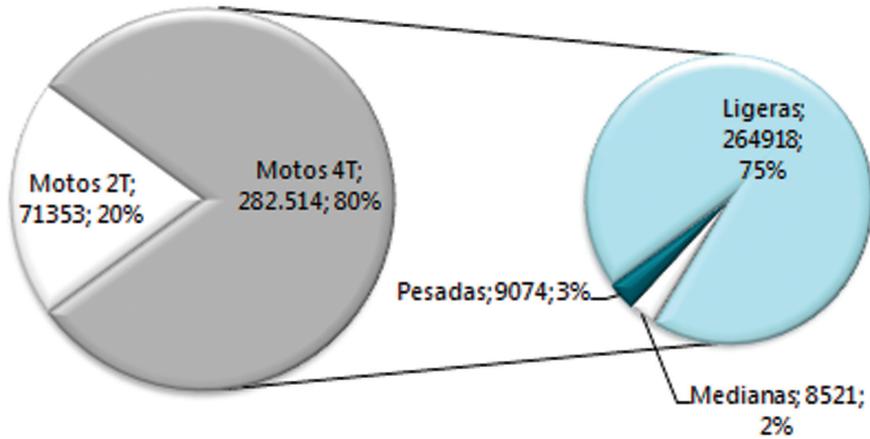
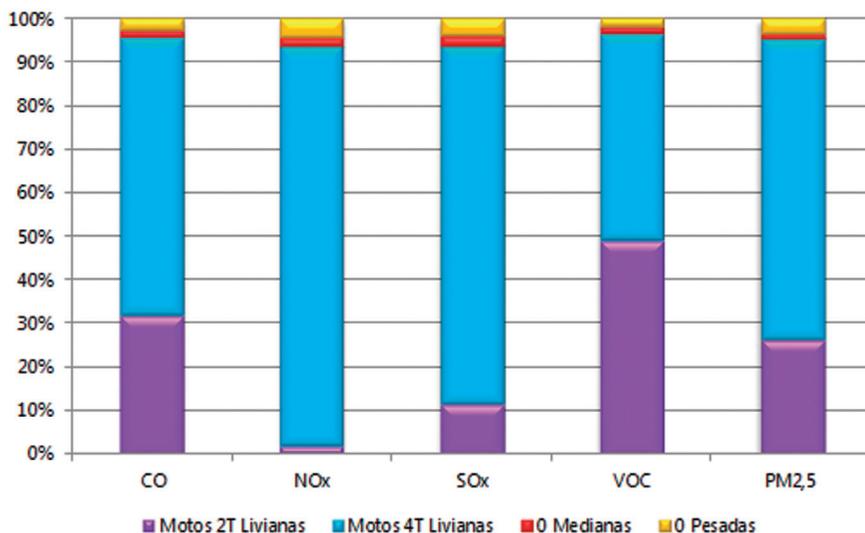


TABLA 3.14. EMISIÓN DE CONTAMINANTES CRITERIO DE LA CATEGORÍA MOTOS (Mg), AÑO 2011

Categoría	Cilindraje	Combustible	CO	NO _x	SO _x	VOC	PM2,5
Motos 2T	Livianas	Gasolina	5.408	6	3	2.366	53
Motos 4T	Livianas	Gasolina	10.674	276	22	2.283	137
	Medianas	Gasolina	284	6	1	59	3
	Pesadas	Gasolina	485	14	1	105	7
Total			16.851	333	3.528	5.563	200

En la Tabla 3.14 y Figura 3.22 se presentan la estimación de emisiones de contaminantes criterio para la categoría motos. Allí puede verse que a la emisión de contaminantes contribuyen en mayor medida las motos 4T livianas, lo que era de esperarse si se tiene en cuenta que esta sub-categoría representa el 75% de las motos. También sobresale el aporte de las motos 2T a la emisión de CO, VOC y PM2,5, esto debido a la mezcla de gasolina y aceite que se presenta en el motor y a que el principio de funcionamiento del mismo es muy simple si se compara con el motor de 4T (en el motor de dos tiempos la admisión y el escape están integrados en el movimiento de compresión y expansión del pistón).

FIGURA 3.22. DISTRIBUCIÓN DE EMISIONES DE LA CATEGORÍA MOTOS, AÑO 2011



Finalmente, en la Tabla 3.15 se presenta el consolidado de emisiones de cada una de las categorías del parque automotor, de acuerdo al cilindraje y al tipo de combustible utilizado.

TABLA 3.15. EMISIÓN DE CONTAMINANTES CRITERIO CLASIFICADAS DE ACUERDO A LA CATEGORÍA, EL CILINDRAJE Y EL TIPO DE COMBUSTIBLE (Mg), AÑO 2011

Categoría	Cilindraje	Combustible	Emisión de contaminantes criterio (Mg)				
			CO	NO _x	SO _x	VOC	PM2,5
Autos	Liviano	Gasolina	12.449,04	894,98	60,12	1.003,58	5,53
		Diesel	2,06	2,47	0,02	0,91	0,25
		GNV	15.438,22	155,69	0,59	106,65	6,77
	Mediano	Gasolina	11.473,40	1.093,87	69,51	806,20	5,00
		Diesel	116,82	166,31	1,89	30,80	13,74
		GNV	7.336,28	169,27	0,53	43,52	1,91
	Pesado	Gasolina	1.662,26	236,44	12,50	138,01	0,72
		Diesel	8,56	7,06	0,10	3,84	0,90
		GNV	4.715,48	93,27	0,26	38,93	1,62
Taxis	Liviano	Gasolina	1.642,57	383,35	54,19	96,90	4,31
		GNV	1.098,76	169,85	1,12	2,48	0,65
	Mediano	Gasolina	82,96	27,21	2,13	4,37	0,14
		Diesel	13,52	16,71	0,20	5,91	1,58
		GNV	247,24	27,28	0,09	0,55	0,05
Buses	Liviano	Gasolina	3.616,67	123,98	3,85	305,53	2,01
		Diesel	1.015,63	730,26	2,41	141,86	20,76
		GNV	520,35	6,55	0,11	1,74	0,07
	Mediano	Gasolina	181,96	2,19	0,35	10,40	0,13
		Diesel	1.935,23	2.390,52	7,64	408,32	65,16
		GNV	3.539,76	20,98	0,10	12,15	0,15
	Pesado	Gasolina	1.467,78	24,72	0,58	105,06	0,43
		Diesel	1.124,22	909,46	1,91	202,03	33,88
Camiones	Liviano	Gasolina	2.564,46	30,71	0,44	165,84	0,89
		Diesel	412,33	401,60	1,57	87,45	44,80
		GNV	2.341,73	8,34	0,02	8,57	0,15
	Mediano	Gasolina	19.358,16	203,63	3,17	1.219,65	5,00
		Diesel	4.027,62	3.402,82	9,35	787,97	396,95
		GNV	8.603,78	34,51	0,13	30,86	0,56
	Pesado	Gasolina	5.553,75	66,52	4,04	359,45	1,85
		Diesel	4.648,28	4.108,33	12,52	840,73	300,32

TABLA 3.15. CONTINUACIÓN.

Categoría	Cilindraje	Combustible	Emisión de contaminantes criterio (Mg)				
			CO	NO _x	SO _x	VOC	PM2,5
Motos 2T	Livianas	Gasolina	5.408,21	6,48	3,26	2.366,04	52,97
Motos 4T	Livianas	Gasolina	10.674,21	276,09	22,27	2.282,91	137,11
	Medianas	Gasolina	283,88	5,75	0,57	58,58	2,93
	Pesadas	Gasolina	484,98	13,67	1,11	104,89	6,85
Total			134.050	16.211	279	11.783	1.116

3.3.3 Emisiones de gases de efecto invernadero, GEI

En esta sección se presentan la estimación de emisiones de tres gases de efecto invernadero (GEI), ellos son: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). En la Tabla 3.17 se presentan las respectivas emisiones de estos tres contaminantes de acuerdo al tipo de combustible utilizado, y las emisiones de CO₂ equivalente de acuerdo a los potenciales de calentamiento global (GWP, global warming potential) presentados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático en el Cuarto Informe de Evaluación, AR4, (ver Tabla 3.16).

TABLA 3.16. POTENCIALES DE CALENTAMIENTO GLOBAL

Gas de efecto invernadero	Fórmula molecular	GWP en 100 años (SAR)	GWP en 100 años (AR4)
Dióxido de carbono	CO ₂	1	1
Metano	CH ₄	21	25
Óxido nitroso	N ₂ O	310	298

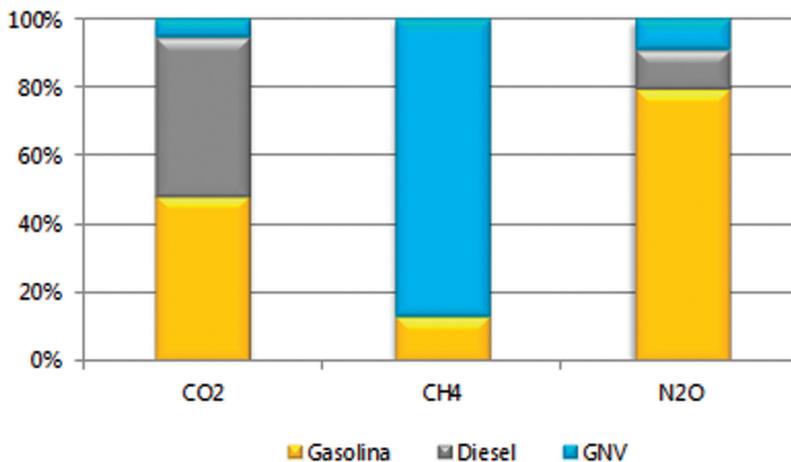
El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) refinó los valores GWP en el Fourth Assessment Report (AR4) a partir de los valores usados en el Second Assessment Report (SAR).

TABLA 3.17. EMISIÓN DE GEI POR TIPO DE COMBUSTIBLE (Mg), AÑO 2011

Combustible	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Gasolina	1.258.299	1.233	42
Diesel	1.193.620	0	6
GNV	136.039	7.641	5
Total	2.587.957	8.874	53
Total CO ₂ -eq	2.825.556		

Los resultados muestran que a las emisiones de CO₂ contribuyen la gasolina con un 49%, el diesel con un 46% y el GNV con el 5% restante, valores similares a la distribución de la demanda energética por tipo de combustible, cuyos valores para la gasolina, el diesel y el GNV son respectivamente del 48,5%, 45% y 6,5%. Mientras tanto las emisiones de CH₄ se encuentran dominadas por el GNV, debido a que este combustible es una mezcla de hidrocarburos livianos, en su mayor parte metano y etano, y en menor proporción por propano, butanos, pentanos e hidrocarburos más pesados. En cuanto al N₂O, sus emisiones se encuentran dominadas por la gasolina en un 80%, por el diesel en un 11% y por el GNV en un 9%.

FIGURA 3.23. DISTRIBUCIÓN DE EMISIONES DE GEI POR TIPO DE COMBUSTIBLE, AÑO 2011

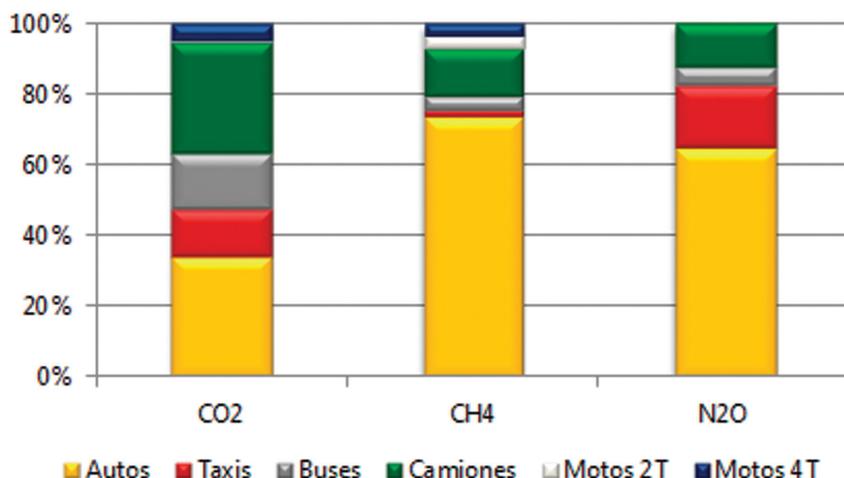


Finalmente, en la Tabla 3.18 y Figura 3.24 se presentan la estimación de emisiones de GEI calculadas a través del modelo LEAP y clasificadas por categoría vehicular. Los resultados muestran que los autos son los principales responsables de las emisiones de CH₄ con un aporte del 74%, mientras los camiones aportan el 13%. En lo relacionado con el N₂O, los autos son nuevamente los principales contribuyentes con un aporte de más del 60%, mientras los taxis aportan el 17% y los camiones el 12%. En cuanto al CO₂, son los autos y los camiones los principales aportantes con contribuciones del 34% y 31% respectivamente, le siguen los buses y los taxis con el 16% y el 14%, y por último se encuentran las motos con aportando el 6% restante.

TABLA 3.18. EMISIÓN DE GEI POR CATEGORÍA VEHICULAR (Mg), AÑO 2011

Categoría	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Autos	878.845	6.530	34
Taxis	359.615	132	9
Buses	414.266	400	3
Camiones	791.409	1.182	7
Motos 2T	17.234	310	0
Motos 4T	126.588	320	0
Total	2.587.957	8.874	53

FIGURA 3.24. DISTRIBUCIÓN DE EMISIONES DE GEI POR CATEGORÍA VEHICULAR, AÑO 2011



Por último, en la Tabla 3.19 se presentan las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O discriminadas de acuerdo a la categoría vehicular, el cilindraje y el tipo de combustible.

TABLA 3.19. EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO CLASIFICADAS DE ACUERDO A LA CATEGORÍA, EL CILINDRAJE Y EL TIPO DE COMBUSTIBLE (Mg), AÑO 2011

Categoría	Cilindraje	Combustible	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Autos	Liviano	Gasolina	317.762,05	166,48	6,97
		Diesel	717,92	0,00	0,00
		GNV	27.374,32	3.493,74	0,47
	Mediano	Gasolina	367.349,22	134,38	19,63
		Diesel	59.922,14	0,00	0,24
		GNV	24.354,93	1.432,37	1,18
	Pesado	Gasolina	66.053,28	23,42	4,80
		Diesel	3.308,56	0,00	0,02
		GNV	12.002,56	1.279,21	0,93
Taxis	Liviano	Gasolina	286.403,39	19,35	6,94
		GNV	51.716,66	92,22	1,34
	Mediano	Gasolina	11.236,30	0,86	0,64
		Diesel	6.230,92	0,00	0,02
		GNV	4.027,82	19,74	0,26

TABLA 3.19. CONTINUACIÓN

Categoría	Cilindraje	Combustible	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Buses	Liviano	Gasolina	20.340,98	36,46	0,42
		Diesel	76.330,98	0,00	0,17
		GNV	4.911,95	48,74	0,17
	Mediano	Gasolina	1.864,81	1,31	0,12
		Diesel	242.378,29	0,00	1,18
		GNV	4.719,45	301,17	0,28
	Pesado	Gasolina	3.041,07	12,57	0,18
		Diesel	60.678,14	0,00	0,34
	Camiones	Liviano	Gasolina	2.331,80	19,71
Diesel			49.859,46	0,00	0,11
GNV			1.109,43	211,21	0,01
Mediano		Gasolina	16.752,82	145,21	0,59
		Diesel	296.776,96	0,00	1,48
		GNV	5.821,98	762,38	0,28
Pesado		Gasolina	21.340,61	43,39	1,80
		Diesel	397.416,19	0,00	2,23
Motos 2T		Livianas	Gasolina	17.234,35	309,73
Motos 4T	Livianas	Gasolina	117.670,41	298,79	0,00
	Medianas	Gasolina	3.033,99	7,67	0,00
	Pesadas	Gasolina	5.883,45	13,73	0,00
Total			2.587.957	8.874	53

3.4 Análisis retrospectivo de emisiones

Este análisis retrospectivo de emisiones pretende analizar la emisión de contaminantes originada por fuentes móviles en el periodo 2000-2011, lo que permitirá estudiar el crecimiento del parque automotor en la última década y la variación en las emisiones, la cual se encuentra influenciada por las nuevas tecnologías vehiculares, la mejora de los combustibles y el crecimiento vehicular.

3.4.1 Datos de entrada para el modelo LEAP

La estimación de emisiones para el periodo 2000-2010 se realiza en el modelo LEAP de manera similar a como se estimó el año base 2011, es decir, se crea un archivo para cada año de estudio, y por lo tanto se requieren los mismos datos de entrada, los cuales son:

- Existencias y ventas de vehículos;
- Existencias y ventas de vehículos de acuerdo a los rangos de cilindraje y al tipo de combustible utilizado;
- Perfil de antigüedad de la flota;
- Kilometraje anual;
- Rendimiento del combustible;
- Factores de emisión;

Los ítems a), b) y c) se obtienen a partir de los datos suministrados por las secretarías de transporte y tránsito, por la Subdirección de Movilidad del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y por los Centros de Diagnóstico Automotor a través de esta misma entidad. La obtención de la información para cada año se hace teniendo en cuentas los datos del año en estudio y los años inferiores.

El ítem d) se estima a partir de los kilometrajes vehiculares anuales en el año base 2011 ajustados de acuerdo a la demanda energética de cada año. Es importante anotar que a medida que avanzaba cada año modelado fue necesario disminuir el kilometraje por vehículo con el fin de ajustar la demanda energética, sin embargo el total de kilómetros recorridos por año va en aumento, tal y como se presenta en la Tabla 3.20.

TABLA 3.20. KILOMETRAJE TOTAL ANUAL RECORRIDO POR EL PARQUE AUTOMOTOR DEL VALLE DE ABURRÁ

Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
km (millones)	6.032	6.017	6.084	6.290	6.400	6.881	7.540	8.152	8.772	9.009	9.609	9.746

En cuanto al ítem e) y f) éstos se obtienen del modelo IVE de acuerdo a las tecnologías vehiculares disponibles en el año de estudio. Aquí es importante mencionar los factores de emisión de SO₂ que varían de acuerdo al contenido de azufre en el combustible, así los factores de emisión usados para el periodo de análisis se presentan en la Tabla 3.21.

TABLA 3.21. FACTORES DE EMISIÓN DE SO₂ EN EL PERIODO 2000-2010

	Gasolina		Diesel						GNV
	2000	2011	2000	2007	2008	2009	2010	2011	2000
S (ppm)	1000	300	4500	4000	3000	2500	500	50	27
FE SO ₂ (kg/TJ)	44,42	13,33	204,62	181,88	136,41	113,68	22,74	2,27	1,15

3.4.2 Resultados

A continuación se presentan los resultados relacionados con la evolución del parque automotor, la demanda energética, y las emisiones de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero en el Valle de Aburrá para el periodo 2000-2011, obtenidos a través del modelo LEAP.

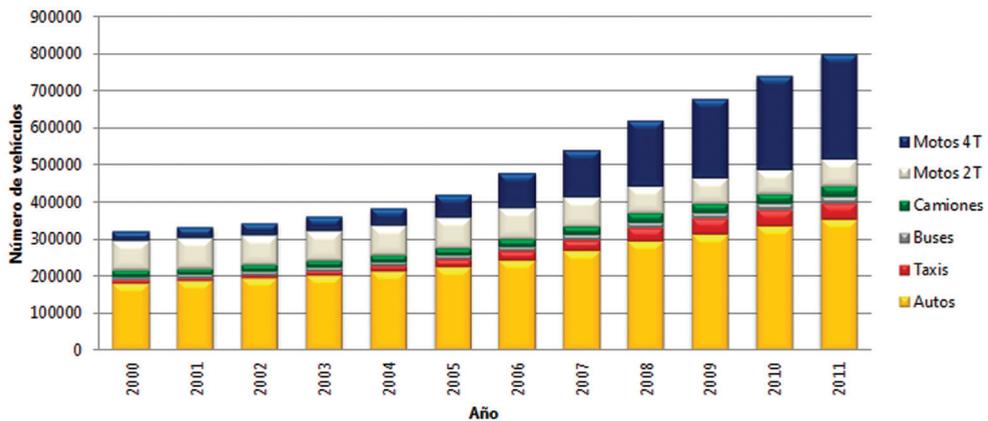
3.4.2.1 Evolución del parque automotor

En la Tabla 3.22 y en la Figura 3.25 se presenta la evolución del parque automotor del Valle de Aburrá en la última década. El análisis de estas cifras 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 4T con tasas anuales del 18% y el 27%, 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%. En otras palabras, mientras en el año 2011 el número de autos es casi dos veces la cantidad que había en el año 2000, el número de taxis es cinco veces el valor del año 2000, y el número de motos 4T es casi diez veces la cantidad que había en el año 2000.

TABLA 3.22. PARQUE AUTOMOTOR DEL VALLE DE ABURRÁ, PERIODO 2000-2011

Categoría	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Autos	183.362	188.084	194.945	204.099	214.212	226.109	244.046	269.612	292.993	314.099	332.883	350.824
Taxis	8.834	9.304	10.312	12.048	13.951	20.029	23.819	28.464	38.573	41.004	45.251	46.356
Buses	8.667	8.916	9.313	9.807	10.538	11.355	12.259	13.489	14.555	15.466	16.094	17.255
Camiones	16.978	17.162	17.386	17.753	18.175	18.728	19.946	22.463	24.586	25.690	26.538	29.267
Motos 2T	80.602	80.189	80.304	80.848	80.263	83.341	84.508	78.770	73.261	68.361	65.393	71.352
Motos 4T	26.212	29.422	32.316	37.215	47.583	63.458	95.813	129.142	177.493	215.260	255.650	282.515
Total	324.655	333.077	344.576	361.770	384.722	423.020	480.391	541.940	621.461	679.880	741.809	797.569

FIGURA 3.25. CRECIMIENTO DEL PARQUE AUTOMOTOR, PERIODO 2000-2011



Es importante anotar que la tasa de motorización en el Valle de Aburrá para el año 2011 es de 98 autos/1.000 habitantes y de 99 motocicletas/1.000 habitantes. Para algunas ciudades de Latinoamérica, las tasas de motorización de autos y motos se presentan en la Tabla 3.23. Allí puede verse que Sao Paulo posee la mayor tasa de motorización por autos mientras el Valle de Aburrá posee la mayor tasa de motorización por motocicletas.

TABLA 3.23. TASA DE MOTORIZACIÓN EN ALGUNAS CIUDADES DE LATINOAMÉRICA

Ciudad	Tasa de motorización	
	Autos/1000 habitantes	Motos/1000 habitantes
Sao Paulo, Brasil (2001)	223	28
Buenos Aires, Argentina (2006)	182	-
Bogotá, Colombia (2008)	107	16
Valle de Aburrá, Colombia (2011)	98	99
Lima, Perú (2003)	37	-

Fuente: Dawidowski et al. Actual and prospective on road vehicles emission inventories in five latinamerican megacities. In preparation.

Otras ciudades de países en desarrollo reconocidas por sus altas tasas de motorización, como Singapur y Guangzhou en China reportan valores de 143 autos/1.000 habitantes para el año 2010 (Han, 2010), y 200 autos/1.000 habitantes para el año 2011 (Zacharias, 2012).

3.4.2.2 Evolución de la demanda energética

En esta sección se presenta la demanda energética del parque automotor del Valle de Aburrá relacionada con el consumo de gasolina, diesel y gas natural vehicular a través de la última década. La información fue proporcionada por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y por Empresas Públicas de Medellín (EPM), en la Tabla 3.24 se presenta la información proporcionada por estas entidades (es importante aclarar que el consumo de gasolina y diesel para los años 2000 a 2003, fue extrapolado pues no se tenía información para esos años).

TABLA 3.24. CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN EL VALLE DE ABURRÁ,
PERIODO 2000-2011

Año	Gasolina ¹ (galones)	Diesel ¹ (galones)	GNV ² (m ³)
2000	154.842.760	82.011.797	0
2001	152.340.175	85.940.976	1.701.612
2002	149.837.590	89.870.156	3.851.758
2003	146.840.589	94.134.343	9.548.223
2004	146.579.577	97.607.342	17.836.156
2005	140.982.811	100.532.162	29.993.459
2006	139.280.704	105.738.715	51.909.727
2007	137.942.271	111.398.635	65.450.458
2008	134.845.298	112.322.515	66.997.631
2009	135.703.036	106.826.450	61.291.013
2010	140.662.249	109.601.018	50.575.243
2011	142.732.098	113.618.401	59.179.277

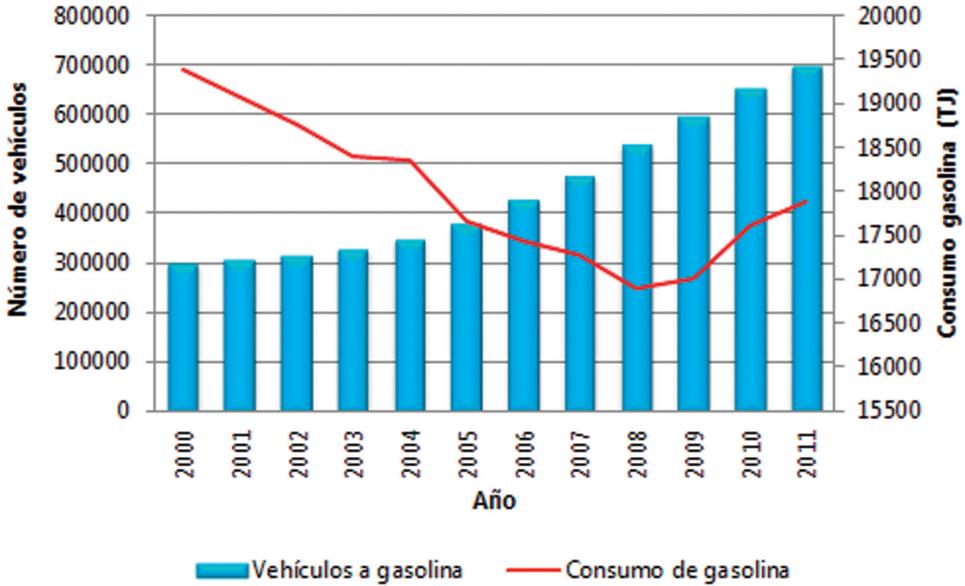
¹ UPME. ² EPM.

Con la información sobre consumo de combustible es posible analizar el comportamiento de la demanda energética y el crecimiento vehicular. En la Figura 3.26 se puede observar el número de vehículos a gasolina y el consumo de ese mismo combustible en el periodo 2000-2011; allí puede verse que a pesar del crecimiento sostenido de este tipo de vehículos la demanda de gasolina presentó una disminución continuada entre el año 2000 y el 2008, y solo en el año 2009 comenzó a aumentar la demanda aunque sin alcanzar los valores de los primeros años (en el año 2000 la demanda energética era cercana a los 19.500 TJ y se tenía menos de la mitad de los vehículos que hay en 2011, año en el cual la demanda de gasolina se aproxima a los 17.800 TJ). Algunas de las causas de esta disminución sostenida pueden ser:

- En el año 2001 comienza a ofrecerse un combustible alternativo a los otros combustibles fósiles, el gas natural vehicular, que hace competencia directa a la gasolina pues es presentado como un combustible limpio y además económicamente más favorable.
- El aumento continuo en el precio de la gasolina, haciendo que Colombia tenga una de las gasolinas más caras en Latinoamérica (Federación Nacional de Distribuidores de Combustibles y Energéticos, 2011), desincentiva su consumo por parte de los usuarios.
- Las crisis económicas mundiales desaceleran la economía nacional.
- Medidas de restricción vehicular como el pico y placa, hace que disminuyan los kilómetros recorridos por los vehículos a gasolina, y por ende el consumo de este energético.
- Las mejores tecnologías vehiculares traen consigo el aumento en el rendimiento del combustible (km/gal).
- Los programas de inspección y mantenimiento que se han venido reglamentando desde la expedición de la Ley 762 de 2002 (Código Nacional de Tránsito Terrestre), reformada por la Ley 1383 de 2010, han hecho que los vehículos mantengan mejores condiciones de operación y por ende mantengan un mejor rendimiento de combustible.

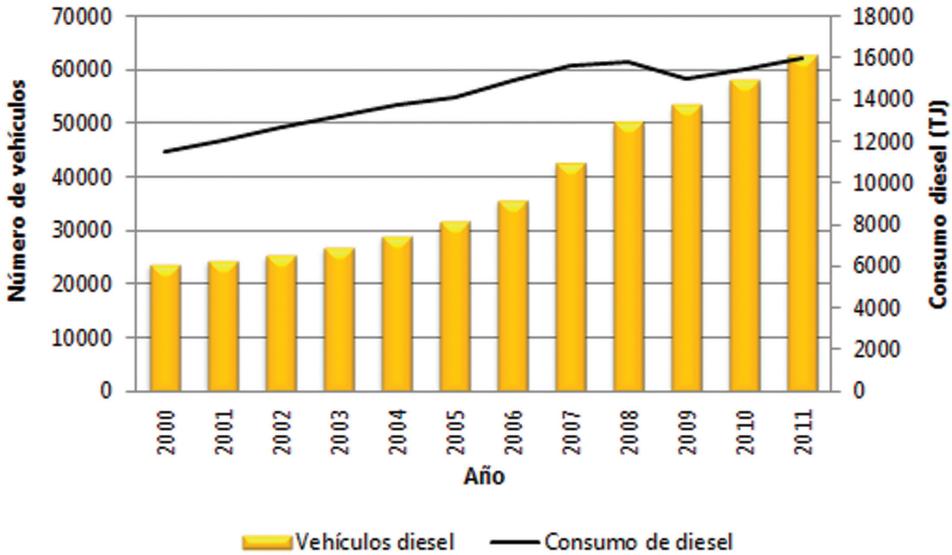
Como se mencionó anteriormente, en el año 2009 empieza nuevamente a recuperarse la demanda de gasolina, pues los motivos mencionados anteriormente no logran compensar el crecimiento sostenido del número de vehículos a gasolina.

FIGURA 3.26. EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE VEHÍCULOS A GASOLINA Y DEMANDA ENERGÉTICA DE GASOLINA



En el caso de los vehículos diesel y el consumo de este combustible, su comportamiento en el periodo de estudio se presenta en la Figura 3.27, donde puede verse que la demanda de diesel ha sido proporcional al crecimiento de los vehículos que usan este combustible fósil, con una leve desaceleración en el año 2009, que si se relaciona con el comportamiento del consumo de gasolina (en 2009 empezó nuevamente su crecimiento) podría hacer pensar en el traslado de usuarios de transporte público hacia el transporte privado, o en otras causas como la crisis financiera de 2008, que repercutió en el país al año siguiente.

FIGURA 3.27. EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE VEHÍCULOS DIESEL Y DEMANDA ENERGÉTICA DE DIESEL

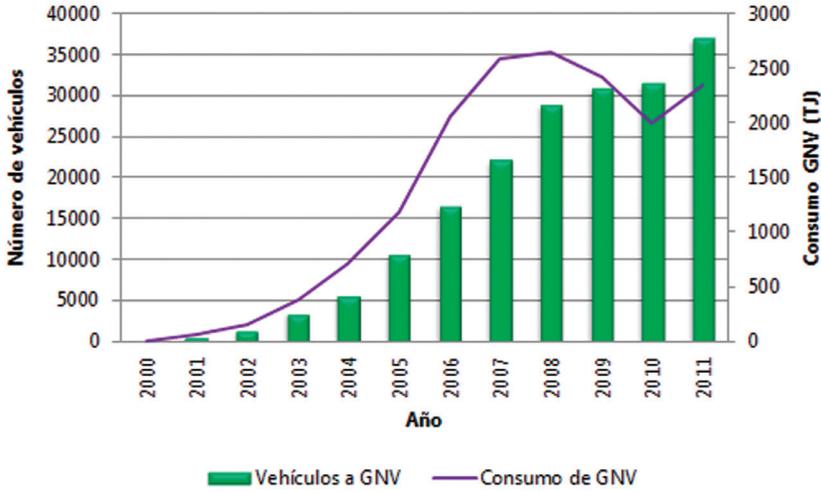


En cuanto al gas natural vehicular tanto el crecimiento de los vehículos a GNV como el consumo de este combustible presentan un crecimiento exponencial que se ve interrumpido en los años 2009 y 2010, pero que comienza a recuperarse nuevamente en el año 2011 (ver Figura 3.28). Al parecer dicha situación fue causada por las técnicas de reconversión vehicular que ocasionaron problemas en los usuarios e hicieron que algunos volvieran a la gasolina.

3.4.2.3 Evolución de las emisiones de contaminantes criterio

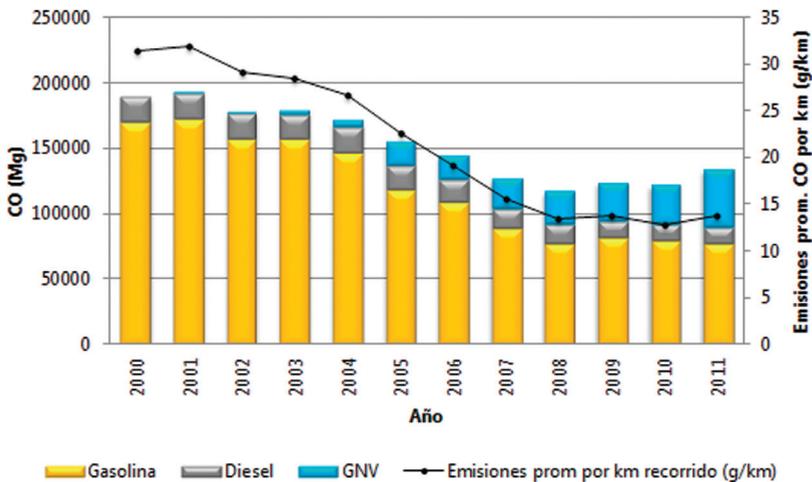
La evolución de las emisiones de monóxido de carbono muestra un comportamiento decreciente hasta el año 2008 (ver Figura 3.29), debido a que las emisiones de este contaminante se encuentran dominadas por la gasolina, combustible que como se vio en la sección anterior presentó una tendencia hacia la disminución hasta el año 2008, y a partir de ahí comenzó nuevamente una demanda lenta pero en aumento. Luego, como consecuencia de esto disminuyeron las emisiones de CO hasta el año 2008, pero en ese momento también comienza a darse una contribución importante del GNV a las emisiones de CO, lo que ha ocasionado que sus emisiones tengan nuevamente una tendencia moderada hacia el alza. En cuanto al diesel, su aporte a las emisiones de CO se ha mantenido casi constante y alrededor del 11%.

FIGURA 3.28. EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE VEHÍCULOS A GNV Y DEMANDA ENERGÉTICA DE GNV



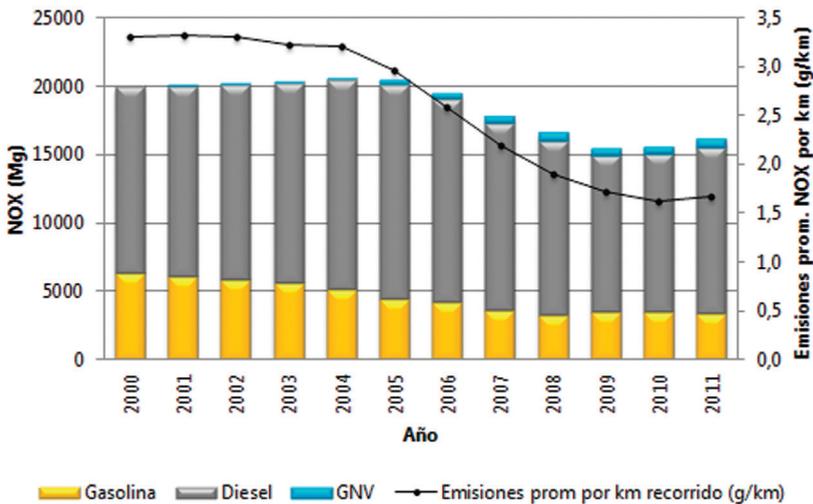
En la Figura 3.29 también puede apreciarse cómo han disminuido a lo largo de década las emisiones promedio de CO por kilómetro recorrido, debido a la disminución en el consumo de gasolina y a las mejores tecnologías vehiculares disponibles con el paso del tiempo.

FIGURA 3.29. EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO)



En cuanto a las emisiones de NO_x , en la Figura 3.30 puede observarse que éstas se encuentran dominadas por el diesel en una proporción aproximada del 74% durante todo el periodo, mientras la gasolina aporta un promedio del 24% y el GNV el 2% restante. En lo relacionado con las emisiones, ellas se mantuvieron casi constantes entre los años 2000 y 2005, periodo en el cual las emisiones de NO_x de la gasolina presentaron una leve disminución y las emisiones por parte del diesel un ligero aumento. El panorama cambia a partir del año 2006, cuando comienzan a disminuir las emisiones de NO_x provenientes del diesel, fenómeno que ocurre hasta el año 2009, pues a partir del año siguiente comienzan a incrementarse nuevamente las emisiones del contaminante. Tal comportamiento se debe a la introducción de mejores tecnologías vehiculares en los automotores que traen consigo menores emisiones de contaminantes criterio, sin embargo, el incremento en el número de vehículos hace que las emisiones vayan nuevamente hacia arriba.

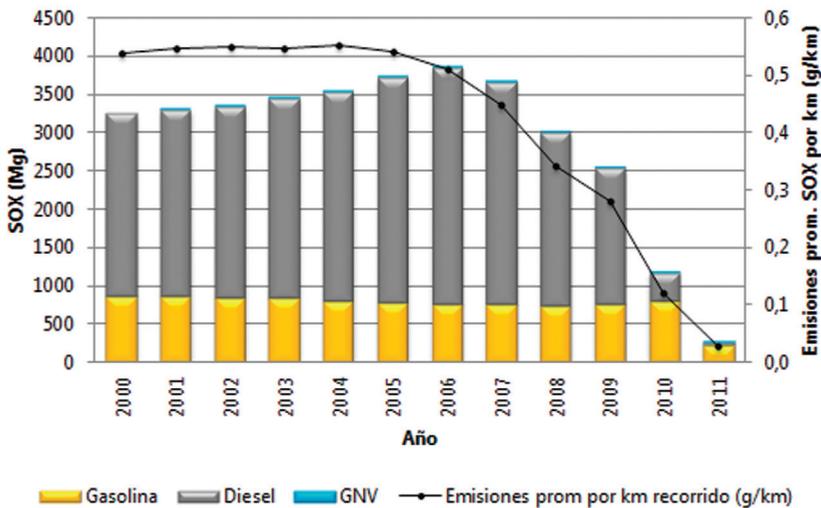
FIGURA 3.30. EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO_x)



La evolución de las emisiones de óxido de azufre se encuentra marcada por el calendario de mejoramiento de los combustibles, el cual se aceleró respecto al calendario nacional gracias a los esfuerzos del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, la Alcaldía de Medellín y Ecopetrol, entidades que preocupadas por la calidad del aire de la región decidieron firmar un convenio con com-

promisos especiales sobre los contenidos de azufre en el diesel y la gasolina. Es así como se ve un aumento sostenido de las emisiones de SO_x hasta el año 2006 cuando se contaba con 4.500 ppm S en el diesel y 1000 ppm S en la gasolina, para el año 2007 el contenido de azufre en el diesel bajó a 4.000 ppm, y así cada año siguió disminuyendo su contenido a 3.000 ppm, 2.500 ppm, 500 ppm y 50 ppm hasta el año 2011. En cuanto a la gasolina, el contenido de azufre en ella se mantuvo en 1000 ppm hasta el año 2011, año en el cual bajó su contenido a 300 ppm. De este modo las emisiones de óxido de azufre pasaron de un pico máximo de 3.853 toneladas en 2006, a 279 toneladas en 2011, lo que implica una reducción del 93% en las emisiones de SO_x .

FIGURA 3.31. EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES DE ÓXIDOS DE AZUFRE (SO_x)



La evolución de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles está marcada por la disminución en el consumo de gasolina, pues como puede observarse en la Figura 3.32 la gasolina es la principal aportante a las emisiones de VOC, contribuyendo durante el periodo de estudio con aproximadamente el 80% de las emisiones, mientras el diesel aporta cerca del 20% y el GNV hace un aporte poco significativo. Así, las emisiones de VOC presentan una tendencia a la baja en el periodo 2000-2011, y por ende sus emisiones promedio por kilómetro recorrido también lo hicieron.

FIGURA 3.32. EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (VOC)

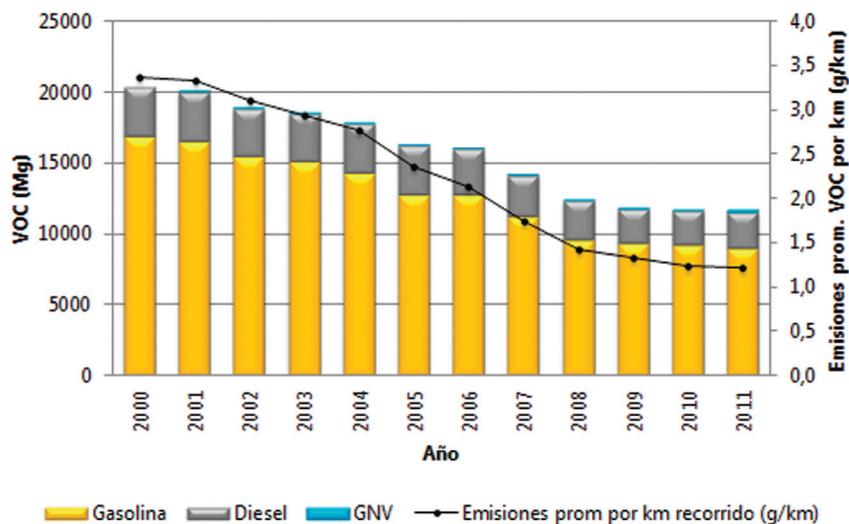
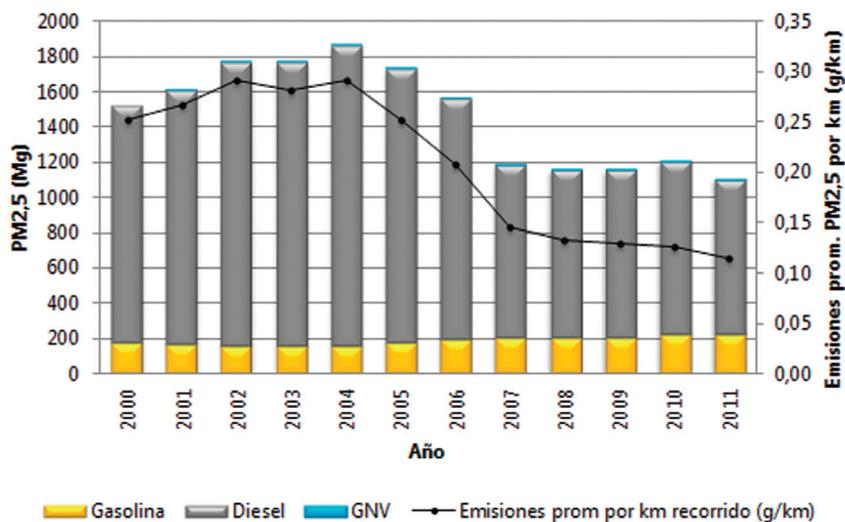


FIGURA 3.33. EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO FINO (PM2,5)



Finalmente, en la Figura 3.33 se presenta la evolución de las emisiones de PM_{2,5}, que como era de esperarse se encuentran dominadas por el combustible diesel. En cuanto a su comportamiento, este mostró una tendencia creciente hasta el año 2004 y a partir del año siguiente las emisiones empezaron a decrecer debido a la mejora en las tecnologías vehiculares y la disminución en el kilometraje recorrido por este tipo de vehículos.

En el Anexo A se presentan las emisiones estimadas a través del modelo LEAP de contaminantes criterio para el periodo 2000-2011, discriminadas de acuerdo a la categoría vehicular, el tamaño y el tipo de combustible.

3.4.2.4 Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero

En esta sección se presenta la evolución de las emisiones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso, durante el periodo 2000-2011. El análisis de la Figura 3.34 indica que las emisiones de CO₂ han presentado una tendencia lenta pero creciente, en la cual la gasolina es la responsable de aproximadamente el 54% de las emisiones, mientras el diesel aporta cerca del 43% y el GNV el 3% restante. También puede observarse que las emisiones promedio de CO₂ por kilómetro recorrido han venido disminuyendo a través del periodo de estudio, debido al aumento en el rendimiento del combustible y otros motivos como los que se mencionaron en la sección anterior, que han hecho que el consumo de combustible por número de vehículos del parque sea cada vez menor.

En cuanto a la evolución de las emisiones de CH₄, en la Figura 3.35 se presenta la tendencia de sus emisiones, que como puede verse tiene como principal aportante al GNV, que pasó de contribuir con 20 toneladas (o mega gramos) en el año 2001 a emitir 7.641 toneladas en el año 2011, para un aumento total en las emisiones del 385%.

FIGURA 3.34. EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)

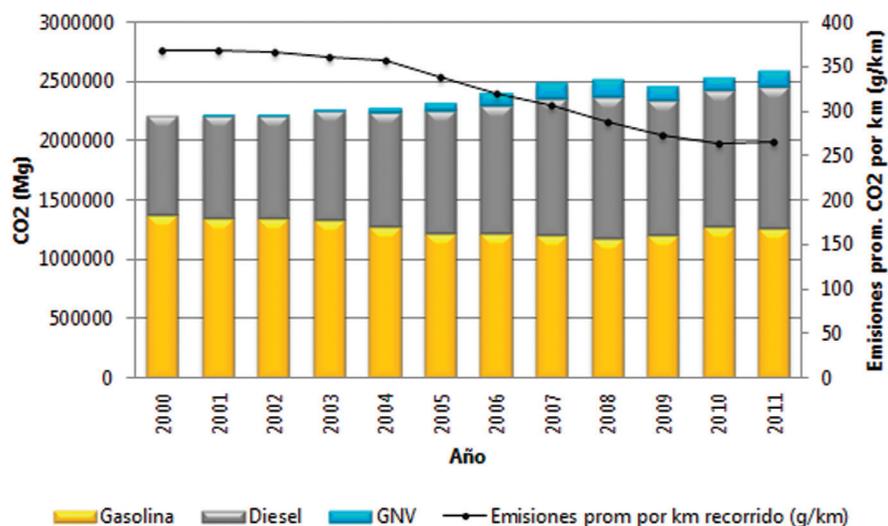
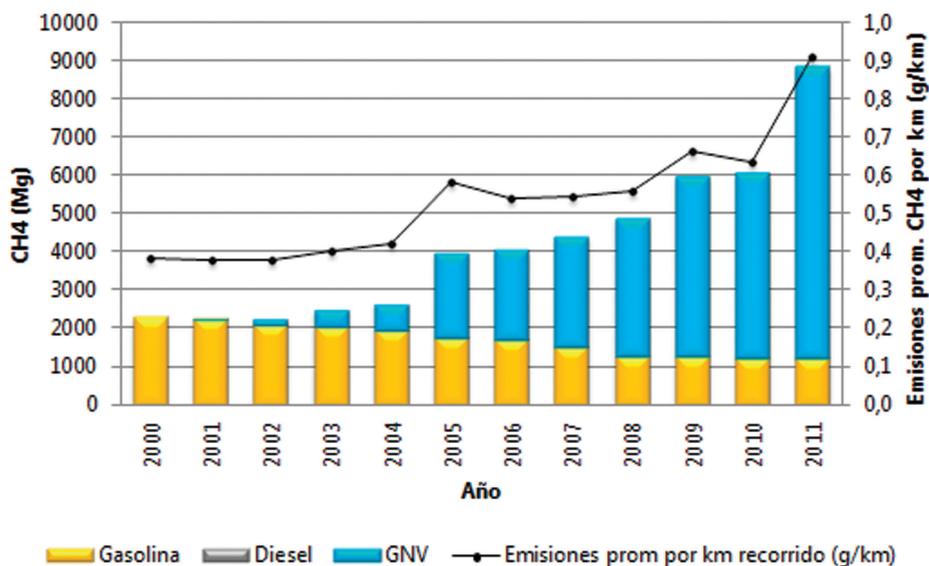
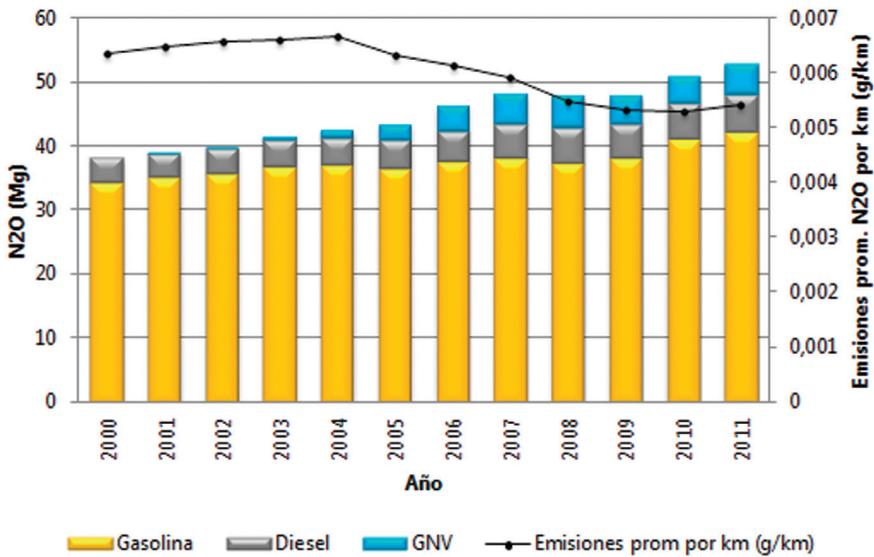


FIGURA 3.35. EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES DE METANO (CH₄)

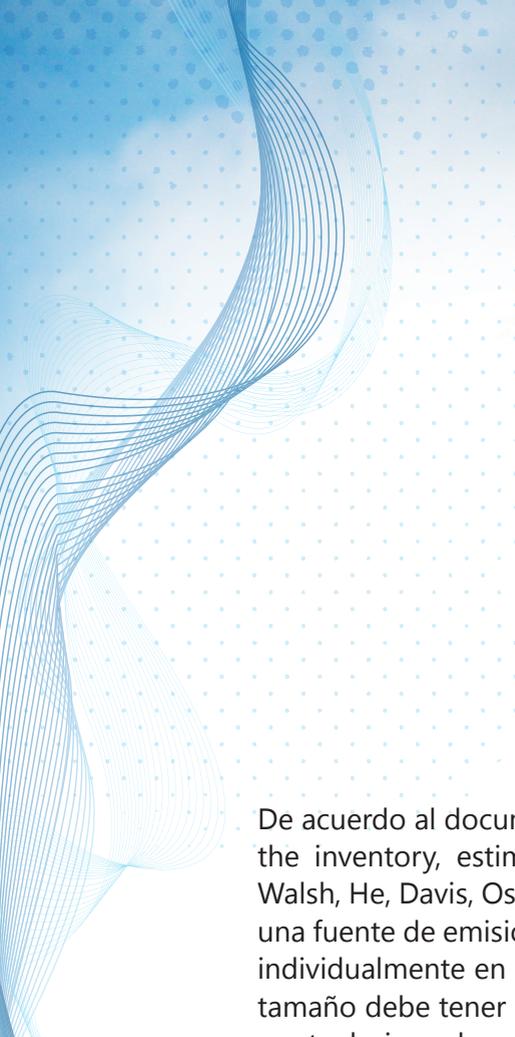


Finalmente, en la Figura 3.36 se muestra la evolución de las emisiones de óxido nitroso durante la última década; estas emisiones han ido en aumento y es la gasolina la responsable de cerca del 84% de las emisiones, mientras el diesel aportó en promedio el 10% y el GNV el 6% restante. A pesar de que las emisiones totales del contaminante tienen una tendencia creciente, las emisiones promedio de N_2O por kilómetro recorrido han venido disminuyendo a través de los años.

FIGURA 3.36. EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES DE ÓXIDO NITROSO (N_2O)



En el Anexo B se presentan las emisiones estimadas de gases de efecto invernadero para el periodo 2000-2011, discriminadas de acuerdo a la categoría vehicular, el tamaño y el tipo de combustible.



4. Fuentes **fijas**

De acuerdo al documento "Air Quality Management: the framework, the inventory, estimating emissions from mobile sources" (Lents, Walsh, He, Davis, Osses, & Tolvett, 2008), una fuente fija o puntual es una fuente de emisión lo suficientemente grande para ser clasificada individualmente en una región y no hay una definición clara de qué tamaño debe tener una fuente para ser clasificada como una fuente puntual, sin embargo, afirma el documento, un indicador usado comúnmente es el total de emisiones relacionado con su localización, por ejemplo una fuente puede ser clasificada como puntual si emite más de 1, 10, 100 o 250 toneladas al año de determinado contaminante. A su vez, el documento define una fuente de área como una fuente muy pequeña para ser considerada individualmente, por lo que se pueden considerar en un grupo con características similares; un ejemplo de este tipo de fuentes es la aplicación de pintura y las estaciones de servicio de combustibles, que son tratadas como fuentes de área.

En el Valle de Aburrá no se ha definido el tamaño que debe tener una fuente para ser clasificada como fuente fija, simplemente se ha catalogado como fuente puntual todo dispositivo o proceso que emita contaminantes al aire a través de una chimenea. Sin embargo, teniendo en cuenta el gran número de equipos o procesos con ductos de descarga que se encontraron durante la recopilación de informa-

ción, para los inventarios de emisiones futuros debe definirse un grupo de criterios que permitan clasificar esas fuentes como fijas y de área, lo que a su vez facilitará las acciones de control y vigilancia sobre ellas.

4.1 Metodología

La estimación de emisiones de fuentes fijas en este estudio se basa en el uso de factores de emisión, los cuales son valores representativos de la cantidad de un contaminante liberado a la atmósfera por una fuente específica en función del nivel de actividad.

Los factores de emisión utilizados son los que la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) ha compilado para una gran variedad de fuentes y niveles de actividad (como producción o consumo), y cuyos resultados son reportados en el *AP-42 Compilation of Air Pollution Emission Factor*, específicamente en el Volumen I (5° edición) que incluye factores de emisión para fuentes fijas y fuentes de área (U.S Environmental Protection Agency, 1995).

Estos factores de emisión se expresan normalmente como la masa del contaminante dividido por una unidad de masa, volumen, distancia o duración de la actividad de emisión del contaminante, por ejemplo, kilogramos de partículas emitidas por mega-gramo de carbón quemado. En la mayoría de los casos, los factores de emisión son promedios de todos los datos disponibles de calidad aceptable, y en general se supone que sea representativo de los promedios a largo plazo para todas las instalaciones de categoría de fuente (U.S Environmental Protection Agency, 1995). La ecuación general para la estimación de emisiones es:

$$\text{Ecuación 4.1} \quad E = A \times EF \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right)$$

Donde:

E es la emisión.

A es el nivel de actividad.

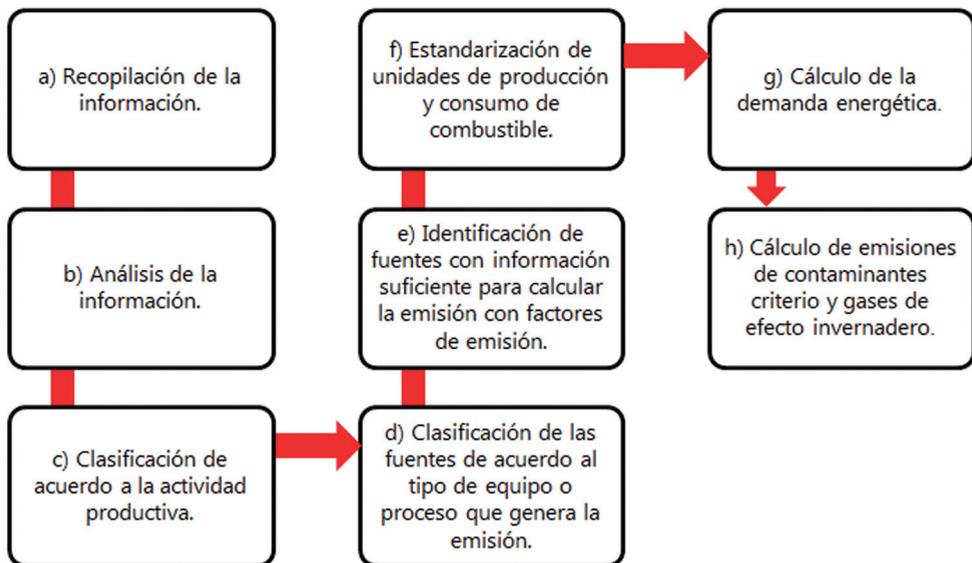
EF es el factor de emisión.

ER es la eficiencia del equipo de control de emisiones, %.

Es importante anotar que además de los factores de emisión del AP-42, fue necesario utilizar algunos factores de emisión publicados por la Agencia Ambiental Europea (EMEP, por sus siglas en inglés) en conjunto con el Programa cooperativo para el monitoreo y la evaluación de contaminantes del aire de largo alcance de transmisión (EMEP, por sus siglas en inglés).

Teniendo claro que la estimación de emisión de fuentes fijas utiliza el método basado en factores de emisión, en la Figura 4.1 se presenta un esquema resumen de las actividades llevadas a cabo para la elaboración del inventario de fuentes fijas y más adelante se describe en qué consistió cada una de esas actividades.

FIGURA 4.1. ACTIVIDADES REALIZADAS PARA LA ELABORACIÓN DEL INVENTARIO DE FUENTES FIJAS



a. Recopilación de la información

La información concerniente a las fuentes fijas ubicadas en el Valle de Aburrá se recopiló a través de la revisión de expedientes en el Archivo Ambiental del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Para esto, dicha Entidad contrató a la empresa Gestión Ambiental y Medio Ambientes (GEMA), que en el marco del Contrato 508 de 2012 tenía esta actividad como una de sus obligaciones;

de esta manera, GEMA recopiló la información de 384 empresas con un total de 1.469 fuentes.

b. Análisis de la información

Después de que toda la información fue recopilada, fue necesario depurarla pues en la base de datos se consignó la información de todas las empresas con expediente ambiental en la Entidad que reportaban ductos de descarga, incluyendo empresas liquidadas o en proceso de liquidación y fuentes fuera de funcionamiento o que solo operan en situaciones de emergencia (*stand by*). Así, después de depurar la información quedaron 354 empresas y 1.373 fuentes de emisión.

c. Clasificación de acuerdo a la actividad productiva

Con la información depurada se procede a clasificar las empresas de acuerdo a la actividad productiva, para ellos se definen los doce sectores que se presentan en la Tabla 4.1, y los cuales son susceptibles de realizar descargas a la atmósfera.

TABLA 4.1. ACTIVIDADES PRODUCTIVAS SUSCEPTIBLES DE TENER DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN EL VALLE DE ABURRÁ

Actividad productiva	Descripción
BAT	Bebidas, Alimentos y Tabaco (incluido alimentos para animales).
TXT	Textil y de Confección. Procesamiento y producción de textiles. Incluye procesos de teñido.
CVL	Cerámicos y Vítreos; ladrilleras, alfareras, tejares e industrias de cerámica.
PAP	Papel, Cartón, Pulpa e Impresión.
PCE	Plásticos, Cauchos y Empaques; incluidas reencauchadoras, fabricación y procesamiento de llantas.
MMC	Metalmecánico; fundición y manejo de metales, hierro, metales no ferrosos, producción de maquinaria eléctrica y no eléctrica.
QMC	Química; producción de compuestos químicos, producción de jabones y detergentes, pinturas y resinas.
CUR	Cueros; curtimbres y calzado.
ASF	Derivados del petróleo; producción y procesamiento asfaltos y emulsiones asfálticas, explotación y tratamiento de triturados.
TER	Terciario; incluye empresas del sector terciario, comercial y de servicios que por su actividad posean calderas u hornos eléctricos, por ejemplo, hoteles, hospitales, cementerios, lavanderías y otros.
MAD	Aserriós, depósitos de maderas, e industrias que trabajan la madera.
OTR	Otras Industrias. En este sector se agrupan las industrias que no se pueden clasificar en ninguna de las categorías anteriores.

d. Clasificación de las fuentes de acuerdo al tipo de equipo o proceso que genera la emisión

Ahora se procede a clasificar las fuentes de acuerdo al tipo de equipo o proceso que genera la emisión. Así, para el año 2011 se identificaron las siguientes categorías:

TABLA 4.2. EQUIPOS O PROCESOS GENERADORES DE EMISIONES EN EL VALLE DE ABURRÁ

Tipo de fuente	Descripción
Caldera (CAL)	Equipo de combustión externa que genera vapor a través de una transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia su fase.
Horno (HOR)	Un horno es un dispositivo que genera calor y que lo mantiene dentro de un compartimento cerrado.
Cabina (CAB)	Cuarto aislado para realizar diferentes actividades generadoras de emisiones contaminantes, por ejemplo cabinas de pintura, cabinas de pulido, etc.
Sistemas de captación (CAP)	Sistemas colectores de polvo y otros contaminantes generados en diferentes áreas de trabajo.
Procesos de transferencia de masa (TMA)	Procesos para promover el contacto entre las fases y el desarrollo de la superficie interfacial a través de la cual se produce la transferencia de materia.
Procesos de impresión (IMP)	Procesos para la producción de textos e imágenes sobre una superficie.
Sistemas de extracción (EXT)	Sistema para la evacuación de gases y partículas contaminantes.
Procesos de trituración y/o molienda (TYM)	Dispositivo para la reducción de tamaño de rocas, minerales y otros materiales.
Quemador (QUE)	Dispositivo para quemar combustible líquido, gaseoso o ambos (excepcionalmente también sólido) y producir calor generalmente mediante una llama.
Otros (OTR)	Equipos o dispositivos que no se pueden clasificar en ninguna de las categorías anteriores.

e. Identificación de fuentes con información suficiente para calcular la emisión con factores de emisión

Después de clasificar las empresas de acuerdo a la actividad productiva y las fuentes según el equipo o proceso que genera la emisión, se procede a identificar las fuentes con información suficiente para calcular la emisión con factores de emisión. Por ejemplo, en el caso de combustibles como el carbón, el diesel o el gas natural se debe conocer el consumo de los mismos

en determinado periodo de tiempo; en el caso de procesos como fabricación de ladrillos se debe saber la producción de ladrillos (en masa) en un periodo de tiempo determinado.

f. Estandarización de unidades de producción y consumo

Cuando se tienen identificadas las fuentes con suficiente información para calcular sus emisiones con factores de emisión, se procede a estandarizar las unidades de producción y consumo de combustible de acuerdo al nivel de actividad del factor de emisión. Por ejemplo, el nivel de actividad para la combustión de carbón es el consumo de carbón en mega-gramos (Mg), para la combustión de gas natural es el consumo de gas en metros cúbicos (m³) y para la combustión de biomasa es la energía disponible en ella, en giga-joules (GJ); el nivel de actividad para la fabricación de pan es la producción de pan en mega-gramos (Mg) y para la impresión de superficies es la cantidad de tinta utilizada en kilogramos (kg).

En cuanto a la unidad temporal, las emisiones son calculadas en base horaria para el modelo de pronóstico químico CAM_x y en base anual para el inventario de emisiones con año base 2011. Así, la producción y el consumo de combustible se estandarizan de acuerdo al nivel de actividad y se calculan en base horaria, y más adelante las emisiones horarias son llevadas a base anual. Para ello se tiene información sobre los periodos de operación de la fuente de forma diaria (horas/día), semanal (días/semana) y anual (meses/año); cuando esta información no está disponible para algunas fuentes, se asigna el valor promedio de otras fuentes similares que pertenezcan al mismo sector y utilicen el mismo combustible.

La estandarización de unidades se hace con el fin de facilitar los cálculos posteriores y además permite la identificación de valores ilógicos de producción y consumo de combustible.

g. Cálculo de la demanda energética

La demanda de energía de las fuentes fijas del Valle de Aburrá se calcula como el producto del consumo de combustible por el correspondiente poder calorífico inferior (PCI). En la Tabla 4.3 se presentan los poderes caloríficos utilizados en este estudio.

TABLA 4.3. PODERES CALORÍFICOS DE LOS COMBUSTIBLES USADOS POR FUENTES FIJAS EN EL VALLE DE ABURRÁ

Combustible		PCI	Unidad
Carbón	Carbón	22,6	MJ/kg
	Carbón coque	28,5	MJ/kg
Fuel oil No 2	Diesel o ACPM	37.166,4	MJ/1000 L
Fuel oil No 6		42.502,2	MJ/1000 L
Aceite recuperado		36.204,3	MJ/1000 L
Gas natural		35,4	MJ/m ³
GLP		97,1	MJ/m ³
Biomasa	Madera	19,0	MJ/kg
	Cáscara de coco	16,7	MJ/kg
	Fique	16,7	MJ/kg
	Borra de café	24,9	MJ/kg

Fuentes: www.ecopetrol.com.co, www.cadascu.wordpress.com, www.carbocoque.com, www.ceni-cafe.org, www.si3ea.gov.co.

h. Cálculo de emisiones de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero

Finalmente, se procede a calcular las emisiones de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero haciendo uso de la Ecuación 4.1 y de los factores de emisión tomados del AP-42 (U.S Environmental Protection Agency, 1995).

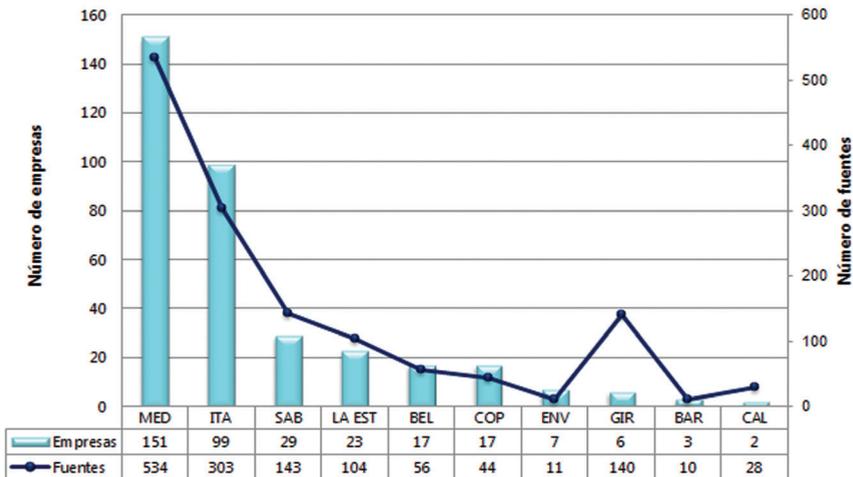
4.2 Resultados

De acuerdo con la información recopilada en el Archivo Ambiental del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en el área urbana de la región se asientan 354 empresas con 1.373 fuentes de emisión de contaminantes, es decir, 10 empresas menos y 541 fuentes más que lo que se reportó en el Inventario de emisiones con año base 2009 (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - Universidad Pontificia Bolivariana, 2010). La razón del marcado incremento en el número de fuentes (60% más fuentes) se atribuye a las labores de control y vigilancia de la Subdirección Ambiental de esa Entidad que entre sus múltiples funciones ha velado por el cumplimiento de la Resolución 909 de

2008, norma que instauró los límites permisibles de emisión de contaminantes para fuentes fijas. Esta resolución que se expidió en junio 05 de 2008, tuvo dos años de transición para su cumplimiento y además estableció la obligatoriedad de determinar la altura de chimenea de acuerdo a las prácticas del Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010); así gracias al seguimiento sobre las industrias para que den cumplimiento a estas obligaciones se logró identificar un gran número de fuentes que antes no se habían reportado.

En la Figura 4.2 se presenta la distribución por municipio de las empresas con descargas atmosféricas y fuentes fijas identificadas después de la revisión de los expedientes ambientales.

FIGURA 4.2. EMPRESAS Y FUENTES FIJAS DE EMISIÓN POR MUNICIPIO



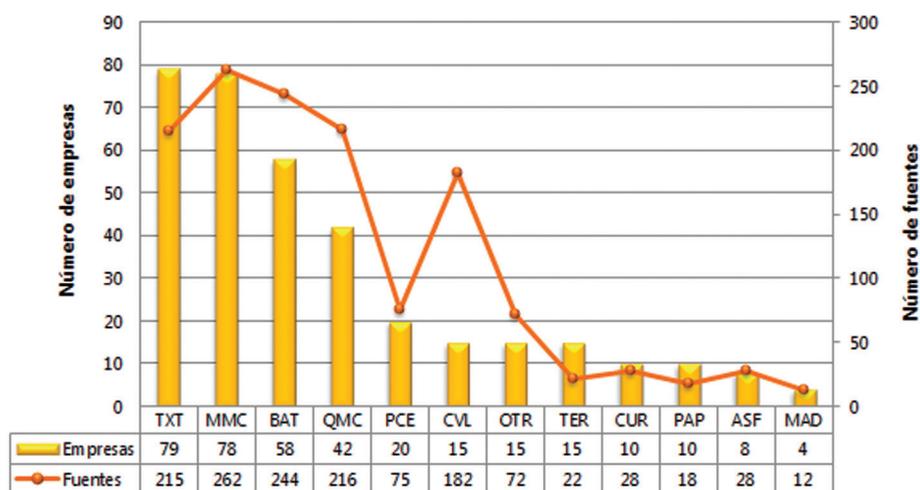
MED: Medellín; ITA: Itagüí; SAB: Sabaneta; LA EST: La Estrella; BEL: Bello; COP: Copacabana; ENV: Envigado; GIR: Girardota; BAR: Barbosa; CAL: Caldas.

En la figura anterior puede verse que el municipio con el mayor número de empresas y fuentes es Medellín que cuenta con 151 empresas y 534 fuentes fijas de emisión, es decir el 43% de las empresas y el 39% de las fuentes fijas del Valle de Aburrá; después de Medellín se ubica Itagüí con 99 empresas y 303 fuentes fijas equivalentes al 28% de las empresas y 22% fuentes; el resto

de los municipios se adjudican respectivamente el 29% y el 39% restante de las empresas y fuentes asentadas en el Valle de Aburrá. En esta distribución sobresale el municipio de Girardota que con solo el 1,7% de las empresas cuenta con el 10% de las fuentes de la región.

En cuanto a la distribución por tipo de actividad productiva, en la Figura 4.3 se puede observar el número de empresas y fuentes fijas en cada uno de los sectores productivos identificados en el Valle de Aburrá. Allí puede verse que los sectores Textil y confección (TXT), Metalmeccánico (MMC), Bebidas, alimentos y tabaco (BAT), Químico (QMC), y Cerámicos y vítreos (CVL) contribuyen con el 77% de las empresas y el 81,5% de las fuentes de emisión. En la figura también sobresale el sector CVL por aportar el 13% de las fuentes con tan solo el 4% de las empresas.

FIGURA 4.3. EMPRESAS Y FUENTES FIJAS DE EMISIÓN POR ACTIVIDAD PRODUCTIVA

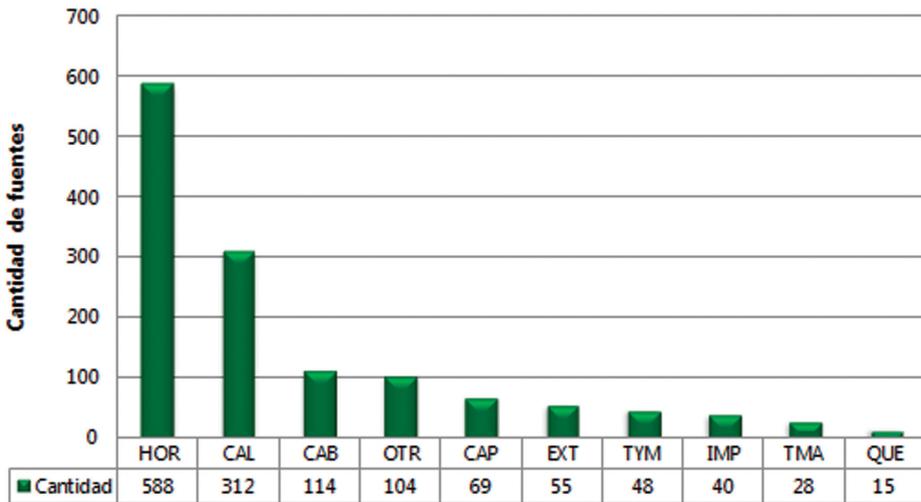


TXT: textil y confección; MMC: metalmeccánico; BAT: bebidas, alimentos y tabaco; QMC: químico; PCE: plásticos, cauchos y empaques; CVL: cerámicos y vítreos; OTR: otras industrias; TER: terciario; CUR: cueros; PAP: papel, cartón, pulpa e impresión; ASF: derivados del petróleo; MAD: aserríos, depósitos de maderas, e industrias que trabajan la madera.

Finalmente, la Figura 4.4 presenta los tipos de fuentes de emisión identificados en el Valle de Aburrá, allí puede verse que los hornos y las calderas

son las fuentes de emisión más comunes en la región, pues respectivamente aportan el 43% y el 23% de las fuentes del área urbana del Valle de Aburrá, mientras el resto de equipos y procesos aportan el 34% restante.

FIGURA 4.4. EQUIPOS O PROCESOS GENERADORES DE EMISIONES

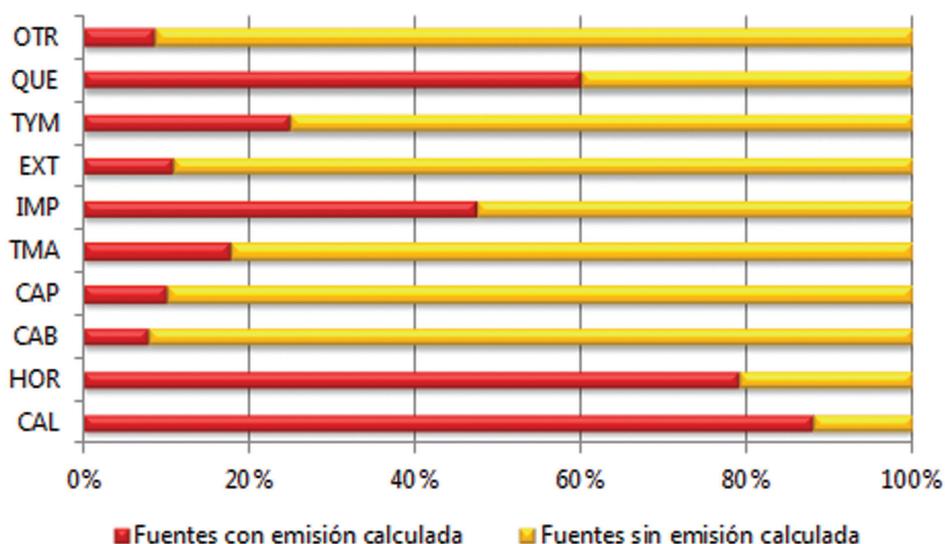


HOR: hornos; CAL: calderas; CAB: cabinas, OTR: otros; CAP: sistemas de captación; EXT: sistemas de extracción; TYM: procesos de trituración y molienda; IMP: procesos de impresión; TMA: procesos de transferencia de masa; QUE: quemadores.

Es importante anotar que de las 1.373 fuentes de emisión registradas, las fuentes con información suficiente o factores de emisión disponibles para calcular sus respectivas emisiones son 815, equivalentes al 59% del total. Esto se debe principalmente a que se registraron una gran cantidad de ductos que no caben dentro de los procesos típicos que cuentan con factores de emisión o a que algunas fuentes no cuentan con suficiente información. Por ejemplo, se tienen sistemas de extracción para evacuar gases o partículas generados por el almacenamiento de sustancias, por reacciones químicas o por procesos de acabado y pulido de materiales; también se tiene una importante cantidad de cabinas donde se realizan aplicación de pintura pero se desconoce la cantidad de pintura utilizada (nivel de actividad del respectivo

factor de emisión), etc. En la Figura 4.5 se presenta el porcentaje de fuentes con y sin emisiones calculadas de acuerdo al tipo de proceso o fuente de emisión; en la figura puede verse que las fuentes clasificadas como cabinas (CAB), sistemas de captación (CAP), sistemas de extracción (EXT) y otro tipo de fuentes (OTR) tienen hasta el 92% de fuentes sin emisión calculadas; mientras las calderas (CAL) y los hornos (HOR) tienen mínimo el 79% de las emisiones calculadas.

FIGURA 4.5. DISTRIBUCIÓN DE FUENTES CON Y SIN EMISIONES CALCULADAS



CAL: calderas; HOR: hornos; CAB: cabinas; CAP: sistemas de captación; TMA: procesos de transferencia de masa; IMP: procesos de impresión; EXT: sistemas de extracción; TYM: procesos de trituración y molienda; QUE: quemadores; OTR: otros.

Así, teniendo en cuenta que no fue posible calcular la emisión al 41% de las fuentes, para inventarios futuros surge la necesidad de definir criterios que permitan diferenciar fuentes fijas y fuentes de área dentro de las fuentes industriales del Valle de Aburrá, con el fin de optimizar el control sobre ellas y la gestión del inventario de emisiones, pues en realidad una gran cantidad de esas fuentes no son representativas por su tamaño y cantidad de contaminantes emitidos.

4.2.1 Demanda energética

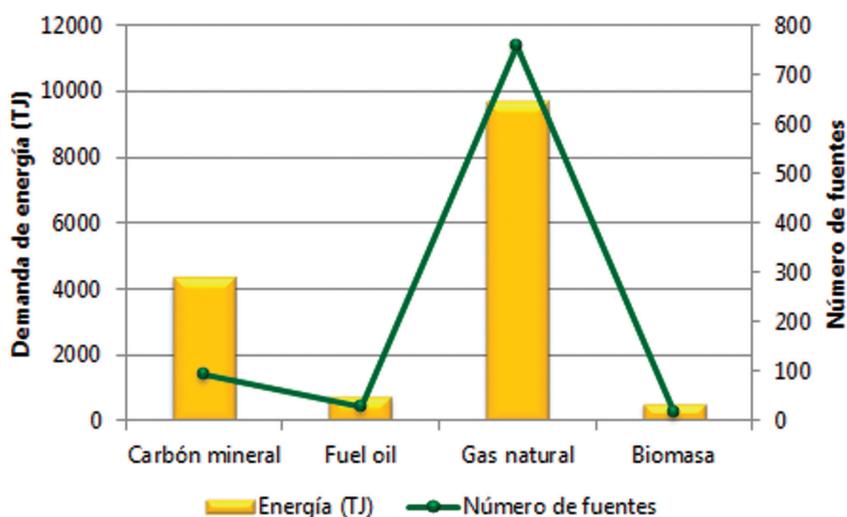
La canasta energética de la industria del Valle de Aburrá la integran combustibles como el carbón, los *fuel oil* (diesel o ACPM, y combustóleo), el gas (natural y licuado de petróleo) y la biomasa (madera, fique, cáscara de coco, etc.); en la Tabla 4.4 se especifican cada uno de los combustibles utilizados, el consumo anual y la demanda de energía equivalente. Aunque la energía eléctrica también es una integrante clave de la canasta energética se desconoce su consumo por parte de la industria y es de menor importancia para el inventario de emisiones teniendo en cuenta que en la región este tipo de energía se obtiene a partir de fuentes renovables y no se producen emisiones directas de contaminantes en su generación.

TABLA 4.4. DEMANDA ENERGÉTICA DE LAS FUENTES INDUSTRIALES DEL VALLE DE ABURRÁ, AÑO 2011

Combustible		Consumo	Unidades	Energía consumida (TJ/año)
Carbón	Carbón mineral	195.003	Mg/año	4.399
	Carbón coque	184	Mg/año	5
Fuel oil No 2	Diesel o ACPM	17.621	1.000 L/año	655
Fuel oil No 6	Combustóleo	2.510	1.000 L/año	107
Aceite recuperado		62	1.000 L/año	2
Gas natural		273.339.997	m ³ /año	9.676
GLP		402	1.000 L/año	0,04
Biomasa	Madera	10.051	Mg/año	191
	Cáscara de coco	440	Mg/año	7
	Fique	832	Mg/año	14
	Borra de café	14.057	Mg/año	350
			Total	15.407

En la Figura 4.6 puede observarse la demanda de energía por tipo de combustible y el correspondiente número de fuentes que utilizan el respectivo combustible. Se observa en ella que el gas natural es el combustible que proporciona la mayor cantidad de energía y existen casi 800 fuentes que usan este energético, también sobresale el carbón mineral como el segundo energético de mayor importancia a pesar de que solo 92 fuentes reportan el uso de este combustible; por su parte el *fuel oil* (diesel y combustóleo) y la biomasa proporcionan a la industria cantidades de energía similares y existen respectivamente 28 y 18 fuentes que usan este par de combustibles.

FIGURA 4.6. DEMANDA DE ENERGÍA Y NÚMERO DE FUENTES



En cuanto al carbón coque, el aceite recuperado y el GLP su aporte a la demanda de energía es de tan solo 8 TJ equivalentes al 0,05%, tal y como puede observarse en la Figura 4.7 donde estas sustancias se agruparon bajo la categoría Otros. Mientras tanto el gas natural y carbón proporcionan respectivamente 9.676 TJ y 4.399 TJ equivalentes al 63% y el 28% de la energía demandada por la industria del Valle de Aburrá, y el *fuel oil* y la biomasa aportaron 762 TJ y 562 TJ, es decir, el 5% y 4% respectivamente.

Ahora, si se analiza la demanda energética por tipo de combustible y de acuerdo a la actividad productiva (aunque se tienen doce actividades productivas, en la figura 4.8. se consideran los sectores con el mayor número de fuentes para facilitar la visualización de las distribuciones), se encuentra que el 69% de la energía proveniente del carbón es usada por los sectores TXT y QMC, mientras el 74% de la energía generada por el *fuel oil* la usa el sector QMC. En cuanto al gas natural, no hay un sector predominante que demande su energía y su uso está distribuido de manera similar entre los sectores considerados en este análisis; entretanto casi el 50% de la energía de la biomasa es usada por el sector BAT, y el 20% por el sector MMC (ver Figura 4.8).

FIGURA 4.7. DISTRIBUCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE LAS FUENTES FIJAS DEL VALLE DE ABURRÁ, AÑO 2011

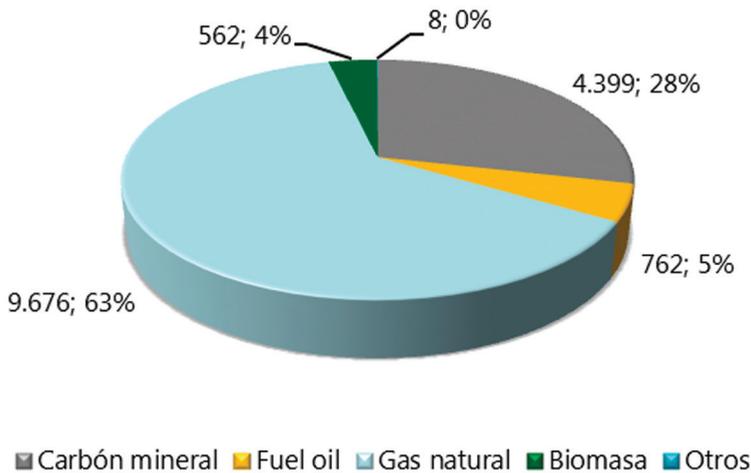
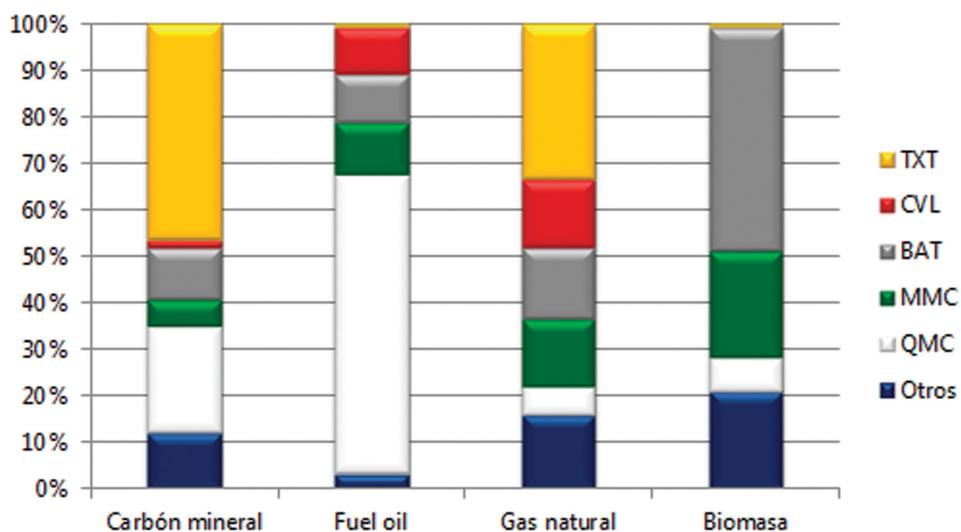


FIGURA 4.8. DISTRIBUCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA POR ACTIVIDAD PRODUCTIVA



TXT: textil y confección; CVL: cerámicos y vítreos; BAT: bebidas, alimentos y tabaco; MMC: metalmeccánico; QMC: químico; Otros: plásticos, cauchos y empaques; cueros; papel, cartón, pulpa e impresión; derivados del petróleo; aserríos, depósitos de maderas, e industrias que trabajan la madera; terciario; otras industrias.

Por último, es importante considerar la evolución en el uso de combustibles y en la demanda de energía (ver Figura 4.9 y Figura 4.10) pues la tendencia de estos dos parámetros marca la evolución en la emisión de contaminantes.

FIGURA 4.9. EVOLUCIÓN EN EL USO DE COMBUSTIBLES

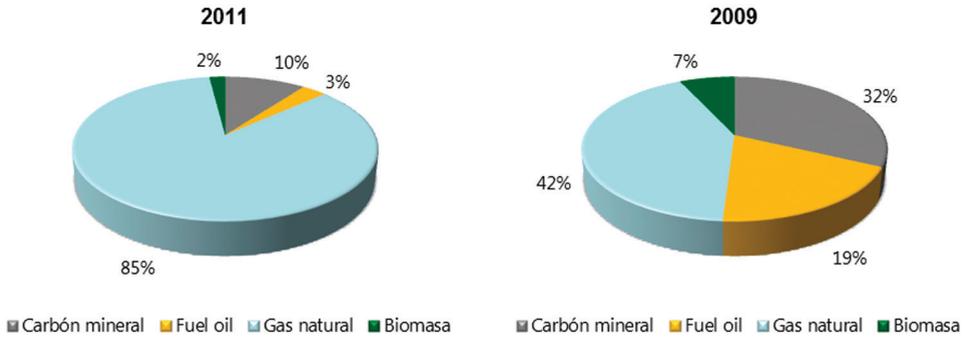
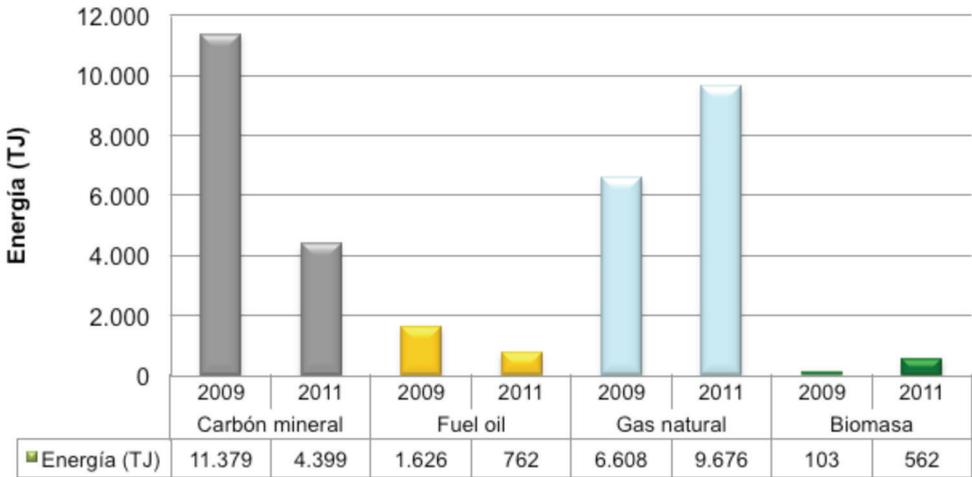


FIGURA 4.10. EVOLUCIÓN EN LA DEMANDA DE ENERGÍA



De esta manera se encuentra que mientras en el año 2009 el 42% de las fuentes usaban gas natural (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - Universidad Pontificia Bolivariana, 2010), en el año 2011 el uso de este combustible se ex-

tendió al 85% de las fuentes. Así, el gas natural reemplazó al carbón, al *fuel oil* y a la biomasa, combustibles que pasaron del 58% al 15% en utilización entre los años 2009 y 2011. La masificación en el uso de gas natural puede atribuirse a la obligatoriedad de las fuentes de cumplir con la norma nacional de emisión (Resolución 909 de 2008), cuyos estándares hacen necesario el uso de sistemas de control o combustibles limpios para lograr su cumplimiento.

Respecto a la demanda de energía su consumo disminuyó para el año 2011, pues mientras en 2009 la industria consumía 19.716 TJ, en 2011 pasó a consumir 15.407 TJ, es decir, 22% menos energía; esto es señal de una contracción de la economía aunque también podría ser causado por la implementación de procesos más eficientes energéticamente.

4.2.2 Emisión de contaminantes criterio

La Tabla 4.5 presenta la emisión de contaminantes criterio en mega-gramos (Mg) por tipo de actividad productiva y en la Figura 4.11 su distribución porcentual. La estimación de emisiones de fuentes fijas, contempla material particulado total (PM), material particulado menor de 10 micrómetros (PM10) y material particulado menor de 2,5 micrómetros (PM2,5) porque debido a la variedad de procesos se genera material particulado de todos los tamaños.

TABLA 4.5. EMISIONES DE CONTAMINANTES CRITERIO POR ACTIVIDAD PRODUCTIVA (Mg), AÑO 2011

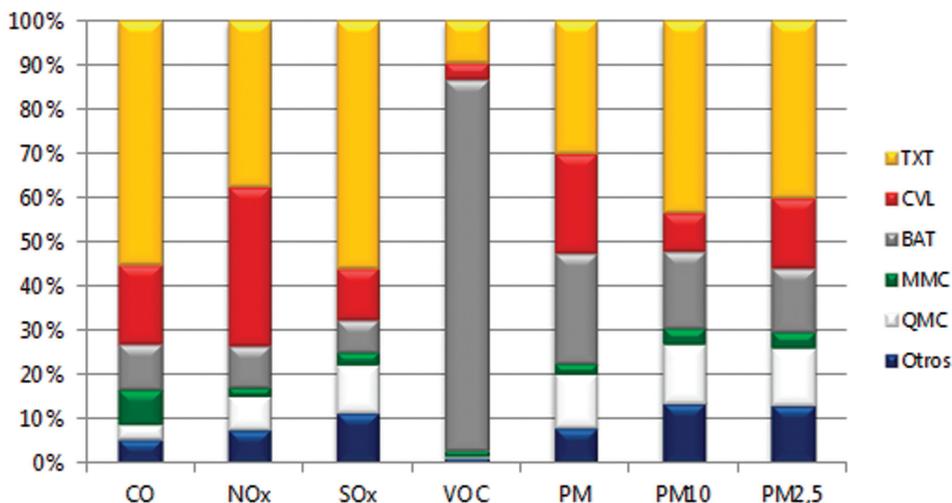
Sector	CO	NO _x	SO _x	VOC	PM	PM10	PM2,5
BAT	313,7	207,2	165,6	754,0	481,6	126,4	44,1
TXT	1.607,5	814,2	1.224,0	85,0	572,9	312,7	121,2
CVL	514,4	777,0	251,3	36,5	433,1	62,9	48,3
PAP	49,7	84,6	151,3	1,5	94,8	61,2	25,1
PCE	17,9	10,0	10,8	0,8	7,6	4,9	2,2
MMC	231,2	46,2	61,3	9,8	50,4	28,0	12,3
QMC	89,4	164,4	238,1	5,1	227,5	95,0	38,8
CUR	43,2	30,4	63,5	4,4	38,3	23,2	5,5
ASF	31,3	23,4	22,3	2,7	6,3	1,8	1,2
TER	10,7	12,7	1,2	0,5	0,2	0,0	0,0
MAD	7,3	2,7	0,3	0,5	6,7	6,0	5,2
OTR	0,9	1,2	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0
Total	2.917,1	2.174,0	2.189,8	901,8	1.919,4	722,2	303,7

BAT: bebidas, alimentos y tabaco; TXT: textil y confección; CVL: cerámicos y vítreos; PAP: papel, cartón, pulpa e impresión; PCE: plásticos, cauchos y empaques; MMC: metalmecánico; QMC: químico; CUR: cueros; ASF: derivados del petróleo; TER: terciario; MAD: aserríos, depósitos de maderas, e industrias que trabajan la madera; OTR: otras industrias.

Al analizar la emisión de contaminantes criterio por sector productivo se encuentra que el sector TXT domina las emisiones de CO y SO_x aportando más del 55% de la emisión de estos contaminantes, y además hace una contribución significativa a las emisiones de PM10 y PM2,5. También sobresalen el sector CVL que contribuye con el 36% de las emisiones de NO_x y el sector BAT que aporta el 84% de las emisiones de VOC.

Teniendo en cuenta que se identificaron tres sectores productivos como los principales aportantes a la emisión de contaminantes criterio, es importante hacer un análisis detallado de esos sectores con el fin de identificar el origen de esas emisiones.

FIGURA 4.11. DISTRIBUCIÓN DE EMISIONES DE CONTAMINANTES CRITERIO DE ACUERDO A LA ACTIVIDAD PRODUCTIVA

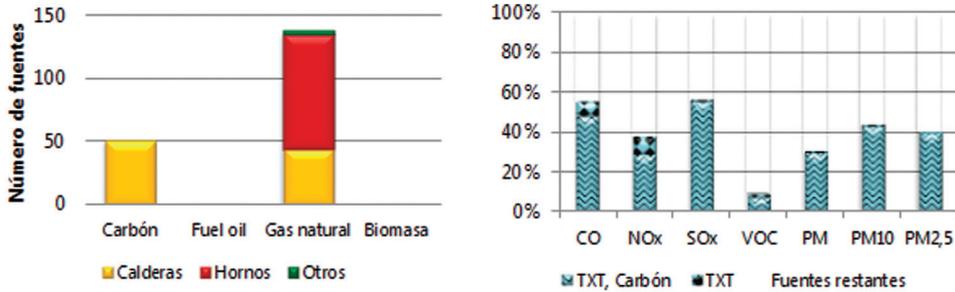


TXT: textil y confección; CVL: cerámicos y vítreos; BAT: bebidas, alimentos y tabaco; MMC: metalmecánico; QMC: químico; Otros: plásticos, cauchos y empaques; cueros; papel, cartón, pulpa e impresión; derivados del petróleo; aserríos, depósitos de maderas, e industrias que trabajan la madera; terciario; otras industrias.

Sector Textil y Confección (TXT)

Este sector está compuesto por 79 empresas con 215 fuentes de emisión, lo que equivale al 22% de las empresas y al 16% de las fuentes industriales. A su vez, sus fuentes de emisión están compuestas por calderas (106 fuentes), hornos (103 fuentes), extractores (2 fuentes) y otro tipo de fuentes (4 máquinas para el estampado de telas). En cuanto al tipo de combustible utilizado por estas fuentes, el 72% de ellas usa gas natural, el 27% usa carbón y el 1% restante usa *fuel oil* o biomasa; y es el carbón el responsable de la mayor proporción de las emisiones del sector (ver Figura 4.12). Así, ejerciendo una rigurosa vigilancia sobre 52 fuentes a carbón del sector TXT se tendría control sobre un porcentaje importante de las emisiones de contaminantes criterio de la industria.

FIGURA 4.12. COMPOSICIÓN DE LAS FUENTES Y EMISIONES EN EL SECTOR TEXTIL Y CONFECCIÓN (TXT)



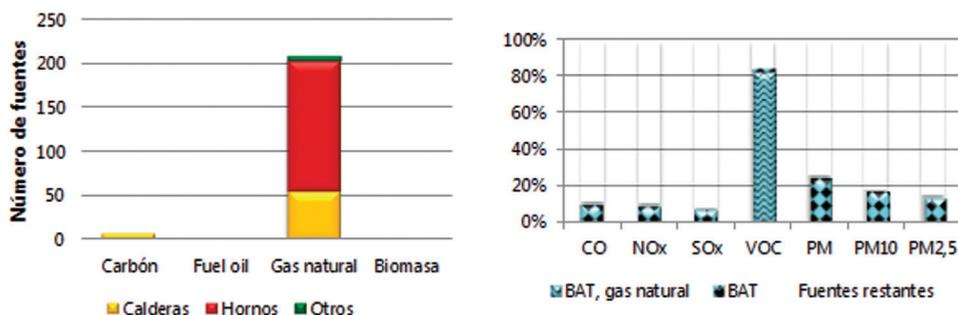
Sector Bebidas, Alimentos y Tabaco (BAT)

El sector BAT se identificó como el responsable de la emisión del 84% de los VOC generados por la industria, y es un sector compuesto por 58 empresas con 244 fuentes de emisión, equivalentes al 16% de las empresas y al 18% de las fuentes industriales. Estas fuentes son principalmente hornos (153 fuentes), calderas (69 fuentes) y otro tipo de fuentes como extractores, quemadores, aglomeradores, etc. (22 fuentes). En cuanto al uso de combustibles, el 94% de esas fuentes usa gas natural, el 4% usa carbón y el 2% restante usa *fuel oil* o biomasa. Ahora, cuando se analiza qué factor es el responsable de la emisión del 84% de los VOC, se encuentra que es el gas natural, que de acuerdo con los resultados obtenidos genera el 82% de las emisiones del contaminante (ver Figura 4.13).

El control que se puede hacer sobre las fuentes a gas natural es poco debido a que ya están usando un combustible limpio y además la norma nacional de emisiones solo regula las emisiones de NO_x para este tipo de fuentes. Sin embargo, se debe tener en cuenta que gracias al reemplazo de combustibles tradicionales como el carbón y el *fuel oil* con gas natural se están disminuyendo significativamente las emisiones de VOC, pues mientras un horno a gas natural emite aproximadamente 0,0025 g VOC/MJ, un equipo a carbón de alimentación manual emite 0,33 g VOC/MJ y un horno con *fuel oil* emite 0,008 g VOC/MJ, es decir, 132 veces más VOC en el equipo de alimentación manual a carbón y 3 veces más VOC en el horno a *fuel oil*, en ambos casos

cuando se compara con un horno a gas natural. Esta situación es clara cuando se compara la emisión de VOC en el año 2009, donde se emitieron 1.808 toneladas de VOC y el 51% de las fuentes utilizaba carbón y *fuel oil*, mientras en 2011 se emitieron 900 toneladas de VOC y tan solo 13% de las fuentes reportaron el uso de esos combustibles tradicionales.

FIGURA 4.13. COMPOSICIÓN DE LAS FUENTES Y EMISIONES EN EL SECTOR BEBIDAS, ALIMENTOS Y TABACO (BAT)

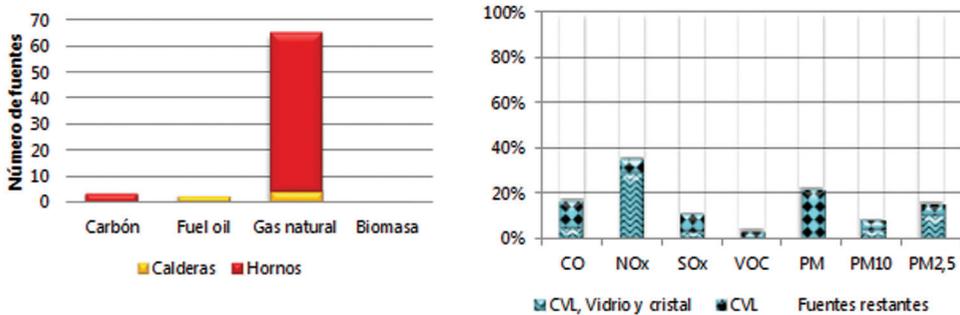


Sector Cerámicos y Vítreos (CVL)

Este sector lo componen 15 empresas con 182 fuentes de emisión, que a su vez contribuyen con el 4% de las empresas y el 13% de las fuentes industriales del Valle de Aburrá. De esas fuentes el 40% son hornos; el 55% son equipos de captación o extracción de materiales, de trituración y molienda, y otro tipo de dispositivos que no utilizan combustibles fósiles para su funcionamiento; y el 5% de las fuentes restantes son calderas (ver Figura 4.14).

Entre las fuentes que usan combustible, se encuentra que el 90% usa gas natural, el 5% usa carbón y el porcentaje restante usa *fuel oil* y biomasa. Sin embargo, cuando se analiza la responsabilidad en la emisión del 35% de los NO_x del sector CVL se encuentra que una empresa dedicada a la fabricación de vidrio y cristal emite el 28% de la cantidad emitida por toda la industria del Valle de Aburrá (ver Figura 4.14). Así, vigilando una sola empresa con dos fuentes de emisión se puede ejercer control sobre cerca de una tercera parte de las emisiones de NO_x de todo el área metropolitana.

FIGURA 4.14. COMPOSICIÓN DE LAS FUENTES Y EMISIONES EN EL SECTOR CERÁMICOS Y VÍTREOS (CVL)



Después de haber analizado las emisiones de contaminantes criterio por actividad sectorial, es importante observar las emisiones de estos contaminantes de acuerdo al tipo de combustible, tal y como se presenta en la Tabla 4.6 y en la Figura 4.15 (las emisiones totales de contaminantes criterio por tipo de combustible no coinciden con los valores totales por actividad sectorial debido a que no todos los procesos usan combustible).

TABLA 4.6. EMISIONES DE CONTAMINANTES CRITERIO POR TIPO DE COMBUSTIBLE (Mg), AÑO 2011

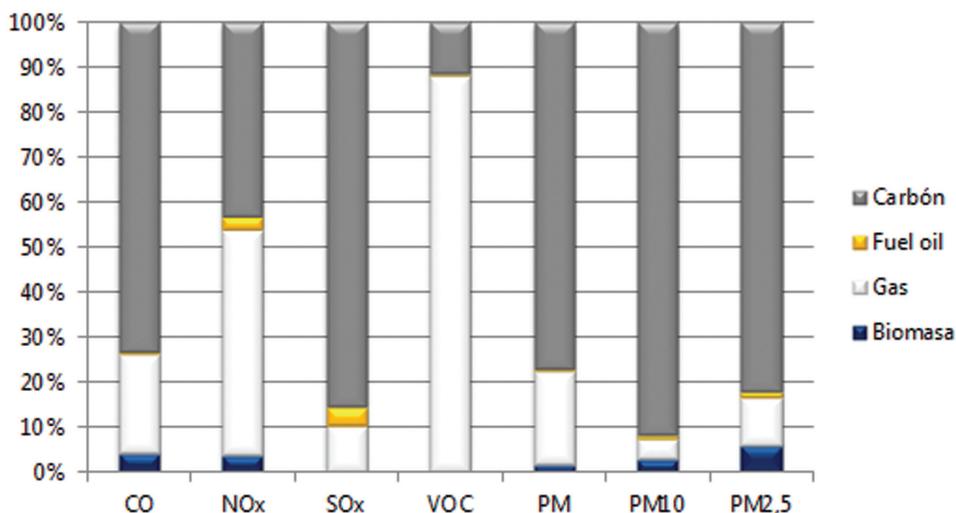
Combustible	CO	NO _x	SO _x	VOC	PM	PM10	PM2,5
Carbón	2.082	939	1.865	105	1.390	660	249
Fuel oil	12	58	90	2	10	6	3
Gas	632	1.083	226	785	377	34	33
Biomasa	115	83	5	4	27	21	18
Total	2.841	2.163	2.185	896	1.805	721	304

Carbón: carbón mineral y carbón coque; fuel oil: diesel, crudos pesados y aceite recuperado; gas: gas natural y gas licuado de petróleo; biomasa: madera, fique, cáscara de coco y borra de café.

Así, este análisis permite confirmar que el combustible responsable de emitir la mayor proporción de contaminantes criterio (a excepción de los VOC) es el carbón, combustible que genera más del 77% de las emisiones de material particulado (PM, PM10 y PM2,5), 85% de las emisiones de SO_x, 73% de las

emisiones de CO y 43% de las emisiones de NO_x; a pesar de ser usado por tan solo el 10% de las fuentes, hecho que facilita su control. En cuanto al gas, a este combustible se le atribuye el 88% de las emisiones de VOC, 50% de las emisiones de NO_x, 22% de las emisiones de CO y 10% de las emisiones de SO_x. Por su parte el *fuel oil* y la biomasa emiten menos del 7% de la emisión de los contaminantes en cuestión, esto debido a su poco uso (3% de las fuentes usa *fuel oil* y 2% usa biomasa) gracias al reemplazo de éstos con gas natural.

FIGURA 4.15. DISTRIBUCIÓN DE EMISIONES DE CONTAMINANTES CRITERIO DE ACUERDO AL TIPO DE COMBUSTIBLE

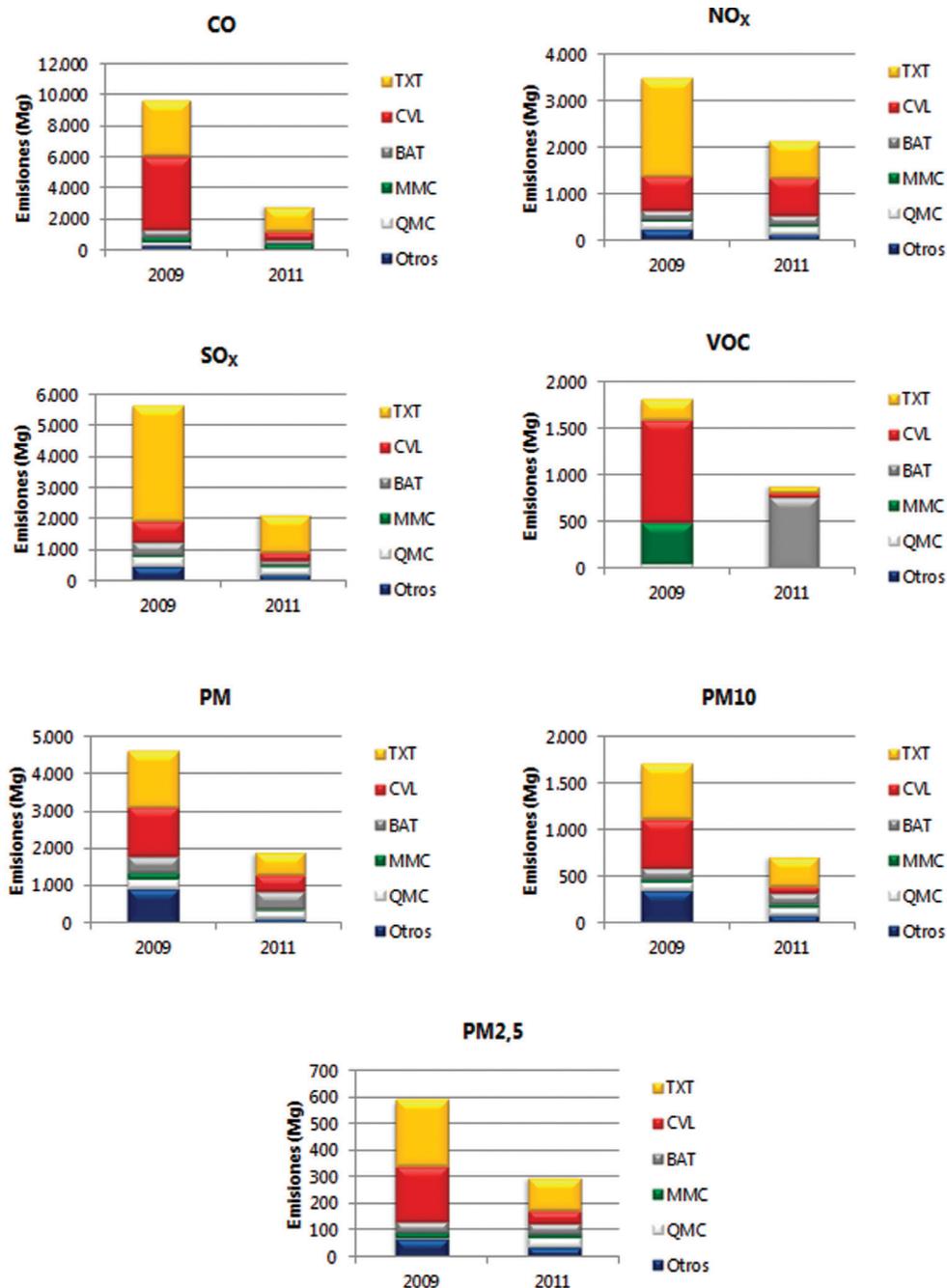


Carbón: carbón mineral y carbón coque; *fuel oil*: diesel, crudos pesados y aceite recuperado; gas: gas natural y gas licuado de petróleo; biomasa: madera, fique, cáscara de coco y borra de café.

Evolución en la emisión de contaminantes criterio

Con el ánimo de comparar las emisiones de contaminantes criterio en los años 2009 (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - Universidad Pontificia Bolivariana, 2010) y 2011, se presenta la Figura 4.16 con la respectiva evolución de cada uno de los contaminantes.

FIGURA 4.16. EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES DE CONTAMINANTES CRITERIO, AÑOS 2009 Y 2011



En la figura anterior se observa una disminución en la emisión de todos los contaminantes entre el año 2009 y 2011. Así, puede verse que las emisiones de CO se redujeron en 70%, los NO_x se redujeron en 37%, los SO_x disminuyeron en 61%, los VOC se redujeron 50%, y el PM, el PM10 y el PM2,5 disminuyeron en 59%, 58% y 49% respectivamente; tales reducciones están asociadas principalmente a los sectores TXT y CVL, y a su vez dichas reducciones pueden atribuirse al reemplazo de combustibles tradicionales como el carbón y el *fuel oil* por combustibles limpios como el gas natural, al uso de procesos más eficientes y una contracción de la economía industrial (por ejemplo dos centrales térmicas del sector TXT pasaron de consumir 26 toneladas de carbón por hora en el año 2009 a consumir 7 toneladas de carbón por hora en el año 2011).

4.2.3 Emisión de gases de efecto invernadero

Las emisiones industriales de gases de efecto invernadero clasificadas de acuerdo a la actividad productiva se presentan en la Tabla 4.7 y su respectiva distribución se puede observar en la Figura 4.17. Así, en la tabla puede verse que en el año 2011 se emitieron 900.698 toneladas de CO₂, 53 toneladas de CH₄ y 13 toneladas de N₂O, proporcionales a 905.919 toneladas de CO₂ equivalente (ver Tabla 3.16).

En cuanto a la distribución de estas emisiones se identifica a los sectores TXT, CVL y BAT como los responsables de más del 70% de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O, mientras los otros nueve sectores identificados emiten el 30% restante.

TABLA 4.7. EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR ACTIVIDAD PRODUCTIVA (Mg), AÑO 2011

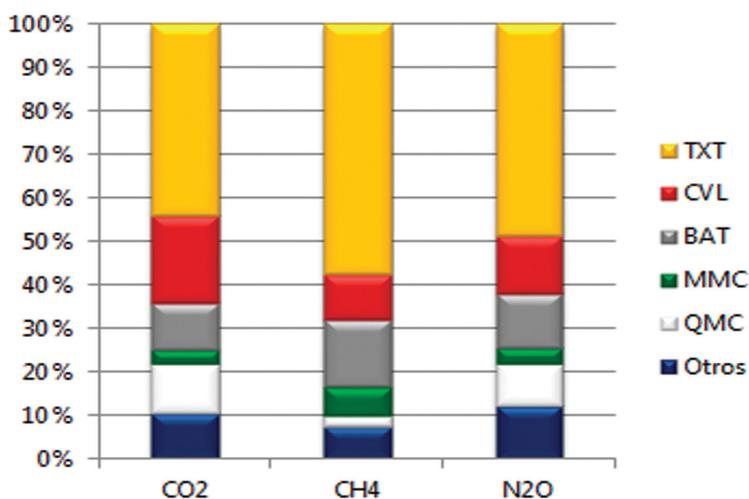
Sector	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
BAT	99.081	8,11	1,61
TXT	398.608	30,21	6,38
CVL	178.191	5,47	1,75
PAP	40.309	0,74	0,59
PCE	3.589	0,26	0,06
MMC	30.245	3,42	0,52
QMC	100.735	1,44	1,25
CUR	9.457	1,65	0,14
ASF	26.086	0,79	0,44
TER	10.534	0,20	0,19
MAD	2.468	0,25	0,16
OTR	1.394	0,04	0,02
Total	900.698	52,59	13,11
Total CO ₂ -eq	905.919,53		

BAT: bebidas, alimentos y tabaco; TXT: textil y confección; CVL: cerámicos y vítreos; PAP: papel, cartón, pulpa e impresión; PCE: plásticos, cauchos y empaques; MMC: metalmecánico; QMC: químico; CUR: cueros; ASF: derivados del petróleo; TER: terciario; MAD: aserríos, depósitos de maderas, e industrias que trabajan la madera; OTR: otras industrias.

El análisis por actividad productiva en los sectores responsables del 70% de las emisiones de gases de efecto invernadero, permite ver que en el sector TXT, el carbón y el gas natural son los responsables de la mayor proporción de las emisiones, con el carbón encabezando las emisiones de CH₄ y el gas natural a la cabeza en las emisiones de CO₂ y N₂O, y un comportamiento similar se observa en el sector CVL con el gas natural y las emisiones de CO₂ y N₂O. Por su parte en el sector BAT el gas natural hace una contribución similar a las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O (ver Figura 4.18). Es importante aclarar, que aunque se

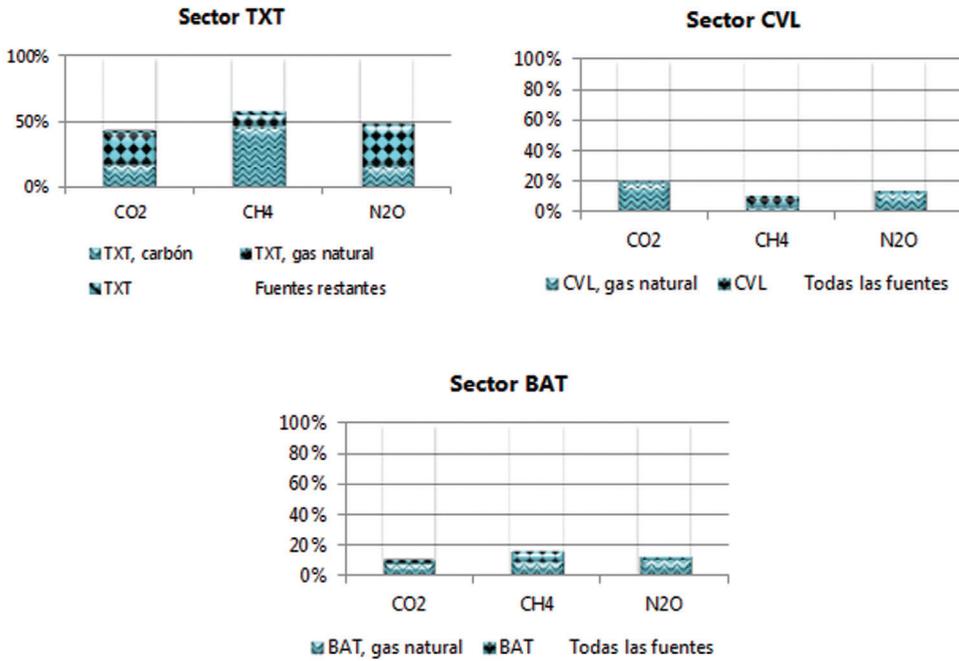
esperaría que la mayor proporción de emisiones de CH_4 viniera del gas natural, en este caso proviene del carbón, específicamente de los equipos de alimentación manual que emiten $0,11 \text{ g CH}_4/\text{MJ}$ de carbón mientras los equipos a gas natural emiten $0,0010 \text{ g CH}_4/\text{MJ}$ de gas natural, es decir 110 veces más emisiones de CH_4 , de este modo se encuentra que los equipos de alimentación manual de carbón son los responsables del 62% de las emisiones de CH_4 .

FIGURA 4.17. DISTRIBUCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE ACUERDO A LA ACTIVIDAD PRODUCTIVA



TXT: textil y confección; CVL: cerámicos y vítreos; BAT: bebidas, alimentos y tabaco; MMC: metalmecánico; QMC: químico; Otros: plásticos, cauchos y empaques; cueros; papel, cartón, pulpa e impresión; derivados del petróleo; aserríos, depósitos de maderas, e industrias que trabajan la madera; terciario; otras industrias.

FIGURA 4.18. COMPOSICIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN LOS SECTORES TXT, CVL Y BAT



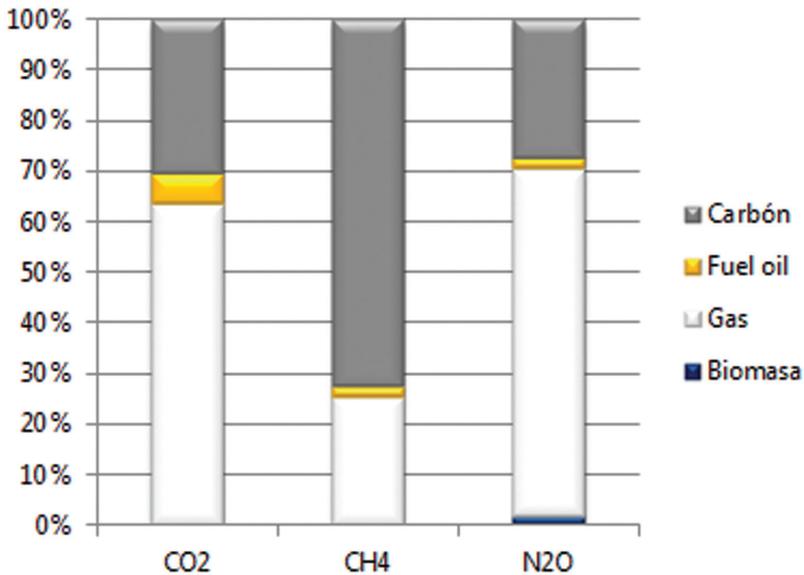
Para tener mayor claridad sobre la contribución de los combustibles en la emisión de gases de efecto invernadero, en la Tabla 4.8 y Figura 4.19 se presentan las emisiones de estos contaminantes y su distribución en el año base 2011.

TABLA 4.8. EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR TIPO DE COMBUSTIBLE (Mg), AÑO 2011

Combustible	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Carbón	272.464	37,1	3,6
Fuel oil	54.665	1,0	0,2
Gas	559.092	12,6	8,9
Biomasa	4.213	0,5	0,2
Total	890.435	51,2	12,9

Nuevamente se identifica al gas (principalmente gas natural, ver Tabla 4.4) como el responsable del 63% de las emisiones de CO₂, el 25% de las emisiones de CH₄ y el 69% de las emisiones de N₂O, mientras al carbón se le atribuye el 30% de las emisiones de CO₂, 72% de las emisiones de CH₄ y 28% de las emisiones de N₂O. Por su parte el *fuel oil* emite 6%, 2% y 2% respectivamente de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O, y la biomasa el 1% restante de éstos gases.

FIGURA 4.19. DISTRIBUCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE ACUERDO AL TIPO DE COMBUSTIBLE



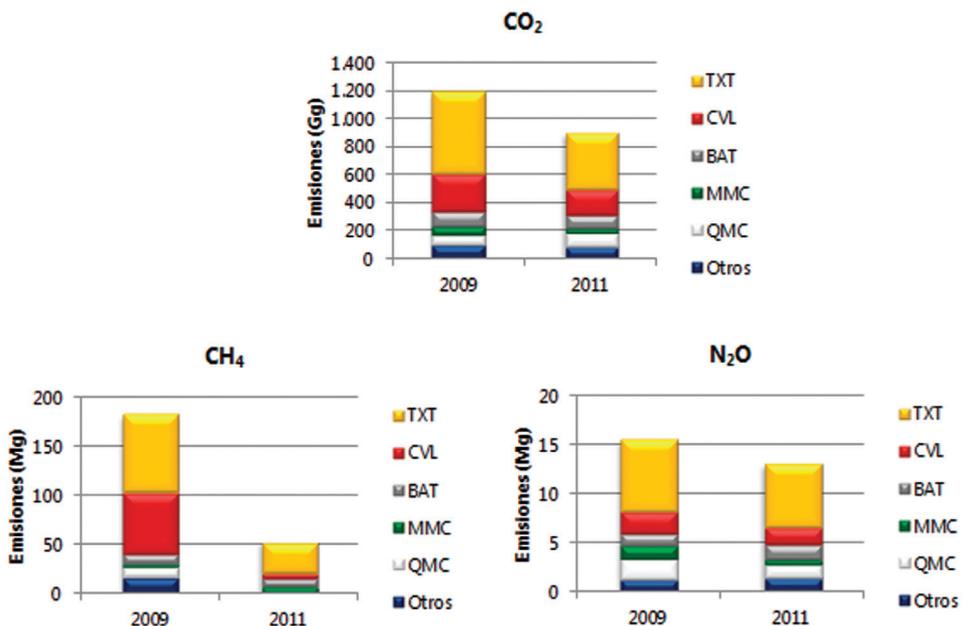
Las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes del gas natural son difícilmente controlables pues las fuentes ya están usando un combustible limpio y las emisiones de estos contaminantes son inherentes al proceso de combustión, así, en ese caso solo queda velar por prácticas energéticas eficientes que propendan por el uso racional y eficaz del combustible. En el caso del carbón, es importante vigilar los equipos de combustión externa con alimentación manual del carbón (28 fuentes), pues como se mencionó anteriormente contribuyen con el 62% de las emisiones de CH₄. Además, es importante recordar que aunque el gas natural ahora aparezca como el prin-

El principal responsable de las emisiones de CO_2 y N_2O , gracias al reemplazo de los combustibles tradicionales con gas natural se ha logrado una disminución significativa en las emisiones totales de gases de efecto invernadero, tal y como se describe a continuación.

Evolución en la emisión de gases de efecto invernadero

La Figura 4.20 presenta la evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de fuentes industriales entre los años 2009 y 2011, y se observa, al igual que con los contaminantes criterio, una disminución en las emisiones para el año 2011, y de manera similar dichas disminuciones tienen su origen en el reemplazo de combustibles tradicionales con gas natural, al uso de procesos más eficientes y una contracción de la economía industrial. Así, las reducciones en emisiones de CO_2 , CH_4 y N_2O entre los años 2009 y 2011 fueron respectivamente de 25%, 71% y 15%.

FIGURA 4.20. EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO, AÑOS 2009 Y 2011





5. Inventario de emisiones del **Valle de Aburrá**, año 2011

Finalmente, se presentan en este capítulo la demanda de energía, las emisiones de contaminantes criterio y de gases de efecto invernadero estimadas para fuentes móviles y fuentes fijas en el año base 2011.

5.1 Demanda energética

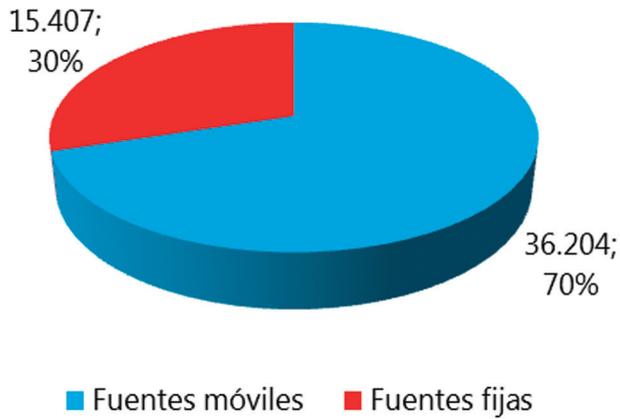
En el año 2011 el parque automotor y la industria con fuentes de emisión del Valle de Aburrá consumieron 51.611 TJ de energía, proveniente de la quema de combustibles fósiles y biomasa, tal y como puede observarse en la Tabla 5.1.

TABLA 5.1. DEMANDA DE ENERGÍA DE ACUERDO AL TIPO DE FUENTE, AÑO 2011

	Combustible		Consumo	Unidades	Energía (TJ/año)
Fuentes móviles	Gasolina		540.300	1.000 L/año	17.878
	Diesel		430.092	1.000 L/año	15.985
	GNV		59.179.277	m ³	2.340
				Sub-total	36.204
Fuentes fijas	Carbón	Carbón mineral	195.003	Mg/año	4.399
		Carbón coque	184	Mg/año	5
	Fuel oil No 2	Diesel o ACPM	17.621	1.000 L/año	655
	Fuel oil No 6	Combustóleo	2.510	1.000 L/año	107
	Aceite recuperado		62	1.000 L/año	2
	Gas natural		273.339.997	m ³ /año	9.676
	GLP		402	1.000 L/año	0,04
	Bio-masa	Madera	10.051	Mg/año	191
		Cáscara de coco	440	Mg/año	7
		Fique	832	Mg/año	14
		Borra de café	14.057	Mg/año	350
				Sub-total	15.407
				Total	51.611

Dicha cantidad de energía fue consumida principalmente por el parque automotor, que demandó 36.204 TJ equivalentes al 70% de la energía total consumida, mientras las fuentes industriales con descargas a la atmósfera consumieron 15.407 TJ equivalentes al 30% restante (Figura 5.1).

FIGURA 5.1. DISTRIBUCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA



5.1 Emisión de contaminantes criterio

En la Tabla 5.2 se presentan las emisiones estimadas de contaminantes criterio generadas por fuentes móviles y fuentes fijas en el Valle de Aburrá durante el año 2011. Allí puede verse que en ese año se emitieron 136.967 toneladas de CO, 18.385 toneladas de NO_x, 2.468 toneladas del SO_x, 12.684 toneladas del VOC y 1.420 toneladas de PM_{2,5}.

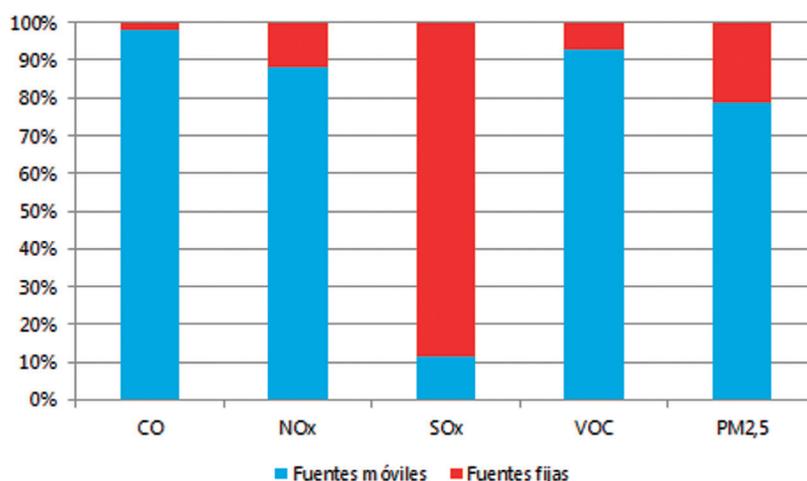
TABLA 5.2. EMISIONES DE CONTAMINANTES CRITERIO DE ACUERDO AL TIPO DE FUENTE (Mg), AÑO 2011

	CO	NO _x	SO _x	VOC	PM _{2,5}
Fuentes móviles	134.050	16.211	279	11.783	1.116
Fuentes fijas	2.917	2.174	2.190	902	304
Total	136.967	18.385	2.468	12.684	1.420

En cuanto a la distribución de esas emisiones, la Figura 5.2 muestra que los principales responsables de la emisión de contaminantes criterio, a excepción de los SO_x, siguen siendo las fuentes móviles, que contribuyen con el 98% de las emisiones de CO, 88% de las emisiones de NO_x, 93% de las emi-

siones de VOC y 79% de las emisiones de PM_{2,5}; por su parte las fuentes fijas hacen su principal aporte a las emisiones de SO_x, contribuyendo con el 89% de las emisiones de ese contaminante.

FIGURA 5.2. DISTRIBUCIÓN DE EMISIONES DE CONTAMINANTES CRITERIO DE ACUERDO AL TIPO DE FUENTE



De esta manera el enfoque para una adecuada gestión de la calidad del aire debe concentrar la mayor parte sus esfuerzos en el control y vigilancia de las fuentes móviles, especialmente en las categorías autos, camiones y motos, categorías identificadas como las principales responsables de la emisión de contaminantes criterio en ese sector. En cuanto a las fuentes fijas, el control de las emisiones de SO_x deberá centrarse en la vigilancia de las fuentes que usan carbón como combustible, pues éste se identificó como el principal aportante de los SO_x en el sector industrial.

5.3 Emisión de gases de efecto invernadero

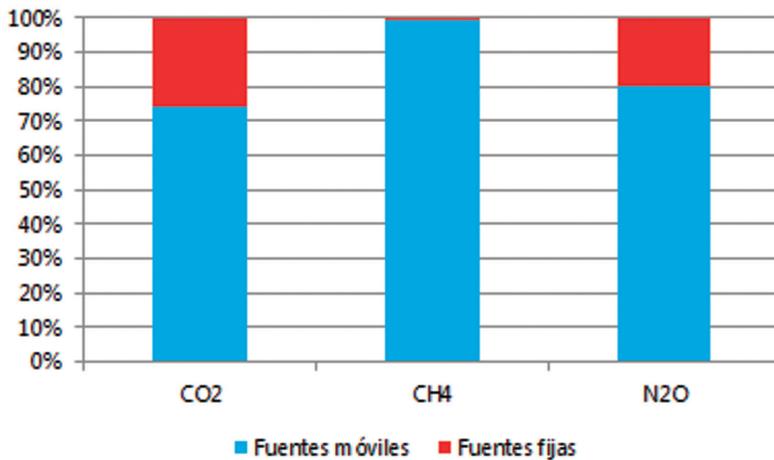
En la Tabla 5.3 se presentan las emisiones estimadas de gases de efecto invernadero generadas por las fuentes móviles y fijas del Valle de Aburrá en el año base 2011. Allí puede verse que ese año se emitieron 3.488.655 toneladas de CO₂, 8.926 toneladas de CH₄ y 66 toneladas de N₂O, estas emisiones corresponden a generar 3.731.474 toneladas de CO₂ equivalente.

TABLA 5.3. EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR TIPO DE FUENTE (Mg), AÑO 2011

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Fuentes móviles	2.587.957	8.874	53
Fuentes fijas	900.698	53	13
Total	3.488.655	8.926	66
Total CO ₂ -eq	3.731.474		

En cuanto a la distribución de esas emisiones, en la Figura 5.3 puede verse que las fuentes móviles contribuyen con el 74% de las emisiones de CO₂, el 99% de las emisiones de CH₄ y el 80% de las emisiones de N₂O, mientras las fuentes fijas aportan el porcentaje restante de las emisiones de estos tres gases de efecto invernadero.

FIGURA 5.3. DISTRIBUCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE ACUERDO AL TIPO DE FUENTE



Así, el control de los gases de efecto invernadero deberá centrarse en las fuentes móviles, específicamente en medidas como la promoción del uso racional del vehículo, las buenas prácticas de inspección y mantenimiento, y el mejoramiento de la eficiencia energética de los vehículos (a su vez está relacionada con mejores tecnologías vehiculares), pues este tipo de medidas disminuyen el uso del combustible. Por su parte, el control en las fuentes fijas deberá enfocarse en el control de unas pocas fuentes de alimentación manual a carbón y al igual que en las fuentes móviles en el uso racional de los combustibles y en prácticas energéticas más eficientes.

Conclusiones

Fuentes móviles, año base 2011

La estimación de emisiones de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero generados por fuentes móviles en el Valle de Aburrá para el año base 2011, se hizo a través del modelo Sistema de Planteamiento de Alternativas Energéticas a Largo Plazo (LEAP, por sus siglas en inglés).

Al modelo LEAP se introdujo información sobre la composición del parque automotor, el perfil de antigüedad de la flota, el kilometraje recorrido en el primer año de vida del vehículo, el rendimiento del combustible y los factores de emisión de contaminantes. Es importante anotar que también se incluyeron perfiles de degradación para el kilometraje y los factores de emisión, pues estas variables cambian con el envejecimiento del vehículo.

Además de estimar la emisión de contaminantes, se evaluó la demanda energética del parque automotor por el consumo de gasolina, diesel y gas natural vehicular (GNV), cuya demanda difirió en $\pm 4\%$ de la demanda energética real informada por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y Empresas Públicas de Medellín (EPM) para el Valle de Aburrá.

En el año base 2011 el parque automotor del Valle de Aburrá estaba conformado por 797.569 vehículos, de los cuales el 44% eran autos, otro 44% eran motos (35% son motos de cuatro tiempos y 9% son motos de dos tiempos), 6% eran taxis, 4% eran camiones y el 2% restante eran buses. En cuanto a la conformación dentro de cada una de las categorías vehiculares se encontró lo siguiente:

- Autos: se clasificaron en livianos (cilindraje menor de 1,5 L), medianos (cilindraje entre 1,5 y 3,0 L) y pesados (cilindraje mayor de 3,0 L), sub-categorías que constituyen respectivamente el 50%, 44% y 6% de la categoría autos; en cuanto al uso de combustible el 88% de ellos usa gasolina, el 6% usa diesel y el 6% restante usa GNV.
- Taxis: el 91% de ellos son livianos (cilindraje menor de 1,5 L) y el 9% restante son medianos (cilindraje entre 1,5 y 3,0 L); el 35% utiliza gasolina, cerca del 26% usa diesel y 39% restante usa GNV.
- Buses: son livianos (cilindraje menor de 3,0 L) en un 31%, medianos (cilindraje entre 3,0 y 6,0 L) en un 57% y pesados (cilindraje mayor de 6,0 L) en un 12%; la mayoría utilizan diesel como combustible, aunque sobresale una pequeña proporción que usa gasolina y otra pequeña fracción de buses livianos que usa GNV.
- Camiones: están constituidos en mayor proporción por vehículos de tamaño mediano (cilindrajes entre 3,0 y 6,0 L) con un porcentaje del 48%, los camiones pesados (cilindraje mayor de 6,0 L) aportan el 40% y los livianos (cilindraje menor de 3,0 L) el 12%; el comportamiento en cuanto a tipo de combustible utilizado es similar al de los buses, es decir la gran mayoría usa diesel, y un pequeño número usan gasolina y GNV.
- Motos: esta categoría está conformada en un 80% por motos 4T y en un 20% por motos 2T. A su vez, las motos 4T se clasifican de acuerdo al cilindraje en livianas (menores de 0,15 L) con un aporte del 75%, medianas (cilindraje entre 0,15 y 0,3 L) con un aporte del 2%, y pesadas (cilindrajes superiores a 0,3 L) con una contribución del 3%. En cuanto a las motos 2T, todas son livianas, y tanto las motos de 2T como las de 4T son a gasolina.

En cuanto a la demanda energética se encontró que las categorías con mayor consumo de combustible son los autos y los camiones, que consumen res-

pectivamente el 34% y el 30% de la energía consumida por fuentes móviles, mientras que los buses, los taxis y las motos demandan el 16%, 14% y 6% respectivamente.

Respecto a la emisión de contaminantes criterio, los principales contribuyentes son los camiones que aportan 35%, 51%, 30% y 67% de las emisiones de CO, NO_x, VOC y PM2,5 respectivamente, mientras los autos hacen una importante contribución a las emisiones de CO y SO_x, pues participan con el 40% y 52% de las emisiones de estos dos contaminantes. Es importante resaltar las emisiones de VOC provenientes de las motos, que contribuyen con el 41% de las emisiones de este contaminante y el SO_x proveniente de los taxis, que aportan el 21% de las emisiones.

El análisis de la emisión de contaminantes por tipo de combustible arrojó a la gasolina como la responsable del 56% de las emisiones de CO, del 86% de las emisiones de SO_x y del 74% de las emisiones de VOC, mientras el diesel contribuye con el 77% de las emisiones de NO_x y el 75% de las emisiones de PM2,5. Por su parte, el GNV hace un aporte significativo a las emisiones de CO, contribuyendo con el 33% de las emisiones de ese contaminante.

En lo referente a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) se encontró que en el año 2011 el parque automotor del Valle de Aburrá emitió 2.852.556 toneladas de CO₂ equivalente. A las emisiones de CO₂ contribuye la gasolina con un 49%, el diesel con un 46% y el GNV con el 5% restante, mientras tanto las emisiones de CH₄ se encuentran dominadas por el GNV en un 86%, y en cuanto al N₂O sus emisiones se encuentran gobernadas por la gasolina en un 80%, por el diesel en un 11% y por el GNV en un 9%.

Fuentes móviles, periodo 2000-2011

Se analizó la evolución del parque automotor, la demanda energética, la emisión de contaminantes criterio y de gases de efecto invernadero en el Valle de Aburrá para el periodo 2000-2011, haciendo uso del modelo LEAP.

Se encontró que durante el periodo de estudio el parque automotor del Valle de Aburrá creció a una tasa general del 9% anual. Sin embargo, cuando se

analizó el crecimiento por categorías se encontró que las motos 4T y los taxis crecieron a tasas anuales del 27% y el 18% 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 del 1% anual.

En lo referente a la demanda energética se analizó el crecimiento vehicular por tipo de combustible y el consumo de combustible. En el caso de la gasolina se encontró que a pesar del crecimiento sostenido de este tipo de vehículos, la demanda de gasolina presentó una disminución continuada entre el año 2000 y el 2008, y solo en el año 2009 comenzó a aumentar nuevamente su consumo, algunas de las causas de dicho comportamiento se atribuyen a: En el año 2001 comienza a ofertarse el gas natural vehicular.

- El aumento continuo en el precio de la gasolina desincentiva su consumo por parte de los usuarios.
- Las crisis económicas mundiales desaceleran la economía nacional.
- Medidas de restricción vehicular como el pico y placa.
- Las mejores tecnologías vehiculares traen consigo el aumento en el rendimiento del combustible.
- Los programas de inspección y mantenimiento han hecho que los vehículos mantengan mejores condiciones de operación y por ende mantengan un mejor rendimiento de combustible.

Por su parte, la demanda de diesel ha sido proporcional al crecimiento de los vehículos que usan este combustible fósil, con una leve desaceleración en el año 2009; y en cuanto al GNV tanto el crecimiento de este tipo de vehículos como su consumo presentan un crecimiento exponencial que se ve interrumpido en los años 2009 y 2010.

- En general, la evolución de las emisiones de contaminantes criterio en el periodo 2000-2010 presentó una tendencia hacia la disminución. El comportamiento encontrado para cada uno de los contaminantes criterio fue el siguiente:
- CO: mantuvo una tendencia a la baja hasta el año 2008, y al año siguiente empezaron a incrementarse nuevamente las emisiones, aunque de una manera lenta. La gasolina aportó en promedio el 76% de las emisiones, el diesel el 11% y el GNV el 13% restante.

- NO_x : sus emisiones se mantuvieron casi constantes entre los años 2000 y 2005, entre 2006 y 2009 se presentó una disminución de las emisiones, y a partir del año 2010 éstas comenzaron a incrementarse lentamente. El combustible que hace el mayor aporte de NO_x es el diesel con un 74% en promedio, por su parte la gasolina contribuye con el 24% y el GNV con el 2%.
- SO_x : este contaminante pasó de un pico de 3.853 toneladas en el año 2006 a 279 toneladas en 2011, lo que significa una reducción del 93% en las emisiones. Dicha reducción se dio gracias al Área Metropolitana del Valle de Aburrá, la Alcaldía de Medellín y Ecopetrol que preocupados por la calidad del aire de la región decidieron firmar un convenio con compromisos especiales sobre los contenidos de azufre en el diesel y la gasolina.
- VOC: sus emisiones están marcadas por la disminución en el consumo de gasolina, combustible que aportó cerca del 80% de las emisiones, mientras el diesel contribuyó con un porcentaje aproximado del 20% y el GNV hizo un aporte poco significativo. Así, la tendencia general en las emisiones de este grupo de contaminantes ha sido hacia la baja entre los años 2000 y 2008, y luego se estabilizó en los años restantes.
- $\text{PM}_{2,5}$: como es de esperarse, las emisiones de $\text{PM}_{2,5}$ se encuentran dominadas por el combustible diesel. El contaminante mostró una tendencia creciente hasta el año 2004, y a partir del año siguiente las emisiones empezaron a decrecer debido a la mejora en las tecnologías vehiculares y la disminución en el kilometraje recorrido por vehículos diesel.

Es importante anotar que en general las emisiones promedio de contaminantes criterio por kilómetro recorrido disminuyeron (calculadas como la razón entre el total anual emitido de contaminante y el kilometraje total recorrido por todo el parque automotor). Dicho comportamiento se atribuye a la mejora en las tecnologías vehiculares (que traen consigo la mejora en el rendimiento del combustible y la disminución de emisiones por la instalación de dispositivos de control de emisiones), y a la disminución de los kilómetros recorridos año a año como respuesta al aumento en el precio del combustible.

Respecto a la emisión de gases de efecto invernadero, las emisiones de CO_2 presentaron una tendencia lenta pero creciente, en la cual la gasolina fue la responsable de aproximadamente el 54% de las emisiones, mientras el diesel aportó cerca del 43% y el GNV el 3% restante. Por su parte el CH_4 presentó

un aumento sostenido originado principalmente por el uso de GNV, así se pasó de emitir 20 toneladas del contaminante en el año 2001 a emitir 7.641 toneladas en el año 2011, lo que representa un aumento del 385%. En cuanto al óxido nitroso, sus emisiones han ido en aumento y es la gasolina la responsable de cerca del 84% de sus emisiones, mientras el diesel aportó en promedio el 10% y el GNV el 6% restante.

Por último, es importante señalar que la motorización está acompañada por el incremento de los volúmenes de tráfico, los embotellamientos y el incremento de las emisiones de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero. Así, aunque las emisiones hayan mostrado una tendencia hacia la disminución en el periodo 2000-2011, el aumento sostenido del parque llevará nuevamente hacia el aumento de las emisiones.

En los sistemas de transporte basados en el transporte privado, la motorización representa una tendencia de desarrollo no-sostenible, involucra el uso ineficiente de los recursos y produce contaminación ambiental, por lo que se debe encontrar el equilibrio entre las tendencias en motorización y el transporte sostenible.

Fuentes fijas, año base 2011

Para el año base 2011, en el Valle de Aburrá se identificaron 354 empresas con 1.373 fuentes de emisión. Los municipios con mayor densidad industrial fueron Medellín con el 43% de las empresas y el 39% de las fuentes fijas, e Itagüí con el 28% de las empresas y 22% fuentes fijas, mientras tanto los ocho municipios restantes del Valle de Aburrá se adjudican el 29% de las empresas y el 39% de las fuentes fijas.

En el análisis por actividad productiva se encontró que los sectores Textil y confección (TXT), Metalmecánico (MMC), Bebidas, alimentos y tabaco (BAT), Químico (QMC), y Cerámicos y vítreos (CVL) contribuyen con el 77% de las empresas y el 81,5% de las fuentes de emisión, es decir, cinco sectores de los doce identificados agrupan la mayor proporción de empresas y fuentes de emisión.

En lo relacionado con la demanda energética del sector industrial, en el año 2011 se consumieron 15.407 TJ de energía, de los cuales 63% provino del gas natural, 28% del carbón, 5% del *fuel oil* y 4% de la biomasa. Y al comparar la

demanda energética del año 2011 con la estimada para el 2009, se vio una disminución del 22% en el consumo de energía para este último año. También es importante destacar que el gas natural pasó de ser usado por el 42% de las fuentes en el año 2009, a ser usado por el 85% de las fuentes en el año 2011, reemplazando combustibles como el carbón y el *fuel oil* que pasaron de ser usados respectivamente por el 32% y el 19% de las fuentes en el año 2009, a ser usados por el 10% y el 3% de las fuentes en el año 2011.

El análisis de contaminantes criterio arrojó al sector TXT como el principal responsable de las emisiones de CO, SO_x, PM10 y PM2,5, pues el sector aportó respectivamente 55%, 56%, 42% y 40% de la emisión de estos contaminantes. Además, sobresalió el sector CVL que contribuyó con el 36% de las emisiones de NO_x y el sector BAT que aporta el 84% de las emisiones de VOC. El análisis de la emisión de contaminantes criterio por tipo de combustible, permitió reconocer al carbón como el principal responsable en la emisión de los contaminantes criterio considerados, a excepción de los VOC que provienen principalmente del gas natural. Así, el carbón emitió más del 77% de las emisiones de material particulado (PM, PM10 y PM2,5), 85% de las emisiones de SO_x, 73% de las emisiones de CO y 43% de las emisiones de NO_x; mientras al gas natural se le atribuyó 88% de las emisiones de VOC, 50% de las emisiones de NO_x, 22% de las emisiones de CO y 10% de las emisiones de SO_x. Por su parte el *fuel oil* y la biomasa emiten menos del 7% de la emisión de los contaminantes en cuestión.

Cuando se compararon las emisiones de contaminantes criterio estimadas en el año 2009 con las del año 2011, se encontró una disminución en la emisión de contaminantes, así: las emisiones de CO se redujeron en 70%, los NO_x en 37%, los SO_x en 61%, los VOC en 50%, y el PM, PM10 y PM2,5 disminuyeron en 59%, 58% y 49% respectivamente. Dichas reducciones están asociadas principalmente a los sectores TXT y CVL, y a su vez dichas reducciones pueden atribuirse al reemplazo de combustibles tradicionales como el carbón y el *fuel oil* con gas natural, al uso de procesos más eficientes y una contracción de la economía industrial.

Finalmente, en la emisión de gases de efecto invernadero se identificó a los sectores TXT, CVL y BAT como los responsables de más del 70% de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O; en cuanto a la responsabilidad por tipo de combustible se identificó al gas natural como el responsable del 63% de las emi-

siones de CO_2 , el 25% de las emisiones de CH_4 y el 69% de las emisiones de N_2O , mientras al carbón se le atribuyó el 30% de las emisiones de CO_2 , 72% de las emisiones de CH_4 y 28% de las emisiones de N_2O . Por su parte el *fuel oil* emite 6%, 2% y 2% respectivamente de las emisiones de CO_2 , CH_4 y N_2O , y la biomasa el 1% restante de estos gases.

Es importante anotar que al igual que con los contaminantes criterio, los gases de efecto invernadero también mostraron una tendencia decreciente para el año 2011, originada por el reemplazo de combustibles tradicionales con gas natural, al uso de procesos más eficientes y una contracción de la economía industrial. Así, las reducciones encontradas en las emisiones de CO_2 , CH_4 y N_2O del año 2009 al año 2011 fueron respectivamente del 25%, 71% y 15%.

Demanda de energía y emisiones en el Valle de Aburrá, año 2011

En el año 2011 las fuentes móviles y fuentes fijas del Valle de Aburrá consumieron 51.611 TJ de energía proveniente de la quema de combustibles fósiles y biomasa, de los cuales el 70% de la energía fue consumida por el parque automotor y el 30% restante por la industria.

Consecuente con este consumo de energía, las fuentes móviles contribuyen con el 98% de las emisiones de CO , 88% de las emisiones de NO_x , 93% de las emisiones de VOC y 79% de las emisiones de $\text{PM}_{2,5}$; mientras que las fuentes fijas hacen su principal aporte a las emisiones de SO_x , contribuyendo con el 89% de las emisiones de ese contaminante. En cuanto a los gases de efecto invernadero las fuentes móviles contribuyen con el 74% de las emisiones de CO_2 , el 99% de las emisiones de CH_4 y el 80% de las emisiones de N_2O , mientras las fuentes fijas aportan el porcentaje restante de las emisiones de estos tres gases de efecto invernadero.

Así, el enfoque para una adecuada gestión de la calidad del aire debe concentrar la mayor parte sus esfuerzos en el control y vigilancia de las fuentes móviles, especialmente en las categorías autos, camiones y motos, identificados como los principales responsables de la emisión de contaminantes criterio. En cuanto a las fuentes fijas, el control de las emisiones de SO_x deberá centrarse en la vigilancia de las fuentes que usan carbón como combustible, pues éste se identificó como el principal aportante de los SO_x en el sector industrial.

El control de los gases de efecto invernadero también deberá centrarse en las fuentes móviles, específicamente en medidas como la promoción del uso racional del vehículo, las buenas prácticas de inspección y mantenimiento y el mejoramiento de la eficiencia energética de los vehículos. Por su parte, el control en las fuentes fijas deberá enfocarse en el control de unas pocas fuentes de alimentación manual a carbón y al igual que en las fuentes móviles en el uso racional de los combustibles y en prácticas energéticas más eficientes.



Bibliografía

- Área Metropolitana del Valle de Aburrá - Universidad Pontificia Bolivariana. (2004). Sistema de información metropolitana de la calidad del aire, SIMECA. Medellín.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá - Universidad Pontificia Bolivariana. (2010). Optimización del inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá. Medellín.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2007). Plan Integral de Desarrollo Metropolitano, 2008-2020. Medellín.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2011). Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Recuperado el 19 de diciembre de 2011, de www.areadigital.gov.co
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Universidad Pontificia Bolivariana. (2005). Actualización del Inventario de Emisiones Atmosféricas en el Valle de Aburrá, con geo-referenciación de éstas. Medellín.
- Cook, R., Touma, J., Beidler, A., & Strum, M. (2006). Preparing highway emissions inventories for urban scale modeling: A case study in Philadelphia. *Transportation Research, Part D*, 396-407.
- DANE. (2005). Censo oficial 2005.

- Davis, N., Lents, J., Osses, M., Nikkila, N., & Bart, M. (2005). Development and application of an international vehicle emissions model. Transportation Research Board 81st Annual Meeting. Washington, D.C.
- Federación Nacional de Distribuidores de Combustibles y Energéticos. (2011). Fendipetroleo Nacioanal. Recuperado el 09 de marzo de 2013, de www.fendipetroleo.com
- Han, S. S. (2010). Managing motorization in sustainable transport planning: the Singapore experience. *Journal of Transport Geography*, 314-321.
- Heaps, C. (2012). Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) system. [Software version 2012.0017]. Somerville, MA, USA: Stockholm Environment Institute.
- Lents, J., Walsh, M., He, K., Davis, N., Osses, M., & Tolvett, S. (2008). Air quality management: the framework, the inventory, estimating emissions from mobile sources. Medellín.
- Medellín, cómo vamos. (2011). Encuesta de Percepción Ciudadana. Medellín.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2010). Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas. Bogotá.
- National Toxicology Program, Department of Health and Human Services. (2011). Diesel Exhaust Particulates. Report on Carcinogens, Twelfth Edition, 153-155.
- Quijano, R., Botero, S., & Domínguez, J. (2012). MODERGIS application: Integrated simulation platform to promote and develop renewable sustainable energy plans, Colombian case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5176-5187.
- Saide, P., Zah, R., Osses, M., & Osse's de Eicker, M. (2009). Spatial disaggregation of traffic emission inventories in large cities using simplified top-down methods. *Atmospheric Environment*, 4914-4923.
- Schipper, L. (2011). Automobile use, fuel economy and CO2 emissions in industrialized countries: Encouraging trends through 2008? *Transport Policy*, 358-372.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Western Governors Association. (2005). Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones. México.

- Shabbir, R., & Ahmad, S. S. (2010). Monitoring urban transport air pollution and energy demand in Rawalpindi and Islamabad using leap model. *Energy*, 2323-2332.
- Tang, X., Zhang, Y., Yi, H., Ma, J., & Pu, L. (2012). Development a detailed inventory framework for estimating major pollutants emissions inventory for Yunnan Province, China. *Atmospheric Environment*, 116-125.
- U.S Environmental Protection Agency. (1995). AP 42, Fifth Edition. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources. North Carolina.
- UPME - Consorcio Bariloche. (2007). Consultoría para la formulación estratégica del plan de uso racional de energía y de fuentes no convencionales de energía 2007-2025. Bogotá.
- Zacharias, J. (2012). Resisting motorization in Guangzhou. *Habitat International*, 93-100.
- Zhang, Q., Wei, Y., Tian, W., & Yang, K. (2008). GIS-based emission inventories of urban scale: A case study of Hangzhou, China. *Atmospheric Environment*, 5150-5165.



Anexo A
Emisiones de contaminantes
criterio, periodo 2000-2011

Categoría	Cilindraje	Combustible	CO (Mg)											
			2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Autos	Liviano	Gasolina	30.810,7	29.791,0	28.923,6	28.164,9	24.645,1	21.569,1	20.471,9	18.763,0	15.031,6	14.832,0	14.323,0	12.449,0
		Diesel	2,0	2,0	1,9	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,3	1,9	1,9	2,1
		GNV	0,0	13,2	264,6	736,3	877,4	1.313,4	1.597,5	1.486,9	2.533,9	5.556,1	6.456,1	15.438,2
	Mediano	Gasolina	24.729,7	24.286,7	23.694,1	22.618,9	21.078,7	18.174,9	16.861,0	11.803,8	8.413,1	12.052,1	12.110,9	11.473,4
		Diesel	80,0	78,9	76,7	77,1	79,1	89,1	96,1	102,8	129,2	136,2	137,0	116,8
		GNV	0,0	5,3	217,3	327,4	265,0	1.714,7	977,0	2.302,6	5.017,4	6.294,4	6.290,3	7.336,3
	Pesado	Gasolina	3.822,7	3.735,4	3.635,7	3.561,9	3.332,1	2.803,9	3.550,2	2.392,3	1.599,9	1.657,2	1.488,4	1.662,3
		Diesel	28,4	27,0	25,4	24,1	22,4	20,6	22,8	14,3	10,8	10,5	9,9	8,6
		GNV	0,0	44,0	119,1	172,5	272,2	1.092,2	1.876,6	2.553,9	2.730,2	3.196,2	3.240,2	4.715,5
Taxis	Liviano	Gasolina	1.177,8	1.036,6	952,6	885,2	787,0	1.078,7	914,0	891,6	1.280,4	1.520,9	1.680,2	1.642,6
		GNV	0,0	66,0	138,2	275,6	536,3	645,8	1.508,7	1.838,3	2.013,9	1.357,7	1.143,1	1.098,8
	Mediano	Gasolina	839,6	771,5	661,2	379,8	259,0	261,0	88,6	48,3	52,8	19,0	70,7	83,0
		Diesel	1,0	0,9	7,3	24,7	37,2	43,8	42,4	35,8	26,5	19,9	17,1	13,5
		GNV	0,0	0,0	14,8	157,9	408,8	372,3	694,6	701,8	482,8	516,1	260,6	247,2
Buses	Liviano	Gasolina	6.609,8	6.584,7	6.524,7	6.388,9	6.204,8	3.424,8	3.378,2	2.487,5	3.024,3	3.070,8	3.273,7	3.616,7
		Diesel	1.387,9	1.393,5	1.290,0	1.309,2	1.279,5	1.259,4	1.234,0	1.109,7	1.065,2	994,9	970,7	1.015,6
		GNV	0,0	0,0	8,5	40,3	99,7	639,0	636,3	820,9	492,3	521,1	459,1	520,4
	Mediano	Gasolina	1.279,8	1.364,1	1.455,6	1.523,1	1.440,0	1.564,0	1.626,1	198,7	261,7	270,7	357,1	182,0
		Diesel	2.625,0	2.566,3	2.542,2	2.477,5	2.419,4	2.418,1	2.455,8	2.135,8	2.201,1	1.900,8	1.899,1	1.935,2
		GNV	0,0	0,0	17,6	31,7	317,5	97,4	140,1	2.462,5	2.878,7	2.449,5	2.634,4	3.539,8
	Pesado	Gasolina	1.182,8	1.284,1	1.452,0	1.626,7	1.879,3	1.994,4	2.205,7	818,6	814,2	745,2	763,9	1.467,8
		Diesel	1.984,8	1.944,8	1.949,5	1.925,0	1.923,0	1.895,7	1.644,7	1.413,5	1.284,8	1.079,1	1.104,0	1.124,2
	Camiones	Liviano	Gasolina	13.479,1	10.597,8	4.382,7	10.021,5	8.229,4	3.855,5	4.472,7	3.225,7	2.020,2	2.321,1	2.080,1
Diesel			676,2	664,1	661,9	637,2	634,8	601,5	609,5	492,6	434,9	414,5	400,5	412,3
GNV			0,0	0,0	139,0	475,1	1.388,7	2.392,5	2.682,8	1.710,7	1.488,9	1.641,9	1.988,8	2.341,7
Mediano		Gasolina	59.101,4	64.587,6	58.118,8	58.973,2	57.473,6	39.496,7	30.950,7	24.286,3	23.036,0	23.856,5	19.848,0	19.358,2
		Diesel	6.544,1	6.474,0	6.422,5	6.447,7	6.328,2	6.122,1	5.782,0	5.091,5	4.556,4	4.008,3	3.936,5	4.027,6
		GNV	0,0	0,0	236,3	1.024,8	1.853,0	10.350,5	8.811,2	8.925,7	7.535,3	7.979,0	7.624,9	8.603,8
Pesado		Gasolina	12.133,3	14.446,3	13.625,3	9.230,4	7.233,4	7.769,4	5.391,7	5.664,4	5.363,3	5.569,7	6.439,9	5.553,8
		Diesel	6.578,2	6.585,7	6.477,4	6.316,4	6.225,7	6.268,0	5.854,0	5.481,0	5.016,8	4.390,5	4.406,3	4.648,3
Motos 2T		Livianas	Gasolina	12.072,1	11.289,1	10.574,0	10.014,7	9.668,1	10.236,0	10.772,0	10.027,6	7.517,0	5.856,2	5.603,8
Motos 4T	Livianas	Gasolina	1.524,5	1.796,8	2.042,1	2.502,0	3.478,2	5.174,7	6.842,4	7.209,4	8.493,2	9.373,8	10.360,7	10.674,2
	Medianas	Gasolina	307,7	289,4	278,2	278,1	304,2	336,6	316,7	290,6	243,4	277,3	282,8	283,9
	Pesadas	Gasolina	264,5	268,5	261,4	269,6	309,5	358,9	378,6	417,3	431,7	447,4	481,7	485,0
Total			189.243,4	191.995,3	177.192,2	178.921,7	171.292,1	155.436,5	144.888,1	127.206,7	117.483,1	124.338,4	122.145,2	134.050,2



Categoría	Cilindraje	Combustible	NO _x (Mg)											
			2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Autos	Liviano	Gasolina	2.283,5	2.191,0	2.115,7	2.055,3	1.795,7	1.569,1	1.483,2	1.364,7	1.098,9	1.064,4	1.021,3	895,0
		Diesel	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	2,2	2,3	2,5
		GNV	0,0	2,2	4,0	9,9	10,4	15,9	23,3	23,6	36,9	72,5	75,1	155,7
	Mediano	Gasolina	1.760,9	1.729,7	1.690,5	1.629,0	1.545,8	1.370,5	1.290,2	1.052,2	907,1	1.095,3	1.164,4	1.093,9
		Diesel	42,0	43,7	44,9	50,2	50,3	72,8	90,3	104,6	143,2	153,9	161,7	166,3
		GNV	0,0	0,7	5,5	5,7	7,4	44,6	26,9	57,8	121,8	136,2	141,4	169,3
	Pesado	Gasolina	509,5	498,2	485,1	476,6	450,6	382,9	484,6	331,7	227,9	234,5	211,1	236,4
		Diesel	14,3	13,9	13,3	12,9	12,2	11,4	13,0	8,6	7,6	7,9	8,1	7,1
		GNV	0,0	1,6	3,1	5,7	8,2	29,3	45,0	61,7	58,7	60,1	65,9	93,3
Taxis	Liviano	Gasolina	380,7	335,8	303,8	271,6	231,3	288,8	235,5	222,6	309,7	363,4	396,2	383,3
		GNV	0,0	9,5	20,3	41,0	81,8	101,0	238,5	291,4	325,2	215,1	180,4	169,8
	Mediano	Gasolina	176,6	161,1	136,5	77,6	54,7	58,1	20,0	11,7	13,2	5,1	18,8	27,2
		Diesel	0,5	0,5	8,6	30,5	46,2	54,5	52,8	44,6	33,0	24,7	21,1	16,7
		GNV	0,0	0,0	1,8	18,7	48,0	44,1	81,8	82,0	56,0	58,9	29,3	27,3
Buses	Liviano	Gasolina	343,5	334,7	323,5	307,9	289,8	154,6	146,9	103,8	120,8	117,0	118,5	124,0
		Diesel	838,5	850,7	881,1	943,1	1.036,5	1.054,6	1.012,3	890,1	837,9	760,3	732,6	730,3
		GNV	0,0	0,0	0,2	0,8	1,8	11,3	10,7	13,2	7,5	7,5	6,2	6,6
	Mediano	Gasolina	28,5	28,0	27,5	26,5	22,9	22,7	21,6	2,5	2,9	2,8	3,3	2,2
		Diesel	1.965,0	2.092,2	2.264,2	2.437,0	2.708,2	2.882,6	2.660,4	2.531,3	2.402,5	2.237,3	2.291,9	2.390,5
		GNV	0,0	0,0	0,2	0,3	3,2	0,9	1,2	20,4	21,9	17,6	17,2	21,0
	Pesado	Gasolina	22,2	21,9	22,3	22,5	23,2	21,9	21,5	18,7	17,3	14,7	14,0	24,7
		Diesel	1.398,3	1.448,9	1.484,9	1.495,9	1.513,2	1.506,6	1.306,7	1.127,8	1.027,2	864,6	891,9	909,5
Camiones	Liviano	Gasolina	99,5	94,0	77,6	80,9	69,2	44,9	46,5	39,4	32,1	33,7	27,5	30,7
		Diesel	464,4	462,8	474,8	472,7	493,5	498,7	517,6	435,3	399,3	389,1	390,7	401,6
		GNV	0,0	0,0	0,8	2,5	6,7	10,3	10,3	9,4	7,4	7,3	7,9	8,3
	Mediano	Gasolina	524,9	529,1	513,0	501,3	488,3	308,9	282,4	253,8	227,9	221,8	189,9	203,6
		Diesel	4.463,2	4.511,2	4.561,8	4.722,2	4.822,2	4.827,7	4.603,8	4.136,5	3.773,5	3.344,7	3.341,9	3.402,8
		GNV	0,0	0,0	1,5	6,0	9,8	49,1	46,8	42,7	32,3	30,6	34,1	34,5
	Pesado	Gasolina	97,8	102,8	100,1	91,2	87,5	84,4	76,4	73,2	63,3	59,8	62,4	66,5
Diesel		4.476,4	4.508,1	4.477,8	4.467,4	4.570,3	4.779,2	4.527,0	4.366,0	4.116,0	3.648,2	3.727,4	4.108,3	
Motos 2T	Livianas	Gasolina	15,0	13,9	13,0	12,2	11,8	12,5	13,2	12,3	9,2	7,2	6,8	6,5
Motos 4T	Livianas	Gasolina	21,8	25,7	29,2	35,8	49,8	74,5	114,4	146,3	196,0	229,4	263,7	276,1
	Medianas	Gasolina	4,3	4,1	3,9	3,9	4,3	4,7	4,6	4,6	4,4	5,4	5,7	5,7
	Pesadas	Gasolina	7,5	7,6	7,3	7,6	8,7	10,1	10,7	11,9	12,3	12,7	13,7	13,7
Total			19.939,9	20.024,6	20.098,9	20.323,5	20.564,7	20.404,4	19.521,6	17.897,9	16.652,6	15.506,1	15.644,4	16.210,8

Categoría	Cilindraje	Combustible	SO _x (Mg)											
			2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Autos	Liviano	Gasolina	311,8	306,5	308,4	316,8	291,8	267,3	263,6	258,7	221,7	216,9	215,5	60,1
		Diesel	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	0,8	0,9	1,0	0,9	1,0	0,2	0,0
		GNV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,6
	Mediano	Gasolina	271,3	268,6	265,8	262,4	256,6	236,1	227,2	248,4	229,4	224,4	245,1	69,5
		Diesel	35,5	37,7	39,5	45,6	45,2	71,9	94,9	101,6	107,7	97,1	20,1	1,9
		GNV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,4	0,4	0,5
	Pesado	Gasolina	63,4	63,4	63,0	64,1	63,6	56,1	72,6	52,3	38,3	39,8	36,5	12,5
		Diesel	15,4	15,0	14,5	14,1	13,4	12,6	14,6	8,9	6,4	5,7	1,2	0,1
		GNV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
Taxis	Liviano	Gasolina	69,5	67,4	69,6	74,2	73,3	111,8	98,2	98,0	143,2	169,0	185,7	54,2
		GNV	0,0	0,1	0,1	0,3	0,5	0,7	1,6	1,9	2,2	1,4	1,2	1,1
	Mediano	Gasolina	23,6	21,4	17,9	10,1	8,0	9,6	3,5	2,3	2,7	1,1	4,2	2,1
		Diesel	0,4	0,4	8,9	31,8	48,1	57,8	56,3	42,2	23,4	14,6	2,5	0,2
		GNV	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1
Buses	Liviano	Gasolina	45,7	44,2	42,0	39,6	36,9	19,3	17,9	12,3	14,0	13,1	12,8	3,8
		Diesel	157,4	161,9	171,0	187,6	212,2	233,7	245,5	208,3	159,1	125,4	24,2	2,4
		GNV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
	Mediano	Gasolina	4,4	4,5	4,7	5,0	4,6	4,8	5,0	0,7	0,9	1,0	1,1	0,4
		Diesel	362,2	384,7	415,5	446,4	495,6	570,1	608,2	579,7	433,4	354,3	73,2	7,6
		GNV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Pesado	Gasolina	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,7	1,6	1,6	1,4	1,2	1,2	0,6
		Diesel	224,7	238,2	243,6	245,1	247,0	248,3	219,5	175,1	124,5	90,1	18,8	1,9
Camiones	Liviano	Gasolina	5,2	5,1	5,5	4,1	3,5	2,5	2,4	2,1	1,8	1,8	1,4	0,4
		Diesel	83,2	83,3	86,4	87,0	92,4	100,4	121,0	110,8	87,9	75,8	15,3	1,6
		GNV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Mediano	Gasolina	31,4	30,5	29,7	28,1	27,0	16,3	15,5	14,4	12,8	12,0	10,0	3,2
		Diesel	790,6	797,8	804,3	831,2	847,6	864,9	882,6	797,4	592,5	454,1	92,1	9,4
		GNV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
	Pesado	Gasolina	4,7	4,6	4,5	4,4	4,4	4,1	4,0	4,0	4,2	4,7	5,0	4,0
		Diesel	719,7	722,4	715,3	712,8	729,1	791,1	841,6	874,8	718,5	555,0	114,1	12,5
Motos 2T	Livianas	Gasolina	26,1	24,1	22,2	20,8	20,0	21,4	22,8	21,3	15,9	12,3	11,5	3,3
Motos 4T	Livianas	Gasolina	5,1	6,0	6,8	8,4	11,7	16,8	26,9	37,0	51,5	61,2	70,8	22,3
	Medianas	Gasolina	1,3	1,2	1,2	1,2	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,8	1,9	0,6
	Pesadas	Gasolina	2,0	2,1	2,0	2,0	2,4	2,8	2,9	3,3	3,4	3,5	3,7	1,1
Total			3.257,5	3.293,7	3.345,0	3.446,0	3.539,4	3.725,1	3.853,1	3.660,5	3.000,2	2.539,9	1.170,7	278,6



Categoría	Cilindraje	Combustible	VOC (Mg)											
			2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Autos	Liviano	Gasolina	2.881,0	2.759,7	2.650,8	2.551,0	2.204,9	1.905,6	1.785,0	1.611,0	1.269,8	1.236,1	1.175,4	1.003,6
		Diesel	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6	0,9	0,8	0,9
		GNV	0,0	0,0	1,8	5,1	6,2	9,3	10,7	9,6	16,6	37,1	43,8	106,6
	Mediano	Gasolina	1.984,4	1.931,5	1.866,2	1.763,1	1.625,2	1.385,4	1.270,7	885,1	619,1	870,8	862,7	806,2
		Diesel	36,7	36,2	35,1	35,2	36,2	40,2	42,9	45,6	56,9	59,9	56,9	30,8
		GNV	0,0	0,0	1,4	2,0	1,6	10,5	5,8	14,0	30,8	39,7	38,6	43,5
	Pesado	Gasolina	375,3	362,4	348,6	336,8	310,3	257,3	321,1	212,6	139,4	142,1	125,6	138,0
		Diesel	13,2	12,5	11,7	11,2	10,4	9,5	10,6	6,6	5,0	4,8	4,4	3,8
		GNV	0,0	0,4	1,0	1,3	2,1	8,9	15,6	20,9	23,0	27,6	27,0	38,9
Taxis	Liviano	Gasolina	124,5	106,1	92,7	79,7	65,6	77,5	61,8	57,5	78,5	92,1	100,3	96,9
		GNV	0,0	0,2	0,4	0,7	1,3	1,6	3,6	4,3	4,6	3,1	2,6	2,5
	Mediano	Gasolina	36,0	32,9	28,0	16,0	11,0	11,4	3,9	2,2	2,4	0,9	3,4	4,4
		Diesel	0,5	0,4	3,2	10,8	16,2	19,0	18,4	15,6	11,5	8,7	7,5	5,9
		GNV	0,0	0,0	0,0	0,4	0,9	0,8	1,5	1,6	1,1	1,2	0,6	0,6
Buses	Liviano	Gasolina	630,7	624,2	614,1	596,3	573,6	313,5	305,9	222,6	267,1	267,5	281,0	305,5
		Diesel	202,5	199,1	196,7	197,8	200,8	197,2	190,6	168,8	160,2	146,4	141,5	141,9
		GNV	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	2,1	2,1	2,7	1,6	1,7	1,5	1,7
	Mediano	Gasolina	94,2	98,0	101,9	103,7	95,4	100,8	101,8	12,0	15,6	15,4	19,8	10,4
		Diesel	461,7	455,6	456,1	450,1	447,2	457,1	469,5	424,6	439,4	392,2	396,6	408,3
		GNV	0,0	0,0	0,1	0,1	1,0	0,3	0,5	8,2	9,6	8,3	9,0	12,2
	Pesado	Gasolina	81,9	86,3	94,6	102,6	114,6	117,5	125,5	63,4	61,9	55,5	55,8	105,1
		Diesel	351,8	342,9	344,5	340,5	341,1	336,9	292,8	251,6	229,0	192,6	197,9	202,0
Camiones	Liviano	Gasolina	733,6	603,8	298,7	554,7	459,2	236,5	265,4	202,2	141,0	158,0	138,1	165,8
		Diesel	120,6	119,1	119,6	116,2	117,1	112,7	116,5	97,2	88,6	86,3	84,7	87,4
		GNV	0,0	0,0	0,5	1,7	5,1	9,0	10,2	6,0	5,3	5,9	7,2	8,6
	Mediano	Gasolina	3.403,9	3.640,7	3.348,6	3.367,0	3.284,7	2.207,5	1.808,3	1.487,0	1.393,0	1.421,8	1.200,6	1.219,6
		Diesel	1.171,9	1.162,7	1.158,1	1.167,6	1.152,3	1.121,3	1.068,9	957,0	872,7	776,4	769,1	788,0
		GNV	0,0	0,0	0,8	3,7	6,8	38,4	31,5	32,3	27,7	29,7	27,0	30,9
	Pesado	Gasolina	680,2	783,3	741,9	543,6	456,4	475,5	365,9	374,7	345,4	349,0	392,4	359,5
		Diesel	1.168,1	1.172,1	1.155,8	1.129,3	1.116,3	1.125,1	1.049,1	976,8	889,5	777,5	785,1	840,7
Motos 2T	Livianas	Gasolina	5.330,4	4.976,3	4.653,0	4.400,4	4.246,5	4.500,5	4.742,7	4.416,5	3.309,3	2.574,5	2.458,2	2.366,0
Motos 4T	Livianas	Gasolina	307,7	362,6	411,9	504,8	702,2	1.045,8	1.399,7	1.501,5	1.793,6	1.992,8	2.212,6	2.282,9
	Medianas	Gasolina	61,9	58,1	55,8	55,8	61,0	67,6	63,7	58,8	49,8	57,1	58,4	58,6
	Pesadas	Gasolina	57,3	58,1	56,5	58,2	66,9	77,7	82,0	90,4	93,6	97,0	104,3	104,9
Total			20.310,9	19.986,0	18.850,7	18.508,4	17.741,4	16.280,4	16.044,8	14.241,7	12.453,3	11.930,5	11.790,3	11.782,7



Categoría	Cilindraje	Combustible	PM2,5 (Mg)											
			2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Autos	Liviano	Gasolina	6,40	6,48	6,70	7,06	6,70	6,33	6,43	6,47	5,67	5,73	5,84	5,53
		Diesel	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,13	0,14	0,15	0,22	0,22	0,25
		GNV	0,00	0,01	0,11	0,35	0,49	0,72	0,61	0,40	0,76	1,88	2,48	6,77
	Mediano	Gasolina	4,61	4,69	4,77	4,83	4,85	4,57	4,51	4,73	4,38	4,65	5,18	5,00
		Diesel	3,29	3,51	3,69	4,18	4,46	6,33	8,04	9,78	13,62	14,85	15,45	13,74
		GNV	0,00	0,00	0,09	0,03	0,08	0,61	0,27	0,72	1,80	2,62	2,22	1,91
	Pesado	Gasolina	0,86	0,87	0,89	0,92	0,93	0,84	1,11	0,82	0,61	0,65	0,61	0,72
		Diesel	1,42	1,42	1,40	1,40	1,37	1,34	1,59	1,08	0,93	0,97	0,99	0,90
		GNV	0,00	0,02	0,06	0,05	0,08	0,37	0,74	0,89	1,08	1,46	1,21	1,62
Taxis	Liviano	Gasolina	1,39	1,37	1,43	1,54	1,53	2,47	2,20	2,22	3,30	3,94	4,39	4,31
		GNV	0,00	0,03	0,07	0,14	0,28	0,35	0,83	1,02	1,13	0,77	0,66	0,65
	Mediano	Gasolina	0,39	0,36	0,31	0,18	0,14	0,18	0,06	0,04	0,05	0,02	0,08	0,14
		Diesel	0,04	0,03	0,65	2,31	3,52	4,33	4,29	3,70	2,81	2,17	1,92	1,58
		GNV	0,00	0,00	0,00	0,03	0,07	0,07	0,12	0,12	0,09	0,09	0,05	0,05
Buses	Liviano	Gasolina	4,11	4,09	4,03	3,94	3,83	2,09	2,04	1,48	1,79	1,79	1,87	2,01
		Diesel	23,33	26,18	18,24	20,60	18,21	20,01	21,36	20,80	21,79	21,70	19,57	20,76
		GNV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,07	0,07	0,09	0,06	0,06	0,06	0,07
	Mediano	Gasolina	0,54	0,58	0,62	0,65	0,62	0,66	0,69	0,09	0,12	0,13	0,15	0,13
		Diesel	77,53	81,37	79,95	83,88	82,20	88,31	93,56	66,51	70,96	63,87	66,96	65,16
		GNV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,08	0,10	0,09	0,11	0,15
	Pesado	Gasolina	0,31	0,32	0,35	0,37	0,41	0,41	0,43	0,27	0,26	0,23	0,23	0,43
		Diesel	41,74	109,59	123,69	94,60	113,63	117,71	108,27	65,88	65,15	60,11	58,31	33,88
Camiones	Liviano	Gasolina	3,62	3,03	1,58	2,76	2,29	1,23	1,36	1,07	0,78	0,87	0,75	0,89
		Diesel	64,81	76,67	83,38	97,34	109,35	76,12	67,12	44,08	39,36	43,16	48,18	44,80
		GNV	0,00	0,00	0,01	0,03	0,11	0,20	0,25	0,08	0,08	0,09	0,12	0,15
	Mediano	Gasolina	12,83	13,61	12,68	12,72	12,45	8,30	6,99	5,93	5,56	5,65	4,82	5,00
		Diesel	737,77	689,53	786,38	805,70	828,12	731,66	631,88	458,32	438,65	454,96	479,29	396,95
		GNV	0,00	0,00	0,02	0,09	0,18	1,11	0,65	0,74	0,71	0,85	0,45	0,56
	Pesado	Gasolina	2,08	2,36	2,25	1,72	1,49	1,54	1,25	1,29	1,23	1,28	1,42	1,85
		Diesel	396,70	451,36	510,28	496,80	539,52	508,63	429,57	310,57	300,21	287,00	293,75	300,32
Motos 2T	Livianas	Gasolina	119,70	111,68	104,37	98,65	95,19	100,92	106,40	99,09	74,24	57,73	55,08	52,97
Motos 4T	Livianas	Gasolina	10,82	12,75	14,49	17,75	24,70	36,80	56,43	72,17	96,72	113,39	130,54	137,11
	Medianas	Gasolina	2,19	2,05	1,97	1,97	2,16	2,39	2,32	2,32	2,21	2,71	2,88	2,93
	Pesadas	Gasolina	3,74	3,79	3,69	3,80	4,37	5,07	5,36	5,91	6,12	6,34	6,81	6,85
Total			1.520,28	1.607,84	1.768,22	1.766,51	1.863,44	1.731,83	1.566,93	1.188,89	1.162,42	1.162,01	1.212,63	1.116,09



Anexo B
Emisiones de **gases de efecto
invernadero**, periodo 2000-2011

Categoría	Cilindraje	Combustible	CO ₂ (Mg)											
			2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Autos	Liviano	Gasolina	494.530	486.134	489.076	502.517	462.776	423.957	418.142	410.236	351.557	344.002	341.712	317.762
		Diesel	242	248	257	281	307	285	306	388	451	647	658	718
		GNV	0	676	751	1.834	1.904	2.918	4.260	4.333	6.800	13.250	13.568	27.374
	Mediano	Gasolina	430.302	426.046	421.521	416.094	406.990	374.481	360.299	393.957	363.791	355.914	388.788	367.349
		Diesel	12.502	13.261	13.909	16.059	15.929	25.315	33.397	40.231	56.888	61.524	63.754	59.922
		GNV	0	105	861	883	1.142	6.780	4.054	8.638	18.044	19.985	20.563	24.355
	Pesado	Gasolina	100.499	100.501	99.948	101.724	100.880	89.046	115.101	82.928	60.681	63.111	57.937	66.053
		Diesel	5.426	5.290	5.094	4.964	4.713	4.438	5.150	3.524	3.376	3.623	3.790	3.309
		GNV	0	223	428	794	1.130	3.990	6.089	8.272	7.802	7.881	8.587	12.003
Taxis	Liviano	Gasolina	110.212	106.883	110.395	117.717	116.254	177.250	155.757	155.472	227.098	268.108	294.565	286.403
		GNV	0	2.888	6.162	12.447	24.944	30.885	73.059	89.261	99.920	65.829	55.177	51.717
	Mediano	Gasolina	37.454	33.904	28.311	16.044	12.707	15.212	5.482	3.620	4.312	1.816	6.619	11.236
		Diesel	156	139	3.126	11.196	16.935	20.350	19.805	16.705	12.355	9.233	7.902	6.231
		GNV	0	0	275	2.854	7.288	6.654	12.313	12.295	8.363	8.775	4.346	4.028
	Buses	Liviano	Gasolina	72.478	70.023	66.593	62.763	58.480	30.536	28.321	19.450	22.206	20.847	20.313
Diesel			55.404	56.995	60.210	66.044	74.700	82.263	86.442	82.505	84.041	79.442	76.721	76.331
GNV			0	0	135	611	1.442	8.780	8.271	10.158	5.729	5.704	4.673	4.912
Mediano		Gasolina	6.953	7.178	7.484	7.881	7.309	7.595	7.935	1.132	1.369	1.605	1.758	1.865
		Diesel	127.496	135.435	146.267	157.144	174.462	200.691	214.109	229.595	228.871	224.500	231.826	242.378
		GNV	0	0	26	56	400	138	195	3.721	3.780	4.347	4.083	4.719
Pesado		Gasolina	3.200	3.151	3.135	3.072	3.015	2.698	2.539	2.539	2.265	1.907	1.826	3.041
		Diesel	79.091	83.840	85.745	86.269	86.956	87.410	77.269	69.344	65.719	57.116	59.548	60.678
Camiones		Liviano	Gasolina	8.242	8.164	8.697	6.527	5.582	3.902	3.828	3.325	2.831	2.900	2.238
	Diesel		29.285	29.312	30.400	30.628	32.517	35.349	42.604	43.871	46.429	48.053	48.360	49.859
	GNV		0	0	122	373	968	1.473	1.452	1.327	1.028	1.004	1.073	1.109
	Mediano	Gasolina	49.865	48.346	47.059	44.610	42.833	25.900	24.525	22.814	20.330	19.047	15.927	16.753
		Diesel	278.323	280.863	283.146	292.599	298.395	304.487	310.724	315.828	312.864	287.756	291.717	296.777
		GNV	0	0	267	1.063	1.733	8.624	8.233	7.437	5.573	5.214	5.869	5.822
	Pesado	Gasolina	7.447	7.336	7.117	7.041	7.013	6.550	6.324	6.266	6.661	7.471	7.879	21.341
		Diesel	253.374	254.311	251.804	250.917	256.658	278.487	296.292	346.466	379.437	351.657	361.521	397.416
	Motos 2T	Livianas	Gasolina	41.412	38.180	35.243	32.981	31.765	33.957	36.179	33.791	25.247	19.441	18.267
Motos 4T	Livianas	Gasolina	8.152	9.586	10.858	13.319	18.606	26.670	42.599	58.637	81.692	96.990	112.327	117.670
	Medianas	Gasolina	2.128	1.976	1.884	1.882	2.070	2.275	2.198	2.274	2.267	2.834	3.018	3.034
	Pesadas	Gasolina	3.235	3.260	3.147	3.237	3.734	4.380	4.653	5.156	5.372	5.546	5.906	5.883
Total			2.217.409	2.214.252	2.229.457	2.274.425	2.282.537	2.333.726	2.417.910	2.495.494	2.525.146	2.467.077	2.542.817	2.587.957

Categoría	Cilindraje	Combustible	CH ₄ (Mg)											
			2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Autos	Liviano	Gasolina	468,5	449,1	431,9	416,3	360,4	312,1	292,8	264,9	209,3	204,0	194,4	166
		Diesel	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		GNV	0,0	1,2	59,1	167,7	204,1	303,3	350,6	315,2	545,0	1.214,3	1.434,8	3.494
	Mediano	Gasolina	323,6	315,3	304,9	288,4	266,2	227,4	208,8	145,6	102,7	144,5	143,6	134
		Diesel	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
		GNV	0,0	0,4	45,0	65,1	52,3	345,5	190,6	458,8	1.013,4	1.303,7	1.269,4	1.432
	Pesado	Gasolina	62,3	60,2	58,0	56,1	51,8	43,1	53,8	35,7	23,5	24,0	21,3	23
		Diesel	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
		GNV	0,0	11,6	33,2	43,6	70,6	291,4	514,0	687,9	754,4	907,5	887,1	1.279
Taxis	Liviano	Gasolina	23,0	19,8	17,4	15,1	12,6	15,1	12,2	11,4	15,6	18,4	20,0	19
		GNV	0,0	6,6	13,5	26,2	49,1	57,2	131,1	157,8	170,0	114,6	96,0	92
	Mediano	Gasolina	7,2	6,6	5,6	3,2	2,2	2,3	0,8	0,4	0,5	0,2	0,7	1
		Diesel	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
		GNV	0,0	0,0	1,2	12,6	32,5	29,6	55,1	55,7	38,4	41,1	20,8	20
Buses	Liviano	Gasolina	75,1	74,4	73,2	71,1	68,4	37,4	36,5	26,6	31,9	31,9	33,5	36
		Diesel	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
		GNV	0,0	0,0	0,8	3,7	9,1	58,4	58,3	75,6	45,5	48,4	42,8	49
	Mediano	Gasolina	11,3	11,8	12,3	12,5	11,5	12,2	12,3	1,5	1,9	1,9	2,4	1
		Diesel	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
		GNV	0,0	0,0	1,4	2,5	25,3	7,8	11,4	201,9	237,7	205,3	222,4	301
	Pesado	Gasolina	9,8	10,3	11,3	12,2	13,7	14,0	14,9	7,6	7,4	6,6	6,7	13
		Diesel	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
	Camiones	Liviano	Gasolina	87,1	71,7	35,5	65,9	54,5	28,1	31,5	24,0	16,8	18,8	16,4
Diesel			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
GNV			0,0	0,0	12,3	42,7	126,7	221,6	252,3	147,3	129,6	144,6	177,2	211
Mediano		Gasolina	404,6	432,7	398,1	400,3	390,5	262,4	215,1	176,9	165,8	169,2	142,9	145
		Diesel	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
		GNV	0,0	0,0	20,9	91,2	167,3	947,7	778,5	798,6	683,1	733,3	668,3	762
Pesado		Gasolina	80,8	93,1	88,2	64,6	54,3	56,5	43,5	44,6	41,2	41,6	46,8	43
		Diesel	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
Motos 2T		Livianas	Gasolina	697,8	651,4	609,1	576,1	555,9	589,1	620,9	578,2	433,2	337,0	321,8
Motos 4T	Livianas	Gasolina	40,3	47,4	53,9	66,1	91,9	136,8	183,2	196,5	234,7	260,8	289,6	299
	Medianas	Gasolina	8,1	7,6	7,3	7,3	8,0	8,8	8,3	7,7	6,5	7,5	7,6	8
	Pesadas	Gasolina	7,5	7,6	7,4	7,6	8,8	10,2	10,7	11,8	12,3	12,7	13,7	14
Total			2.307,0	2.278,9	2.301,3	2.518,1	2.687,7	4.018,1	4.087,4	4.432,4	4.920,4	5.992,0	6.080,1	8.874



Categoría	Cilindraje	Combustible	N ₂ O (Mg)											
			2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Autos	Liviano	Gasolina	6,74	6,95	7,39	8,02	7,81	7,53	7,75	7,97	7,11	7,11	7,27	6,97
		Diesel	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		GNV	0,00	0,02	0,01	0,03	0,03	0,05	0,07	0,07	0,11	0,22	0,23	0,47
	Mediano	Gasolina	15,28	15,67	16,08	16,52	16,92	16,33	16,27	19,27	18,72	18,23	20,50	19,63
		Diesel	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,09	0,12	0,15	0,21	0,23	0,24	0,24
		GNV	0,00	0,01	0,04	0,01	0,05	0,29	0,18	0,39	0,84	0,95	0,99	1,18
	Pesado	Gasolina	5,76	5,88	5,97	6,20	6,32	5,73	7,56	5,58	4,20	4,43	4,14	4,80
		Diesel	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
		GNV	0,00	0,02	0,03	0,06	0,08	0,29	0,44	0,61	0,58	0,59	0,66	0,93
Taxis	Liviano	Gasolina	2,18	2,15	2,26	2,44	2,44	3,99	3,56	3,60	5,38	6,39	7,08	6,94
		GNV	0,00	0,07	0,16	0,32	0,63	0,79	1,86	2,28	2,55	1,69	1,42	1,34
	Mediano	Gasolina	1,86	1,69	1,42	0,81	0,65	0,80	0,29	0,20	0,24	0,10	0,37	0,64
		Diesel	0,00	0,00	0,01	0,04	0,06	0,07	0,07	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02
		GNV	0,00	0,00	0,02	0,18	0,46	0,42	0,78	0,78	0,53	0,56	0,28	0,26
Buses	Liviano	Gasolina	0,90	0,92	0,90	0,91	0,92	0,50	0,49	0,34	0,42	0,41	0,41	0,42
		Diesel	0,11	0,11	0,12	0,13	0,15	0,17	0,18	0,17	0,18	0,17	0,16	0,17
		GNV	0,00	0,00	0,00	0,02	0,05	0,28	0,27	0,34	0,19	0,19	0,16	0,17
	Mediano	Gasolina	0,26	0,29	0,32	0,37	0,36	0,39	0,43	0,07	0,08	0,10	0,11	0,12
		Diesel	0,53	0,57	0,62	0,67	0,76	0,88	0,94	1,01	1,05	1,06	1,12	1,18
		GNV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,16	0,15	0,26	0,24	0,28
	Pesado	Gasolina	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,12	0,12	0,13	0,12	0,11	0,11	0,18
		Diesel	0,42	0,43	0,44	0,44	0,45	0,46	0,41	0,37	0,35	0,31	0,33	0,34
	Camiones	Liviano	Gasolina	0,08	0,08	0,05	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,05
Diesel			0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11	0,11	0,11
GNV			0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Mediano		Gasolina	1,05	1,06	1,06	1,05	1,05	0,66	0,66	0,66	0,65	0,63	0,55	0,59
		Diesel	1,26	1,28	1,30	1,35	1,38	1,41	1,45	1,46	1,50	1,40	1,44	1,48
		GNV	0,00	0,00	0,01	0,04	0,07	0,36	0,35	0,32	0,25	0,24	0,28	0,28
Pesado		Gasolina	0,21	0,22	0,21	0,22	0,24	0,24	0,26	0,30	0,40	0,50	0,55	1,80
		Diesel	1,34	1,36	1,35	1,36	1,39	1,51	1,59	1,82	1,99	1,89	1,98	2,23
Motos 2T		Livianas	Gasolina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Motos 4T	Livianas	Gasolina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Medianas	Gasolina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Pesadas	Gasolina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Total			38,22	39,04	40,04	41,54	42,62	43,52	46,27	48,26	48,04	48,03	50,85	52,86

Sobre las **autoras**

Diana Marcela Quiceno Rendón



Ingeniera Química de la Universidad de Antioquia y candidata a Especialista en Ingeniería Ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana.

En el año 2007 comenzó su práctica 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 continua trabajando en actividades enmarcadas en el desarrollo y actualización del inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá.

María Victoria Toro Gómez



Ingeniera Química de la Universidad Pontificia Bolivariana, máster en Contaminación Ambiental de la Universidad Politécnica de Madrid y Ph.D en Ingeniería de la Universidad Politécnica de Cataluña.

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).



**Universidad
Pontificia
Bolivariana**

SU OPINIÓN



Para la Editorial UPB es muy importante ofrecerle un excelente producto.
La información que nos suministre acerca de la calidad de nuestras publicaciones será muy valiosa en el proceso de mejoramiento que realizamos.

Para darnos su opinión, comuníquese a través de la línea (57)(4) 354 4565
o vía E-mail a editorial@upb.edu.co

Por favor adjunte datos como el título y la fecha de publicación, su nombre, e-mail
y número telefónico.

En el Valle de Aburrá la contaminación del aire genera cada vez mayor preocupación pública a medida que crece el tráfico, la industrialización y la urbanización. De acuerdo con la Encuesta de Percepción Ciudadana 2011, los habitantes de Medellín perciben que los problemas ambientales que requieren mayor atención son la congestión vehicular, la calidad del aire y la contaminación de las fuentes de agua.

Así, conscientes de la preocupación de la ciudadanía por la calidad del aire de la región y de acuerdo con las disposiciones de las normas nacionales, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá como autoridad ambiental urbana, y la Universidad Pontificia Bolivariana como institución educativa líder en la región en el desarrollo de estudios relacionados con la gestión de la calidad del aire, trabajan desde hace más de una década en diferentes estrategias de descontaminación del aire. De este modo, con el ánimo de adquirir herramientas para la toma de decisiones, se ha elaborado el presente inventario de emisiones atmosféricas, el cual contiene información para la gestión y el pronóstico de la calidad del aire.

