



El uso de la energía y la contaminación atmosférica. Caso de estudio: Valle de Aburrá (Antioquia, Colombia), 2015

Echeverri Londoño, Carlos Alberto

El uso de la energía y la contaminación atmosférica. Caso de estudio: Valle de Aburrá
(Antioquia, Colombia), 2015

CIENCIA *ergo-sum*, vol. 29, núm. 3, noviembre 2022-febrero 2023 | e171

Ciencias de la Tierra y la Atmósfera

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Echeverri Londoño, C. A. (2022). El uso de la energía y la contaminación atmosférica. Caso de estudio: Valle de Aburrá (Antioquia, Colombia), 2015. CIENCIA *ergo-sum*, 29(3). <http://doi.org/10.30878/ces.v29n3a5>

El uso de la energía y la contaminación atmosférica. Caso de estudio: Valle de Aburrá (Antioquia, Colombia), 2015

The use of energy and air pollution. Case study: Valle de Aburrá (Antioquia, Colombia), 2015

Carlos Alberto Echeverri Londoño

Universidad de Medellín, Colombia

cecheverri@udemedellin.edu.co

 <http://orcid.org/0000-0001-8849-6896>

Recepción: 18 de enero de 2021

Aprobación: 6 de mayo de 2021

RESUMEN

Se tiene como objetivo cuantificar las formas de energía que alimentan al Valle de Aburrá, así como caracterizar la generación de contaminantes. Se emplearon los poderes caloríficos de los combustibles para estimar el suministro de energía que estos aportan y factores de emisión de contaminantes a la atmósfera. En el caso del Valle de Aburrá se comprueba que el suministro actual en energía se apoya en un 81.4% en recursos no renovables. Los sectores transporte e industrial son los mayores consumidores de energía con una participación del 45.4% y 34.9 % del total de la energía consumida en el valle. El sector transporte es el principal responsable de la emisión de contaminantes a la atmósfera.

PALABRAS CLAVE: balance de energía, ecosistema urbano, contaminación atmosférica.

ABSTRACT

The objective is to quantify the forms of energy that feed the Aburrá Valley, as well as to characterize the generation of pollutants. The calorific values of the fuels were used to estimate the energy supply they provide and emission factors to estimate the emission of pollutants into the atmosphere.. In the case of Valle de Aburrá, the current energy supply is based on 81,4% of non-renewable resources. The transport and industrial sectors are the largest consumers of energy, with a participation of 45,4% and 34,9% of the total energy consumed in the Aburrá Valley. The transport sector is the main responsible for the emission of pollutants into the atmosphere.

KEYWORDS: energy balance, urban ecosystem, atmospheric pollution.

INTRODUCCIÓN

El Valle de Aburrá se puede considerar como un ecosistema urbano, pues es un sistema funcional con biocenosis (población humana compuesta por poblaciones de animales y vegetales reducidas), cuenta con un clima particular y posee un metabolismo (flujo de energía y de materiales), es decir, es un complejo sistema termodinámico abierto al ambiente. Es abierto porque para funcionar necesita energía y materiales que puede asimilar (metabolismo), además de que está constituido de partes que realizan diferentes funciones. El metabolismo urbano determina nuestras exigencias de materias primas y el impacto que su empleo tiene en la biosfera, además de ayudarnos a comprender las relaciones entre estos materiales y los procesos sociales.

Todas las actividades humanas implican el uso de cierta cantidad de energía. Este hecho supone toda una serie de efectos sobre el ambiente que abarcan desde su origen hasta su transporte y consumo. Sin hacer un inventario completo de los problemas que la utilización de la energía plantea al ambiente, sí es posible citar a los principales tipos de energía empleados. La combustión del carbón y de algunos combustibles derivados del petróleo como la gasolina y el diésel produce dióxido de azufre (SO_2), un contaminante que significa un riesgo para la salud y los ecosistemas. El diésel también es clave en la producción de material particulado (PM por sus siglas en inglés).

AUTOR PARA CORRESPONDENCIA

cecheverri@udemedellin.edu.co

La combustión de la gasolina en los motores de los vehículos libera hacia la atmósfera óxidos de nitrógeno (NOx) e hidrocarburos, ambos precursores de los oxidantes fotoquímicos como el ozono (O₃). Lo anterior sin contar con los efectos climáticos debido al aumento en la concentración del dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, el cual también está ligado a la combustión de combustibles fósiles.

El balance de energía en un ecosistema urbano es una herramienta valiosa para identificar todos los factores determinantes para su funcionamiento y para analizar las relaciones existentes entre la población y el ambiente. Si se hace esto, es posible demostrar cómo funciona un ecosistema urbano y precisar mejor las relaciones entre las ciudades y los territorios en donde están situadas (Deleage y Souchon, 1991).

Un ecosistema urbano no puede funcionar sin una fuente permanente de energía. Haciendo un balance de materia y energía, perspectiva integradora para el estudio del funcionamiento de un ecosistema urbano, se pueden cuantificar las formas de energía y materia que alimentan el sistema, así como caracterizar la generación de contaminantes. Para que sean útiles, los balances de materia y energía deben estar obligatoriamente construidos de acuerdo con los principios de conservación de la materia y la energía.

En el siguiente apartado se expone la composición de la canasta energética del Valle de Aburrá durante 2015 y las emisiones atmosféricas ocasionadas por el consumo de dichas fuentes de energía a partir de la aplicación de balances de materia y energía. La energía eléctrica, la gasolina, el diésel, el gas natural, el petróleo crudo y el carbón fueron las principales fuentes que alimentaron el sistema del Valle de Aburrá durante 2015. La energía que aportaron se distribuye en cuatro sectores: industrial, comercial, residencial y transporte.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

Se obtuvo, procesó y analizó información secundaria obtenida del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), del Área Metropolitana Valle de Aburrá (AMVA), el Sistema Único de Información de Servicios Públicos (SUISPD), Secretaría de Tránsito y Transporte y del Metro de Medellín (de la Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Ltda).

La estimación del consumo de combustibles, a excepción del gas natural, se hizo teniendo en cuenta los pronósticos de crecimiento económico, de la población y del uso de nuevas tecnologías. Los resultados de este análisis constituyen el escenario base sobre el cual se estima el consumo de energía y parte de las emisiones de los contaminantes atmosféricos en el Valle de Aburrá.

La estimación de las emisiones a la atmósfera se hizo a través de factores aplicados en el ámbito internacional (U.S. EPA, 2017), los cuales representan la relación entre la cantidad de un contaminante descargado a la atmósfera y una actividad asociada a éste. En este caso, es el consumo de combustibles en condiciones que pueden considerarse típicas o por lo menos características de la tendencia media de generación de contaminantes atmosféricos por el uso de un combustible (Molina *et al.*, 2003).

Para estimar el suministro de energía aportado por los combustibles se recurrió a su poder calorífico, que es la cantidad que constituye el calor liberado debido a la combustión completa del combustible por unidad de masa o volumen.

2. RESULTADOS

2. 1. Características del Valle de Aburrá

El Valle de Aburrá está conformado por diez municipios: Caldas, Sabaneta, La Estrella, Itagüí, Envigado, Medellín, Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa. Tiene una extensión de 1 129 km² de los cuales el 70% corresponde a zonas rurales y el 30% a zonas urbanas (DANE, 2017). De acuerdo con la proyección por parte del Departamento Administrativo Nacional de Estadística, para 2015 se reportan 3 866 165 habitantes, lo cual corresponde aproximadamente al 58% de la población del departamento de Antioquia (cuadro 1).

CUADRO 1
Distribución de la población en el Valle de Aburrá en 2015

Municipio	Habitantes	Población (%)	Área (km ²)
Barbosa	50 052	1.3	208
Sabaneta	51 860	1.4	15
Girardota	54 240	1.4	78
La Estrella	62 348	1.7	35
Copacabana	70 169	1.9	70
Caldas	77 847	2.1	133
Envigado	222 455	5.9	50
Itagüí	267 851	7.1	17
Bello	455 865	12.1	142
Medellín	2 464 322	65.2	381
Total	3 777 009	100.0	1 129

Fuente: DANE (2017).

Los factores que afectan la calidad del aire en el Valle de Aburrá están definidos. Además de las emisiones diarias que realizan las fuentes fijas y móviles, hay otros factores como la topografía y las condiciones meteorológicas que hacen que periódicamente tengan lugar episodios críticos de calidad del aire (SIATA, 2021). La configuración del valle ubicado en un entorno montañoso constituye una condición geográfica adversa para la circulación horizontal de las masas de aire, lo que sumado a condiciones de ventilación escasa (meteorología adversa) favorece la acumulación de contaminantes y dificulta su remoción (AMVA, 2021). En el Valle de Aburrá se evidencia un comportamiento típico anual de los niveles de contaminación del aire que es determinado por la meteorología. La transición entre la temporada seca y la primera temporada de lluvias acontece entre febrero y marzo y se caracteriza por la presencia de capas de nubes de baja altura que ocasionan la acumulación de contaminantes en la atmósfera. Durante este fenómeno, se registran las concentraciones más altas de PM del año (PM10 y PM2.5). Del mismo modo, sucede la segunda transición de temporada de lluvia a temporada seca entre octubre y noviembre, época en la que se registra de nuevo un incremento de las concentraciones de PM (AMVA, 2021). Algunas características de la temporada de transición que pueden ocasionar episodios críticos de calidad del aire son nubes de baja altura, aumento de la humedad relativa en la troposfera y la baja incidencia de la radiación solar en la superficie de la tierra (SIATA, 2021).

Las condiciones meteorológicas desfavorables para la dispersión de PM, sumadas a la continua emisión de contaminantes por parte de fuentes fijas y móviles, dan como resultado un aumento significativo en las concentraciones de PM2.5 y PM10 y, como consecuencia, un Índice de Calidad del Aire (ICA) dañino a la salud en todas las estaciones de representatividad poblacional que están instaladas a lo largo del Valle de Aburrá (SIATA, 2021).

De acuerdo con los datos proporcionados por la Secretaría de Tránsito y Transporte de los diferentes municipios del Valle de Aburrá, en 2015 el parque automotor estaba conformado por 1 204 273 vehículos, de los cuales la mayoría son motocicletas y automóviles (cuadro 2) (AMVA-UPB, 2017).

En 2015 el Valle de Aburrá contaba con 432 empresas que emitían contaminantes a la atmósfera y que tenían 1 448 fuentes de emisión (cuadro 3). Se observa que en Medellín e Itagüí se encontraban el 72% de las empresas y el 60% de las fuentes de emisión. Las demás empresas y fuentes se distribuyen en los ocho municipios restantes, donde se destaca que las seis empresas que se encontraban ubicadas en Girardota contaban con 143 fuentes de emisión (AMVA-UPB, 2017).

CUADRO 2
Vehículos registrados en el Valle de Aburrá para 2015

Categoría vehicular	Total	Porcentaje (%)
Automóviles	481 219	40.0
Taxis	45 968	3.8
Buses	19 244	1.6
Camiones	27 101	2.3
Motocicletas dos tiempos	19 765	1.6
Motocicletas cuatro tiempos	599 541	49.8
Metroplús	394	0.0
Tractocamiones	7 105	0.6
Volquetas	3 936	0.3
Total	1 204 273	100.0

Fuente: AMVA-UPB (2017).

CUADRO 3
Empresas y fuentes fijas de emisión por municipio para 2015

Municipio	Empresas	Fuentes
Barbosa	3	17
Sabaneta	33	150
Girardota	6	143
La Estrella	30	109
Copacabana	18	46
Caldas	6	32
Envigado	7	11
Itagüí	122	349
Bello	19	67
Medellín	188	524
Total	432	1 448

Fuente: AMVA-UPB (2017).

2. 2. Canasta energética del Valle de Aburrá

2. 2. 1. Energía eléctrica

El consumo de energía eléctrica en el Valle de Aburrá para 2015 fue de 17 790.3 TJ. El 43% de la energía eléctrica se usó en el sector residencial y el 23.2% en el sector industrial. Medellín, debido a su extensión y población, utilizó el 61.8% del total de la energía eléctrica consumida en el Valle de Aburrá en 2015 (cuadro 4).

Aunque la energía eléctrica puede considerarse, en general, como una forma limpia de energía, pues no emite contaminantes a la atmósfera al momento de su consumo, es necesario señalar que su producción implica grandes impactos ambientales, muchos de ellos altamente negativos en las zonas donde se localizan los embalses. De esta forma, puede decirse que en lo que respecta a esta elemental fuente de energía, el Valle de Aburrá desplaza por fuera de los límites del sistema los efectos negativos de su requerimiento energético (Molina *et al.*, 2003).

CUADRO 4
Consumo de energía eléctrica en el Valle de Aburrá para 2015

Municipio	Consumo de energía eléctrica (TJ/año)				Total	Porcentaje (%)
	Residencial	Industrial	Comercial y otros	Transporte		
Barbosa	86.9	186.1	43.3	0.0	316.3	1.8
Sabaneta	160.4	293.4	124.2	0.0	578.0	3.2
Girardota	92.7	352.0	32.3	0.0	477.0	2.7
La Estrella	114.1	310.4	67.3	0.0	491.8	2.8
Copacabana	157.1	144.6	66.9	0.0	368.6	2.1
Caldas	143.6	94.2	53.8	0.0	291.5	1.6
Envigado	557.8	292.1	391.1	12.5	1 253.5	7.0
Itagüí	497.8	613.9	378.2	6.2	1 496.1	8.4
Bello	815.0	253.2	434.2	18.7	1 521.2	8.6
Medellín	5 019.6	1 578.9	4 161.0	236.9	10 996.3	61.8
Total	7 645.0	4 118.7	5 752.3	274.3	17 790.3	100.0
Porcentaje (%)	43.0	23.2	32.3	1.5	100.0	

Fuente: SUISPD (2017); Metro de Medellín (2017).

Nota: en “otros” se incluye el sector oficial, el alumbrado público y el consumo de empresas públicas de Medellín. El consumo de energía en el sector transporte se estimó con base en lo reportado por Metro de Medellín (2017).

2. 2. 2. Combustibles

A diferencia de la gasolina que se consume casi en exclusivo en el sector transporte, el diésel responde a las demandas energéticas tanto del sector industrial como del sector transporte. Aproximadamente, el sector industrial consume el 31.9% del diésel y el sector transporte el 68.2%. El uso del petróleo crudo y el carbón tiene en exclusivo un uso industrial, mientras que el gas natural se consume en todos los sectores.

El cuadro 5 muestra el consumo de gas natural en el Valle de Aburrá para 2015. El 56.7% del gas natural se usó en el sector residencial y el 26.1% en el sector industrial. Medellín es el municipio que más consumió gas natural (58.4%). El consumo de gas natural vehicular (GNV) para el sistema Metroplús durante 2015 fue de 3 698 953.24 m³, de los cuales el 64% fue consumido por los autobuses padrones y 36% restante por los autobuses articulados. En el sector comercial y otros del cuadro 5 se incluye el consumo de gas natural de los buses de Metroplús.

CUADRO 5
Consumo de gas natural en el Valle de Aburrá para 2015

Municipio	Consumo de gas natural (miles de m ³ /año)			Total	Porcentaje (%)
	Residencial	Industrial	Comercial y otros		
Barbosa	618.4	436.7	257.4	1 312.5	0.6
Sabaneta	2 708.4	3 672.5	968.1	7 349	3.4
Girardota	1 169.2	3 187.1	285.7	4 642	2.2
La Estrella	1 703.3	4 167.4	1 090.9	6 961.6	3.2
Copacabana	2 122.4	3 280.0	504.6	5 907.0	2.7
Caldas	2 123.9	555.1	662.7	3 341.7	1.5
Envigado	10 043.6	2 007.6	1 951.4	14 002.6	6.5
Itagüí	8 561.8	14 746.3	2 995.9	26 304.0	12.2
Bello	13 368.5	4 339.6	2 101.8	19 809.9	9.2
Medellín	79 795.3	19 978.1	26 211.0	125 984.4	58.4
Total	122 214.7	56 370.3	37 029.5	215 614.6	100.0
Porcentaje (%)	56.7	26.1	17.2	100.0	

Fuente: SUISPD (2017).

El cuadro 6 exhibe la cantidad de combustibles que entraron al Valle de Aburrá para 2015. Los datos de la gasolina, el diésel y GNV se sacaron del inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá (actualización 2015) y los de gas natural y gas licuado de petróleo (GLP) del SUISPD. El resto de los energéticos se obtuvo por medio de proyecciones del consumo de estos combustibles en años anteriores.

CUADRO 6
Consumo de combustibles en el Valle de Aburrá para 2015

Combustible	Unidad de medida	Consumo
Gasolina	Miles de galones	180 678.7
Diésel	Miles de galones	168 073.0
Carbón	Toneladas	455 848.3
Petróleo crudo	Miles de galones	384 535.23
GLP	Miles de galones	6 265.9
Gas natural	Miles de m ³	215 614.6
<i>Kerosene</i>	Miles de galones	23 753.6
Fueloil	Miles de galones	9 741.8
Madera	Toneladas	13 256.2

Fuente: SUISPD (2017); AMVA-UPB (2017); estimaciones propias.

El cuadro 7 exhibe la energía aportada por el consumo del gas natural, mientras que el cuadro 8 la canasta energética en el Valle de Aburrá para 2015. Para estimar el suministro de energía aportado por los combustibles se empleó su poder calorífico, los cuales fueron obtenidos de Çengel y Boles (2012), Smith *et al.* (1996) y Sonntag y Borgnakke (2003). Las necesidades energéticas del Valle de Aburrá se han venido elevando porque hoy se requiere más energía que antes para el transporte de personas y de mercancías, para la producción de bienes y servicios y para una mejor calidad de vida de la población. Es decir, depende del aumento de la población y del crecimiento de las actividades económicas.

CUADRO 7
Energía aportada por el consumo del gas natural en el Valle de Aburrá para 2015

Municipio	Consumo de energía a través del gas natural (TJ/año)			Total	Porcentaje (%)
	Residencial	Industrial	Comercial y otros		
Barbosa	19.0	13.5	7.9	40.4	0.6
Sabaneta	83.4	113.1	29.8	226.3	3.4
Girardota	36.0	98.2	8.8	143.0	2.2
La Estrella	52.5	128.4	33.6	214.4	3.2
Copacabana	65.4	101.0	15.5	181.9	2.7
Caldas	65.4	17.1	20.4	102.9	1.5
Envigado	309.3	61.8	60.1	431.3	6.5
Itagüí	263.7	454.2	92.3	810.2	12.2
Bello	411.8	133.7	64.7	610.1	9.2
Medellín	2 457.7	615.3	807.3	3 880.3	58.4
Total	3 764.2	1 736.2	1 140.5	6 640.9	100.0
Porcentaje (%)	56.7	26.1	17.2	100.0	

Fuente: SUISPD (2017).

Nota: en “otros” se incluye el sector oficial y especial.

CUADRO 8
Entradas de energía en el Valle de Aburrá para 2015

Fuente de energía	Energía (TJ/año)	Porcentaje (%)
Energía eléctrica	17 790.3	18.6
Gasolina	21 957	22.9
Diésel	27 072.6	28.2
Carbón	12 396.4	12.9
Petróleo crudo	1 446.2	1.5
GLP	591.5	0.6
Gas natural	9 486.9	9.9
<i>Kerosene</i>	3 358.5	3.5
Fueloil	1 541.7	1.6
Madera	222	0.2
Total	95 863.1	100

Fuente: elaboración propia.

Nota: el gas natural incluye el GNV.

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá demuestra una clara dependencia de los combustibles. El consumo por tipo de fuente indica que el petróleo sigue siendo la mayor fuente de energía que aporta a la canasta energética del Valle de Aburrá a través de sus derivados (diésel y gasolina), seguido de la electricidad y el carbón. Los combustibles aportaron el 81.4% de la energía consumida en el Valle de Aburrá y la energía eléctrica tan sólo el 18.6%. La gasolina aporta el 22.9% y el diésel el 28.2%.

Los cuadros 9, 10, 11 y 12 dan a conocer la distribución en el uso de la energía para los sectores residencial, comercial, industrial y transporte en el Valle de Aburrá para 2015, respectivamente. La energía eléctrica continúa siendo la fuente principal de energía en los sectores residencial (63.7%) y comercial (83.5), seguido del gas natural (31.4 y 16.5%). En apariencia el sistema metro no ha tenido un efecto decisivo sobre la canasta energética del Valle de Aburrá.

CUADRO 9
Distribución de la energía en el sector residencial para 2015

Fuente de energía	Energía (TJ/año)	Porcentaje (%)
Energía eléctrica	7 645.0	63.7
Gas natural	3 764.2	31.4
GLP	591.5	4.9
Total	12 000.7	100.0

Fuente: elaboración propia.

CUADRO 10
Distribución de la energía en el sector comercial para 2015

Fuente de energía	Energía (TJ/año)	Porcentaje (%)
Energía eléctrica	5 752.3	83.5
Gas natural	1 140.5	16.5
Total	6 892.8	100.0

Fuente: elaboración propia.

CUADRO 11
Distribución de la energía en el sector industrial para 2015

Fuente de energía	Energía (TJ/año)	Porcentaje (%)
Energía eléctrica	4 118.7	12.3
Diésel	8 622.6	25.8
Carbón	12 396.4	37.1
Petróleo crudo	1 446.2	4.3
Gas natural	1 736.2	5.2
<i>Kerosene</i>	3 358.5	10.0
Fueloil	1 541.7	4.6
Madera	222.0	0.7
Total	33 442.3	100.0

Fuente: elaboración propia.

CUADRO 12
Distribución de la energía en el sector transporte para 2015

Fuente de energía	Energía (TJ/año)	Porcentaje (%)
Energía eléctrica	274.3	0.6
Gasolina	21 957.0	50.4
Diésel	18 450.0	42.4
Gas natural vehicular	2 846.0	6.5
Total	43 527.3	100.0

Fuente: AMVA-UPB (2017).

En el Área Metropolitana del Valle de Aburrá el transporte sigue apoyándose más que nada en el consumo de combustibles derivados del petróleo. El sector transporte depende sobre todo de la gasolina (50.4%) y el diésel (42.4%), mientras que el sector industrial del carbón (37.1%) y el diésel (25.8%).

2. 2. 3. Canasta energética del Valle de Aburrá

El cuadro 13 presenta la distribución en el uso de la energía para los sectores residencial, comercial, industrial y transporte en el Valle de Aburrá. En 2015 se consumieron 95 863.1 TJ en los diferentes sectores, donde los sectores transporte (45.4%) e industrial (34.9) fueron los que más demanda de energía tuvieron.

CUADRO 13
Distribución de la energía por sectores en el Valle de Aburrá para 2015

Sector	Energía (TJ/año)	Porcentaje (%)
Residencial	12 000.7	12.5
Comercial	6 892.8	7.2
Transporte	43 527.3	45.4
Industrial	33 442.3	34.9
Total	95 863.1	100.0

Fuente: elaboración propia.

2. 3. El origen y uso de la energía y su relación con la contaminación del aire

El uso de los combustibles tanto en el sector industrial como en el de transporte es la principal fuente de emisión de contaminantes atmosféricos en el Valle de Aburrá. El aprovechamiento de combustibles derivados del petróleo (gasolina y diésel) provoca diversos contaminantes como monóxido de carbono, PM, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno. El carbón y el petróleo crudo, usados en su mayoría por la industria, generan emisiones de partículas y óxidos de azufre (Molina *et al.*, 2003).

El cuadro 14 precisa la emisión de contaminantes criterio en los sectores residencial y comercial para 2015. La estimación de las emisiones a la atmósfera se hizo a través de factores de emisión de U.S. EPA (2017). La emisión de contaminantes en estos sectores se debió sobre todo al uso de gas natural.

El cuadro 15 muestra la emisión de contaminantes criterio por categoría vehicular en el sector transporte para 2015. Se observa que los camiones son la principal fuente de NOx y PM_{2.5}, pues suministran el 31% y 36% del total de las emisiones de estos contaminantes respectivamente. Se destaca también el aporte que realizan las volquetas a este último contaminante. A su vez, las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) son dominadas por las motocicletas de cuatro tiempos con un 37%, mientras que los automóviles son las principales fuentes de emisión de CO y SOx (contribuyen con el 37% y 59% respectivamente) debido a su número y a que la mayoría recurre a la gasolina como combustible, la cual tiene un porcentaje más elevado de azufre que el diésel (AMVA-UPB, 2017).

CUADRO 14
Emisión de contaminantes criterios en el sector residencial y comercial para 2015

Sector	Emisión (ton/año)					Porcentaje (%)	
	CO	NOx	SOx	COV	PST		
Residencial	44.5	226.8	1.2	17.6	24.7	314.8	79.3
Comercial	11.8	59.2	0.4	4.7	5.9	82.1	20.7
Total	56.4	286.1	1.6	22.4	30.6	397.0	100.0
Porcentaje (%)	14.2	72.1	0.4	5.6	7.7	100.0	

Fuente: elaboración propia.

Nota: COV = compuestos orgánicos volátiles; PST = partículas suspendidas totales.

CUADRO 15
Emisión de contaminantes criterio por categoría vehicular en el sector transporte para 2015

Categoría	Emisión (ton/año)					Porcentaje (%)	
	CO	NOx	SOx	COV	PM _{2.5}		
Autos	61 348.0	3 928.0	189.0	3 247.0	113.0	68 825.0	34.8
Taxis	2 523.0	760.0	41.0	134.0	30.0	3 488.0	1.8
Buses	14 052.0	3 722.0	24.0	1 224.0	149.0	19 171.0	9.7
Camiones	60 658.0	4 688.0	19.0	3 115.0	538.0	69 018.0	34.9
Metroplús	57.0	2.0	0.0	0.0	0.0	59.0	0.0
Tractocamiones	373.0	413.0	1.0	73.0	23.0	883.0	0.4
Volquetas	1 288.0	1 034.0	3.0	254.0	394.0	2 973.0	1.5
Motocicletas dos tiempos	1 782.0	2.0	1.0	772.0	17.0	2 574	1.3
Motocicletas cuatro tiempos	24 857.0	468.0	44.0	5 092.0	233.0	30 694.0	15.5
Total	166 938.0	15 017.0	322.0	13 911.0	1 497.0	197 685.0	100.0
Porcentaje (%)	84.4	7.6	0.2	7.0	0.8	100.0	

Fuente: AMVA-UPB (2017).

Nota: COV = compuestos orgánicos volátiles.

Destaca también la contribución de los automóviles y buses a la emisiones de NOx, así como de las emisiones de SOx provenientes de las motocicletas de cuatro tiempos y taxis. Asimismo, se resalta la participación de los automóviles y los camiones en las emisiones de COV (AMVA-UPB, 2017).

Los camiones, siendo una de las categorías con menor cantidad de vehículos, son la principal fuente de emisión de contaminantes, en especial de PM2.5 (538 ton/año). Esto se debe en especial a la edad del parque automotor, puesto que existen vehículos con más años de antigüedad que el promedio de las demás categorías (AMVA-UPB, 2017).

Las emisiones por tipo de combustible se encuentran en el cuadro 16. Se observa que la gasolina es la principal fuente responsable de las emisiones de CO, SOx y COV, con un 65%, 87% y 82% respectivamente. El diésel es la principal fuente de NOx y PM2.5 con un 69% y 80% de las emisiones de estos contaminantes. El GNV por su parte hace una contribución clave a las emisiones de CO con un 29% (AMVA-UPB, 2017).

CUADRO 16

Emisión de contaminantes criterio por tipo de combustible en el sector transporte para 2015

Combustible	Emisión (ton/año)						Porcentaje (%)
	CO	NOx	SOx	COV	PM2.5	Total	
Gasolina	108 913.0	4 060.0	279.0	11 452.0	282.0	124 986.0	63.2
Diésel	10 323.0	10 287.0	40.0	2 206.0	1 202.0	24 058.0	12.2
GNV	47 703.0	669.0	3	253.0	12.0	48 640.0	24.6
Total	166 939.0	15 016.0	322.0	13 911.0	1 496.0	197 784.0	100.0
Porcentaje (%)	84.4	7.6	0.2	7.0	0.8	100.0	

Fuente: AMVA-UPB (2017).

Las características particulares de los motores a gasolina y de los motores diésel hacen que los primeros muestren una eficiencia menor respecto a los segundos. Esto redunda en una combustión menos completa y de ahí que las emisiones de CO sean superiores en la gasolina, pues los motores diésel consiguen transformar mejor el carbono del combustible en CO₂. Esto también se debe a que en los motores a gasolina la combustión se realiza por medio de una chispa ocasionada por una bujía, lo cual hace que la eficiencia de la combustión dependa de la sincronización de los tiempos del motor y del octanaje del combustible, la cual, si no es la adecuada, causará una ignición fuera de tiempo, que va en detrimento del objetivo de conseguir una combustión lo más cercana posible a la ideal (AMVA-UPB, 2017).

De igual forma, las mayores emisiones de COV por parte de la gasolina se deben a que está compuesta por elementos más volátiles que el diésel y a que además le son adicionados otros compuestos para mejorar su octanaje y así evitar los problemas ya mencionados. Por otra parte, la gasolina que se consume en el Valle de Aburrá tiene un máximo de 300 ppm de azufre, frente al diésel que cuenta con menos de 50 ppm; esto explica que las emisiones de SOx sean también dominadas por la gasolina (AMVA-UPB, 2017).

Ahora bien, pese a que los motores diésel tienen mayor eficiencia que los motores a gasolina, presentan zonas más ricas en combustible que otras, como consecuencia de que no hay una mezcla previa de éste con el aire. De esta forma, hay zonas con combustible que no alcanzan a quemarse por completo y ello conduce a la formación de PM; asimismo, hay zonas de altas temperaturas en donde el nitrógeno del aire se oxida y se desencadenan elevadas concentraciones de NOx (AMVA-UPB, 2017).

En resumen, el hecho de que el GNV sea responsable del 29% de las emisiones de CO se debe a que muchos de los vehículos que funcionan con este combustible lo hacen también con gasolina; es decir, sus motores no fueron diseñados para trabajar con gas, lo cual conduce también a una combustión incompleta (AMVA-UPB, 2017).

El cuadro 17 especifica la emisión de contaminantes criterio (excepto el O₃) y COV, el cual está distribuido por municipios en el sector industrial para 2015 en el Valle de Aburrá. Se observa que la ciudad de Medellín realiza los mayores aportes de CO y COV, mientras que Itagüí lo hace con los SOx. Es trascendental también el papel de Envigado en las emisiones de NOx y el de Girardota en las de PM.

CUADRO 17
Emisiones de contaminantes criterio en el sector industrial para 2015

Municipio	Emisión (ton/año)					Porcentaje (%)	
	CO	NOx	SOx	COV	PST		
Barbosa	130.2	119.2	141.6	6.8	149.7	547.5	4.1
Sabaneta	93.3	161.6	77.9	202.9	133.9	669.6	5.0
Girardota	852.7	373.1	625.5	23.6	1 064.5	2 939.4	21.9
La Estrella	90.5	119.1	62.3	5.3	71.9	349.1	2.6
Copacabana	414.9	57.4	111.3	240.9	73.7	898.2	6.7
Caldas	17.9	20.8	5.6	1.1	23.2	68.6	0.5
Envigado	309.9	662.4	127.1	17.1	61.6	1 178.1	8.8
Itagüí	360.1	655.2	1 010.8	360.6	397.4	2 784.1	20.7
Bello	65.0	510.7	755.4	6.5	44.5	1 382.1	10.3
Medellín	898.5	312.9	172.2	903.5	333.9	2 621.0	19.5
Total	3 233	2 992.4	3 089.7	1 768.3	2 354.3	13 437.7	100.0
Porcentaje (%)	24.1	22.3	23.0	13.2	17.5	100.0	

Fuente: AMVA-UPB (2017).

Nota: para Colombia los contaminantes criterio están definidos en la Resolución 2254 del 1 de noviembre de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Estos incluyen al ozono (O₃), pero por tratarse de un contaminante secundario no se incluyó en este cuadro. Por otro lado, los contaminantes criterio no integran a los compuestos orgánicos volátiles, pero por tratarse de un contaminante primario sí se incluyó en este cuadro. COV = compuestos orgánicos volátiles; PST = partículas suspendidas totales.

El cuadro 18 y la gráfica 1 muestran la emisión distribuida por sectores de contaminantes criterio en el Valle de Aburrá para 2015. El sector transporte aparece como el principal responsable de la emisión de contaminantes criterio en el Valle de Aburrá con un 93.5%, cantidad muy superior a la del sector industrial. La participación del sector transporte en la contaminación atmosférica indica en la actualidad una tendencia al aumento debido al alto crecimiento del parque automotor en los últimos años.

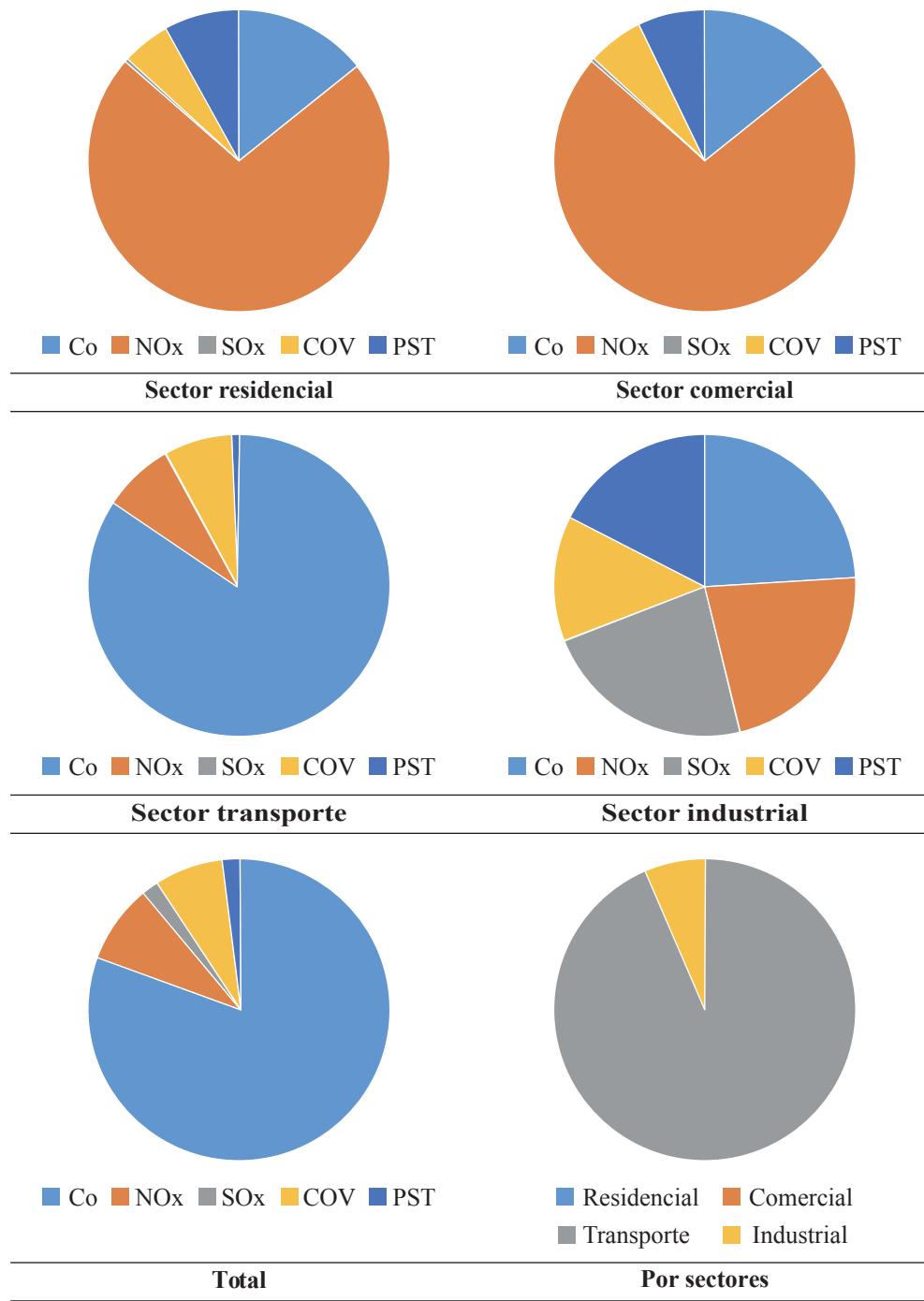
Para analizar el problema de la contaminación atmosférica en el Valle de Aburrá (Antioquia, Colombia) y definir prioridades y estrategias de control se debe emplear un enfoque integrador que permita identificar y clasificar a los actores participantes. Nuestro actual modo de vida se basa en un modelo energético centrado en el consumo de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón) y en el uso irracional de la energía. Esto tiene como consecuencia la emisión a la atmósfera de importantes cantidades de contaminantes, lo que se manifiesta como contaminación atmosférica en las principales ciudades. El modelo de generación, transporte y consumo actual de energía, que es dependiente en absoluto de los combustibles fósiles, es insostenible. Por lo tanto, una de las formas de actuar para limitar e impedir las graves consecuencias ambientales, sociales y económicas consiste en reducir el consumo de energía o sustituir los combustibles “sucios” que tienen una mayor participación, tales como la gasolina, el diésel y el carbón, los cuales podrían ceder una parte considerable de su aporte a fuentes de energía más “limpias”, como la energía eléctrica, eólica y solar.

CUADRO 18
Emisión de contaminantes criterio distribuido por sectores en el Valle de Aburrá para 2015

Sector	Emisión (ton/año)					Porcentaje (%)	
	CO	NOx	SOx	COV	PST		
Residencial	44.5	226.8	1.2	17.6	24.7	314.8	0.1
Comercial	11.8	59.2	0.4	4.7	5.9	82.1	0.0
Transporte	166 938.0	15 017.0	322.0	13 911.0	1 497.0	197 685.0	93.5
Industrial	3 233.0	2 992.4	3 089.7	1 768.3	2 354.3	13 437.7	6.4
Total	170 227.4	18 295.5	3 413.3	15 701.7	3 881.9	211 519.7	100.0
Porcentaje (%)	80.5	8.6	1.6	7.4	1.8	100.0	

Fuente: elaboración propia.

Nota: COV = compuestos orgánicos volátiles; PST = partículas suspendidas volátiles.



GRÁFICA 1

Emisión de contaminantes criterio distribuido por sectores en el Valle de Aburrá para 2015

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

El ecosistema urbano depende en su totalidad del mundo exterior para todos sus aprovisionamientos: alimentos, energía, materiales, etc. Depende también del exterior para exportar una parte de sus productos y más que nada para evacuar sus desechos. En los aspectos relativos a la energía, el carácter dependiente del ecosistema urbano se asienta con una agudeza particular en el hecho de que su funcionamiento se basa en esencia en la utilización

de combustibles. En el caso del Valle de Aburrá se comprueba que el suministro actual en energía se apoya en un 81.4% en los recursos no renovables (combustibles fósiles).

El Valle de Aburrá consume la mayor parte de la energía que necesita en el sector transporte (45.4%), seguido por el sector industrial (34.9%), el sector residencial (12.5%) y el sector comercial (7.2%). Esta distribución pone de manifiesto una característica del sistema, el cual consume la mayor parte de su energía en la movilización (transporte) y no en la producción. Esta característica contrasta con el comportamiento general de las metrópolis en donde el consumo mayoritario de energía se lleva a cabo en el sector primario de la economía (industria). Lo anterior revela, por un lado, la ineficiencia del sistema local de transporte, a excepción del sistema metro y del Metroplús que tienen un papel crucial en la movilidad del Valle de Aburrá y, por el otro, el tamaño hasta cierto punto pequeño del sector industrial local.

El Valle de Aburrá depende fundamentalmente de combustibles fósiles para su funcionamiento. La fuente de energía con mayor participación es el diésel con un 28.2% de la energía total consumida, le sigue la gasolina con un 22.9%, la energía eléctrica con un 18.6% y el carbón con el 12.9%. En consecuencia, las estrategias para prevenir y controlar la contaminación atmosférica deberían orientarse a la sustitución de los combustibles “sucios” que tienen una mayor participación, tales como la gasolina, el diésel y el carbón, los cuales podrían ceder una parte considerable de su aporte a fuentes de energía más “limpias”, como la energía eléctrica, eólica y solar.

En el Valle de Aburrá el sector transporte es el principal responsable de la emisión de contaminantes atmosféricos; sin embargo, se ha priorizado en el control de las fuentes industriales. Se requiere, por lo tanto, de una política agresiva de control a las emisiones provocadas por el parque automotor.

El modelo de generación, transporte y consumo actual de energía, que depende en absoluto de los combustibles fósiles, es insostenible. El sector transporte aparece como el principal responsable de la emisión de contaminantes a la atmósfera en el Valle de Aburrá con un 93.5% (197 685.0 ton/año), cantidad muy superior a la del sector industrial (13 437.7 ton/año, equivalente al 6.4%). Ante este panorama, se ve la necesidad de fortalecer el sistema de transporte público, desestimulando el uso de los vehículos particulares, que son más ineficientes en el uso de la energía y responsables del 34.8% de las emisiones de contaminantes atmosféricos dentro del sector transporte.

Al ejercer control y vigilancia sobre las fuentes que se valen del carbón en el sector textil, se haría gestión sobre un significativo porcentaje de las emisiones de contaminantes criterio provenientes de las fuentes fijas.

Aunque para 2015 el sistema metro llevaba 20 años de operación, su funcionamiento sólo representó el 0.6% del total de la energía consumida en el sector transporte, lo cual implica que la participación de este medio de transporte no ha sido suficiente como para introducir un cambio significativo en el comportamiento de la canasta energética para este sector.

No obstante, es crucial considerar el impacto del sistema metro de cara al crecimiento del parque automotor y, por lo tanto, al consumo de combustibles fósiles; es decir, la existencia del metro debe haber desestimulado en algo el crecimiento del parque automotor y de las emisiones atmosféricas debido al volumen considerable de personas transportadas con una fuente limpia y un uso más eficiente de la energía.

Agradecimientos

A la Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Ltda y a los árbitros que contribuyeron a mejorar el artículo.

Referencias

AMVA (Área Metropolitana Valle de Aburrá). (2021). *Condiciones especiales del Valle de Aburá. Factores que incrementan la contaminación en el valle*. Disponible en <https://www.metropol.gov.co/ambientales/calidad-del-aire/generalidades/condiciones-especiales>

- AMVA (Área Metropolitana Valle de Aburrá)-UPB (Universidad Pontificia Bolivariana). (2017). *Actualización de inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá, actualización 2015*. Medellín: Área Metropolitana Valle de Aburrá. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Cengel, Y. A. y Boles, M. A. (2012). *Termodinámica* (séptima edición). México: McGraw Hill.
- Deleage, J. P. y Souchon, C. (1991). *La energía: tema interdisciplinar para la educación ambiental*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
- DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). (2017). *DANE. Información para todos*. Disponible en <https://www.dane.gov.co/>
- Metro de Medellín. (2017). *Metro de Medellín. Calidad de vida*. Medellín. Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Ltda. Disponible en <https://www.metrodemedellin.gov.co/>
- Molina, F., Saavedra, M. y Obregón, M. (2003). Balance energético y estimación de contaminantes atmosféricos emitidos en el Valle de Aburrá, 1999: una aproximación inicial. *Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia*, 29, 45-57.
- SIATA (Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá). (2021). Disponible en https://siata.gov.co/sitio_web/index.php/noticia9
- SUISPD (Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios). (2017). Disponible en <https://sui.superservicios.gov.co/>
- Smith, J. M., Van Ness, H. C. y Abbott, M. M. (1996). *Introducción a la termodinámica en ingeniería química* (quinta edición). México: Mc Graw Hill.
- Sonntag, R. E., & Borgnakke, C. (2003). *Fundamentals of thermodynamics* (sixth edition). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). (2017). *Air missions factor and quantification*. Retrieved from <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification>

CC BY-NC-ND