

Movilidad motorizada, impacto ambiental, alternativas y perspectivas futuras: consideraciones para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Motorized mobility, environmental impact, alternatives and future prospects: considerations for the Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Juan D. Martínez-Ángel

Recibido 19 abril 2016 / Enviado para modificación 12 octubre 2017 / Aceptado 5 diciembre 2017

RESUMEN

JM: Ing. Mecánico. M. Sc. Ingeniería Mecánica. Ph. D. Energías Renovables y Eficiencia Energética. Escuela de Ingenierías, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia. juand.martinez@upb.edu.co

La movilidad motorizada está íntimamente ligada a los combustibles líquidos como la gasolina y el diésel; y en consecuencia, con el medio ambiente. Además de la problemática con el calentamiento global, la utilización de estos combustibles genera compuestos de carácter contaminante que afecta la salud de la población. Entre todos los contaminantes criterio, el material particulado (PM) de tamaño menor o igual a 2,5 micras ($PM_{2.5}$) es considerado como uno de los compuestos de mayor peligrosidad debido a que puede penetrar hasta la región de intercambio de gases del pulmón. Los registros para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) muestran eventualmente que los niveles promedio de calidad del aire resultan ser nocivos para la salud del habitante metropolitano. Lo anterior se debe principalmente a las altas concentraciones de $PM_{2.5}$ generadas por vehículos pesados que usan combustible diésel. Si bien las propiedades de este combustible tienen un efecto directo en el PM respirable, existen otras estrategias que influyen en las características y la cantidad de las emisiones generadas. Por ejemplo, la mejora del nivel tecnológico de los motores a partir de planes de chatarrización y renovación, y de la pauta de conducción, así como la incorporación de vehículos eléctricos. Con todo lo anterior, este trabajo muestra una serie de consideraciones a fin de plantear posibles estrategias de solución a la problemática ambiental de la ciudad y el país.

Palabras Clave: Calidad del aire; contaminantes atmosféricos; combustibles fósiles (*fuentes: DeCS, BIREME*).

ABSTRACT

Motorized mobility is closely linked to liquid fuels such as gasoline and diésel and therefore, to the environment. Besides the problems associated with global warming, the use of these fuels also generates polluting compounds affecting the population health. Among all primary pollutants, particulate matter (PM) less than or equal to 2.5microns ($PM_{2.5}$) in size, is regarded as one of the most dangerous compounds because it can penetrate the region lung gas exchange. The records for the Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) often show that the average levels of air quality were found to be harmful to the health of metropolitan habitants. This is mainly attributed to the high concentrations of $PM_{2.5}$ generated by heavy-duty vehicles that use diésel fuel. Although the properties of diesel fuel have a direct effect on breathable PM, there are other strategies influencing both nature and amount of emissions. For example, the improvement of the technological level of the engines and the driving pattern, as well as the incorporation of electric vehicles. This paper shows some considerations in order to propose possible strategies to solve the environmental problem of the city and the country.

Key Words: Air quality; air pollutants; fossil fuels (*source: MeSH, NLM*).

La masiva utilización de combustibles fósiles ha llevado a un incremento considerable de gases efecto invernadero (GEI), principalmente el CO_2 , en la atmósfera de nuestro planeta. La acumulación de estos gases ha hecho del cambio climático una realidad. Este fenómeno no solo implica un aumento de la temperatura del planeta y del nivel del mar, sino también un incremento importante en la intensidad y la frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos. Asimismo, ha desencadenado cambios en los patrones de comportamiento de los animales, entre ellos los polinizadores, acentuando con ello el hambre, la pobreza, la desigualdad y la violencia.

Igualmente, la combustión de cualquier recurso genera una cantidad de compuestos de carácter contaminante que igualmente altera de manera negativa el estado natural del medio ambiente, con efectos adversos a los seres vivos. Si bien estos compuestos consideran una proporción bastante pequeña en comparación con los productos típicos de la combustión (CO_2 , H_2O , O_2 y N_2), se relacionan de manera directa con fenómenos ambientales como la niebla tóxica (smog) y la lluvia ácida, y con la calidad del aire.

Entre las emisiones atmosféricas contaminantes de carácter primario, se incluyen los hidrocarburos no quemados (HC), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NOx), el dióxido de azufre (SO_2), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y el material particulado (PM), entre otros. Este último, puede ser clasificado como PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ cuando el tamaño de la partícula es menor o igual a 10 y 2.5 micras respectivamente. En términos generales, este compuesto consiste en una mezcla compleja de partículas líquidas y/o sólidas suspendidas en el aire que puede considerar además de la presencia de elementos inorgánicos, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), dioxinas y furanos, y compuestos de naturaleza azufrada y carbonosa como el hollín.

La presencia de estos compuestos en el aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud de la población. El incremento de la frecuencia y severidad de enfermedades respiratorias y cardiovasculares se ha relacionado de manera directa con los efectos asociados con una mala calidad del aire. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), en el 2012 la presencia de contaminantes en el aire provocó 3 M de defunciones prematuras (1). Esta mortalidad se atribuye entre otros, a la exposición de PM, el cual está estrechamente relacionado con la creciente incidencia de cardiopatías, neumopatías y cáncer (especialmente de pulmón) (1). El riesgo de contraer estas enfermedades aumenta a medida que las partículas se encuentran en menores tamaños, ya que estas son más propicias en alcanzar e interactuar con órganos clave del sistema tanto respiratorio como cardiovascular. Por esta

razón el $\text{PM}_{2.5}$ es considerado entre todo el PM, el compuesto con mayor peligrosidad. Asimismo, existen las partículas ultrafinas menores de 100 nm que aunque presentan poca contribución en masa, son más abundantes en términos de número, y ofrecen una alta área superficial con mayor potencial de penetración pulmonar (2).

La exposición de estos contaminantes, específicamente el PM, ha mostrado influir en la esperanza de vida y morbilidad crónica de las personas (3,4,5). Si bien no se conoce el umbral de PM por debajo del cual no existan efectos nocivos, la OMS recomienda concentraciones medias diarias de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} de 25 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente (1). En el 2013, la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), mostró que hay suficiente evidencia para declarar que la contaminación atmosférica es carcinógena (6). Esta misma organización declaró en el 2012 que los gases de escape generados en motores diésel son igualmente carcinógenos, habiendo sido considerados desde 1988 como cancerígenos (7).

En términos generales, es posible afirmar que el parque automotor colombiano y en específico aquellos que hacen parte del sistema de transporte masivo nacional, se encuentra más bien rezagado dada la antigüedad tecnológica de los motores. Lo anterior repercute de manera directa y negativa en los indicadores de la calidad de aire (ICA) de las principales ciudades del país. La contaminación del aire es una de las principales causas de mortalidad infantil en Colombia y según reportes del Banco Mundial, tiene mayores costos que la falta de acceso al agua potable y a los sistemas de saneamiento (8). De hecho, la Resolución No. 1111 de 2013 revela que los costos anuales ocasionados en el país por la contaminación del aire urbano por PM_{10} asciende a 5,7 billones de \$COL, lo que representó el 1,1% del producto interno bruto (PIB) del 2009.

Particularmente, los registros arrojados por la red de monitoreo de calidad del aire en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), donde habitan cerca de 3 M de personas, evidencian una seria problemática asociada al $\text{PM}_{2.5}$ que se relaciona principalmente con los vehículos de transporte de carga y de pasajeros. El $\text{PM}_{2.5}$ viene presentando valores superiores a lo indicado por la norma colombiana (resolución 610 del 24 de marzo de 2010), la cual establece una concentración diaria de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, es decir dos veces más que el valor indicado por la OMS. Consecuentemente, las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ para el AMVA superan las referencias establecidas por la OMS y exponen a la población tanto a efectos agudos como crónicos.

Con base en todo lo anterior, este trabajo recoge algunas consideraciones sobre las emisiones contaminantes derivadas del uso de vehículos de combustión interna y algunas perspectivas asociadas a la movilidad eléctrica.

Asimismo, plantea algunas directrices para hacer frente a la problemática ambiental de la ciudad y el país.

Contaminantes criterio en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Hasta la fecha, el cálculo del inventario de contaminantes criterio (CO, NO_x, SO₂, COV y PM_{2,5}, también llamados contaminantes primarios o regulados) de las emisiones generadas por fuentes móviles en el AMVA ha sido estimado por medio del modelo LEAP (*Long-range Energy Alternatives Planning System*) que considera a su vez los factores de emisión del modelo IVE (*International Vehicle Emissions*). De esta manera, las fuentes móviles presentes en el AMVA son el sector con mayor aporte de NO_x y PM_{2,5}, atribuidas a los vehículos pesados (buses y camiones) que utilizan combustible diésel. Aun así, es necesario el desarrollo de estrategias para la validación de los inventarios de emisiones estimados con base en mediciones en campo. En este sentido, es importante el levantamiento de un ciclo de conducción homologado para las condiciones del valle de Aburrá, como herramienta para la estimación de factores de emisión vehiculares y consumos de combustible reales para las condiciones de Medellín.

Actualmente, los requisitos de calidad del combustible diésel están establecidos por la Resolución No. 40619 de 2017. Entre otros parámetros, esta normativa se establece una concentración máxima de azufre de 50 ppm. Para el caso de la gasolina, continua la Resolución 1180 del 2006 en la que se establece un contenido máximo de azufre de 300 ppm. La reducción en la concentración de azufre en el diésel, respecto a las 2 100 ppm que presentaba este combustible en el 2010, permitió disminuir el MP liberado a la atmosfera. Lo anterior se vio reflejado en una disminución de 3 µg/m³ de la masa fina de partículas en el aire respirable, respecto a un combustible diésel de 2 100 ppm de azufre (9).

Movilidad por medio de motores de combustión interna

Los límites de emisiones establecidos a los fabricantes de motores son cada vez más restringidos gracias a la coherencia con la necesidad de proteger el medio ambiente y la salud de las personas. Por ejemplo, desde el 1 de septiembre del 2015, todos los autos nuevos que se venden en Europa deben cumplir con la norma Euro 6. Para el caso de los motores diésel, esta normativa establece mayores reducciones para el NO_x, pasando de 180 mg/km establecidos en la Euro 5, a 80 mg/km. Para el caso del PM, las restricciones fueron del 10% respecto a lo establecido en la norma anterior, pasando de 5 a 4,5 mg/km (10).

Aun así, la venta de vehículos a nivel mundial es cada vez mayor haciendo que el balance total entre las emisio-

nes contaminantes impuestas por la normatividad y la cantidad de vehículos que cada día circulan, muestre un panorama más bien desolador en lo que refiere a la calidad del aire. De acuerdo con la organización internacional de constructores de automóviles Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles (OICA) el 2012 fue el primer año en la historia donde el número de vehículos producidos superó los 60 M de unidades (11). De esta manera, el nivel de contaminación ahorrado por las restricciones impuestas a los vehículos nuevos se pierde por causa del número cada vez creciente de vehículos vendidos.

Para el caso colombiano, es difícil establecer la distribución del parque automotor en lo que respecta al nivel tecnológico de los vehículos. Con base en la normativa europea, que ya está en su sexta generación, en Colombia se pueden comercializar vehículos nuevos con tecnología igual o superior a la cuarta generación, según lo dispuesto en la Resolución No.1111 del 2013; una tecnología que data del año 2005. Con base a lo anterior, no resulta descabellado afirmar que el parque automotor colombiano, en particular los vehículos pesados que utilizan diésel, presenta un rezago importante en el grado tecnológico de sus motores; lo que explica a su vez, los altos niveles de emisiones contaminantes.

Además de una mejora en la calidad de los combustibles, otra estrategia de reducción de los niveles de emisiones contaminantes producidos por las fuentes móviles es la pauta de conducción, la cual afecta de manera directa el consumo específico de combustible y las emisiones (12). Aceleraciones y detenciones bruscas y repentinas, y cambios instantáneos en la caja de cambios del motor para responder a rápidas demandas de tracción o velocidad, influyen significativamente en el comportamiento del motor y en las concentraciones de los productos de la combustión. Por ejemplo, las emisiones promedio de HC y CO₂ encontradas en un motor a gasolina usando una mezcla de 85% etanol y 15% gasolina, durante una etapa de aceleración, son cinco veces mayores que las obtenidas durante la etapa de ralentí (reposo). Para el caso del NO_x y el CO, el incremento de estas emisiones pueden llegar a ser 10 veces mayor (13). Igualmente, las emisiones de PM tanto en vehículos alimentados por gasolina y combustible diésel, tienden a aumentar considerablemente con las aceleraciones (14).

En este sentido, en los últimos años ha habido diferentes programas en todo el mundo para incentivar la conducción ecológica. Estas campañas tienen como objetivo informar y educar a los conductores de la manera y las consecuencias de una conducción eficiente respecto al consumo de combustible y por lo tanto, con el medio ambiente (15). Así, el simple hecho de conducir a

partir de velocidades bajas y constantes, y el mantener distancias respetuosas entre los otros vehículos (con el objetivo de alcanzar una apropiada reacción frente a las paradas) reduce considerablemente no sólo las emisiones contaminantes, sino también la probabilidad de accidentes de tráfico, la contaminación acústica y el desgaste de los componentes del vehículo (15). Adicionalmente, existe un ahorro más que considerable de combustible que en todos los casos beneficia la economía del conductor. Todo lo anterior cobra mucha más importancia cuando en nuestro país la obtención de la licencia de conducción no implica una evaluación teórica ni práctica de los mínimos conceptos de funcionamiento del motor y de los códigos y normas de tránsito.

Movilidad eléctrica

La electrificación de los vehículos, especialmente del sector transporte, puede responder a los desafíos impuestos por la congestión vehicular y la mejora de la calidad del aire. Los motores eléctricos presentan una mayor eficiencia energética (85-95%) en comparación a la ofrecida por los motores de combustión interna (28-30%) (16). Lo anterior cobra mayor importancia dada la huella de carbono asociada a la generación eléctrica en el país (entre 100 y 300 gCO₂/kWh) por causa de la alta participación del sector hidroeléctrico en el sistema interconectado nacional (aproximadamente 65%).

Los vehículos eléctricos pueden ser clasificados a partir del medio de transmisión de la potencia: desde los activados por catenaria o riel eléctrico, principalmente para los vehículos de transporte masivo de pasajeros, hasta los que funcionan por medio de un sistema de almacenamiento de energía entre los que se destacan las baterías eléctricas, los ultracapacitores y el hidrógeno, este último aprovechado mediante celdas de combustible. En la actualidad, las baterías más comunes y con mayor participación en el mercado son las de iones de litio (Li-Ion), las mismas utilizadas en la mayoría de teléfonos móviles. Además de que no hay generación in-situ de emisiones gaseosas, este tipo de vehículos se caracterizan por los bajos decibelios arrojados al ambiente, los cuales suponen igualmente un factor importante en la contaminación acústica de las grandes ciudades (17). Adicionalmente, los motores eléctricos presentan menores costos de mantenimiento debido principalmente al menor número de partes móviles y al hecho de no requerir cambio de aceite, filtros y/o bujías (16). Asimismo, presentan una alta capacidad de generación de torque, así como un mejor control de la aceleración y la desaceleración (18).

A pesar de lo anterior, la oferta que actualmente existe en el mundo de este tipo de vehículos, específicamente

para los vehículos de batería, hace que este tipo de tecnología sea aún considerada como en proceso de maduración. Lo anterior se refleja en los altos costos de inversión y en el precio que puede llegar a suponer la batería (40% del costo total del vehículo), aunque estudios recientes muestran una rápida tendencia a disminuir (19). Adicionalmente, aún existen desafíos por resolver en lo concerniente a su producción y final disposición. Por ejemplo, las emisiones equivalentes de CO₂ para una batería de tipo Li-Ion pueden estar entre 1,7 y 2,7 MT por unidad producida (16). Asimismo, este tipo de vehículos suponen la generación residuos de carácter tóxico (18). Otra desventaja de los vehículos eléctricos de batería es la baja autonomía (150-200 km por carga) en comparación con la ofrecida por los vehículos de combustión interna, aunque para necesidades puntuales de baja demanda de recorrido puede considerarse como satisfactoria. Adicionalmente, su gran tamaño y peso limitan el número de baterías en el vehículo y por tanto la autonomía final.

A pesar de estos inconvenientes, las perspectivas y expectativas a futuro de este tipo de vehículos son promisorias. En este sentido, Empresas Públicas de Medellín (EPM) ha demostrado la posibilidad de un ahorro de combustible en torno a 4,5 M \$COL al año para un vehículo Mitsubishi “i MiEV”. Este vehículo eléctrico, presenta una potencia nominal de 49 kW y su batería, de tipo Li-Ion, puede ser recargada de forma lenta (de 6 a 8 horas para el 100%), o rápida (30 minutos para lograr el 80% de la carga). El costo de la carga de este vehículo, oscila entre 7 000 y 8 000 \$COL, y puede llegar a ofrecer autonomías aproximadas de 140 km, en función de la velocidad del vehículo y la geografía de la región, entre otros.

Otra tipología promisoriosa de vehículos eléctricos y sin la problemática de la “ansiedad de rango” (expresión que describe la sensación de no poder llegar al destino final por falta de batería), es la de capacidad extendida, los cuales, a diferencia de los vehículos híbridos convencionales, están equipados con baterías de mayor tamaño con posibilidad de recarga en la red eléctrica. Así, su fuente principal de energía es la electricidad, y no el combustible fósil, como en un híbrido común. Estos vehículos están diseñados para operar de manera totalmente eléctrica, para viajes diarios no superiores a 60 km. Cuando se requiere un mayor rango de operación, un pequeño motor de combustión interna se enciende para mantener un nivel de batería mínimo, convirtiendo el vehículo eléctrico a batería, en un híbrido. El arquetipo de esta familia de vehículos de rango extendido es el Chevrolet Volt, que acumula más de 100 000 unidades en operación en todo el mundo, habiendo logrado los más altos reconocimientos de los usuarios y expertos.

Para el transporte masivo, donde los vehículos deben operar de manera intensiva, evaluaciones técnico-económicas han permitido establecer que la operación “conectada a la red” resulta más conveniente que las basadas con sistema de almacenamiento de energía (20,21). Si bien es importante resaltar los avances del AMVA a partir del metro de Medellín, los sistemas de metrocable (teleféricos para transporte masivo), y más recientemente el tranvía de Ayacucho, no se debe olvidar que, a principios del siglo xx en Colombia, los sistemas de transporte masivo de pasajeros en Bogotá y Medellín consistían en tranvías eléctricos, y más adelante, a mitad de siglo, por trolebuses.

La movilidad motorizada no sólo comprende impactos ambientales y de salud pública, sino también aumentos en los indicadores de accidentalidad y agotamiento físico-emocional de la población por causa del incremento en los niveles de estrés (22). En este sentido, se propone a continuación una serie de directrices para hacer frente a estas problemáticas:

- Mejora de la calidad tanto de la gasolina como del combustible diésel bajo las actuales condiciones colombianas. Si bien el combustible diésel presenta un contenido de azufre menor a (50 ppm), el contenido de aromáticos sigue siendo considerable (28,5% vol.), teniendo en cuenta su influencia en la tendencia de formación de hollín. Por su parte, la concentración de azufre en la gasolina sigue siendo elevado (≈ 300 ppm). Estudios del impacto en la calidad del aire y en la morbilidad y mortalidad de la población, podrían apalancar dichas mejoras.
- Diseño de campañas educativas para incentivar y promover una pauta de conducción sosegada, resaltando los beneficios económicos y ambientales, en cooperación directa con la secretaria de tránsito, la autoridad ambiental y las escuelas de conducción.
- Desarrollo de planes integrales para la chatarrización y la modernización de vehículos de bajo nivel tecnológico, así como una reorganización de las rutas de circulación para los vehículos pesados (incluyendo buses, volquetas y camiones), algo similar a un plan de ordenamiento territorial (POT) de movilidad.
- Diseño e implementación de programas para la denuncia de infracciones de tránsito y al medio ambiente, por medio de tecnologías de la información y la comunicación (TIC), en el que la comunidad pueda tomar consciencia de los impactos al medio ambiente generados a partir del uso de los vehículos de combustión interna.
- Implementación de normas de emisión más exigentes y fortalecimiento en los controles a los centros de diagnóstico automotor (CDA). Por ejemplo, concepción de mecanismos eficientes y compromisos vinculantes para la supervisión y control de dichos centros.
- Restricción de la circulación de vehículos diésel en el AMVA (los cuales tienden a desaparecer dada sus implicaciones ambientales) en sintonía con lo dispuesto en ciudades como Madrid, Berlín, París, Londres y Ciudad de México. Lo anterior debería ser valorado teniendo en cuenta la construcción de cinturones de intercambio vehicular a fin de que los vehículos de transporte pesado no ingresen al AMVA.
- El crecimiento exponencial del parque automotor sugiere un límite para la circulación de los autos en el AMVA. Más que aumentar las restricciones del pico y placa, se propone pensar en lineamientos de crecimiento sostenible que valoren la capacidad de la malla vehicular actual, respecto a los vehículos que circulan en el AMVA, sin que esto suponga la planeación de nuevas vías de circulación.
- Desarrollo e implementación de planes integrales para la incorporación de vehículos eléctricos e híbridos para el transporte tanto público como privado, así como un aceleramiento en la implementación de sistemas eléctricos a partir de energías renovables.
- Desarrollo e implementación de programas y políticas eficaces para el fomento, buen uso e integración de vías peatonales y de la bicicleta como medio de transporte, así como de protección y respeto al ciclista.

Finalmente, se resalta la necesidad de mediciones de huella de carbono y huella hídrica para todo proyecto relacionado con la movilidad. La determinación de estos parámetros permite establecer indicadores objetivos de sostenibilidad, y a su vez, identificar las etapas más críticas en términos de impacto ambiental. Lo anterior podría apalancar y justificar el desarrollo de proyectos más eficientes energéticamente, más amigables con el medio ambiente, y más beneficiosos para la comunidad.

Agradecimientos: A John Ramiro Agudelo; Edder Alexander Velandia, Jorge Ignacio Vélez; María Victoria Toro y Andrés Emiro Díez, por las contribuciones compartidas en el conversatorio organizado por el Foco de Energía de la UPB: Movilidad motorizada, impacto ambiental, alternativas y perspectivas futuras (12 de marzo de 2015); las cuales sentaron las bases para la realización de este trabajo.

Conflicto de intereses: Ninguno.

REFERENCIAS

1. World Health Organization (WHO). Ambient (outdoor) air quality and health [Internet]. Disponible en: <https://goo.gl/g7aKUL>. Consultado diciembre de 2017.

2. Brunekreef BB, Holgate ST. Air pollution and health. *Lancet*. 2002; 360 (9341): 1233-42.
3. Brook RD, Rajagopalan S, Pope CA 3rd, Brook JR, Bhatnagar A, Diez-Roux AV, et al. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*. 2010; 121 (21): 2331-78.
4. Pope CA 3rd, Thun MJ, Namboodiri MM, Dockery DW, Evans JS, Speizer FE, et al. Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of US adults. *Am. J. Respir. Crit. Care Med*. 1995; 151 (3 Pt. 1): 669-74.
5. Raaschou-Nielsen O, Beelen R, Wang M, Hoek G, Andersen ZJ, Hoffmann B, et al. Particulate matter air pollution components and risk for lung cancer. *Environ. Int*. 2016; 87: 66-73.
6. World Health Organization (WHO). International Agency for Research on Cancer (IARC). Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths [Internet]. Disponible en: <https://goo.gl/zzRgBQ>. Consultado diciembre de 2017.
7. World Health Organization (WHO), International Agency for Research on Cancer (IARC). Diesel engine exhaust carcinogenic [Internet]. Disponible en: <https://goo.gl/dPumS7>. Consultado diciembre de 2017.
8. Ministerio de Educación de Colombia. Centro virtual de noticias de la educación. Aire contaminado tiene efectos severos en la salud pública en Colombia [Internet]. Disponible en: <https://goo.gl/kvH1YW>. Consultado diciembre de 2017.
9. Gómez M, Posada E, Agudelo JR, Saldarriaga JC, Correa MA. Mejorar el combustible en los vehículos [Internet]. Disponible en: <https://goo.gl/CMY7ug>. Consultado abril de 2018.
10. Posada-Sanchez F, Bandivadekar A, German J. Estimated cost of emission reduction technologies for light-duty vehicles [Internet]. Disponible en: <https://goo.gl/qMWuLQ>. Consultado diciembre de 2017.
11. Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA). Production statistics [Internet]. Disponible en <https://goo.gl/H9LDoW>. Consultado diciembre de 2017.
12. Ericsson E. Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors. *Transport. Res. D-Tr E*. 2001; 6: 325-345.
13. Frey HC, Unal A, Roupail NM, Colyar JD. On-road measurement of vehicle tailpipe emissions using a portable instrument. *J. Air. Waste. Manage*. 2003; 53 (8): 992-1002.
14. Cadle SH, Mulawa P, Hunsanger EC, Nelson K, Ragazzi RA, Barrett R, et al. Light-duty motor vehicle exhaust particulate matter measurement in the Denver, Colorado, area. *J. Air. Waste. Manage*. 1999; 49 (9): 164-74.
15. Santos G, Behrendt H, Teytelboym A. Part II: Policy instruments for sustainable road transport. *Res. Transport. Econ*. 2010; 28 (1): 46-91.
16. Faria R, Moura P, Delgado J, de Almeida AT. A sustainability assessment of electric vehicles as a personal mobility system. *Energ. Convers. Manage*. 2012; 61: 19-30.
17. Mendonça A, Freitas E, Ferreira JP, Raimundo ID, Santos JA. Noise abatement and traffic safety: The trade-off of quieter engines and pavements on vehicle detection. *Accident Anal. Prev*. 2013; 51: 117.
18. Manzetti S, Mariasiu F. Electric vehicle battery technologies: from present state to future systems. *Renew. Sust. Energ. Rev*. 2015; 51: 1004-1012.
19. Nykvist B, Nilsson M. Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature Clim. Change*. 2015; 5: 329-32.
20. Díez A, Velandia E, Bohórquez JA, Restrepo M, Guggenberg E. Reinroduction of trolleybuses in Colombia: An opportunity for the development of sustainable transport. *PICMET'12*. 2012: 1125-31.
21. Díez AE, Bohórquez A, Velandia E, Roa LF, Restrepo M. Modern trolleybuses on bus rapid transit: key for electrification of public transportation. *IEEE ANDESCON*. 2010: 1-7.
22. Schnell I, Potchter O, Yaakov Y, Epstein Y, Brener S, Hermesh H. Urban daily life routines and human exposure to environmental discomfort. *Environ. Monit. Assess*. 2012; 184 (7): 4575-90.