

Exposición de peatones a la contaminación del aire en vías con alto tráfico vehicular

Pedestrian exposure to air pollution on routes with heavy vehicular traffic

Julián Felipe Segura-Contreras¹ y Juan F. Franco²

¹ Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR), Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. juanfelipefranco@gmail.com

² Grupo de Investigación en Gestión Ambiental. Facultad de Ingeniería, Universidad EAN. Bogotá, Colombia. jffranco@uniandes.edu.co

Recibido 17 Febrero 2015/Enviado para Modificación 22 Mayo 2015/Aceptado 9 Septiembre 2015

RESUMEN

Objetivo Este estudio piloto tuvo como objetivo caracterizar la contaminación del aire a la que están expuestos los peatones en inmediaciones de tres vías con alto tráfico vehicular en la ciudad de Bogotá (carrera novena, carrera séptima y carrera once).

Método Como indicador de la calidad del aire se utilizó el carbono elemental (BC), dado que es un compuesto reconocido como trazador de las emisiones provenientes de fuentes móviles. Las concentraciones de BC fueron registradas de forma continua y en tiempo real con un MicroAethalometro portátil Modelo AE51 que era portado por las personas que realizaban los recorridos de 1.6 kilómetros en cada vía, al tiempo que diligenciaban un formato de actividades en el que consignaban los eventos relevantes percibidos durante el recorrido.

Resultados Se encontró una relación directa (observada) entre los picos de concentración de BC a los que están expuestos los peatones y los eventos documentados en cada trayecto. Si bien en los tres corredores viales estudiados se registraron concentraciones de BC que indican un aire de inadecuada calidad, se encontraron distintas distribuciones de las concentraciones para cada vía estudiada. Los autores atribuyen este resultado a la diferencia en el volumen de tráfico pesado (buses y busetas principalmente), siendo la Carrera Once la vía con mayor flujo de vehículos de este tipo y más altas concentraciones de BC.

Conclusión La evidencia recolectada refuerza la importancia de involucrar la variable calidad del aire al momento de diseñar infraestructura orientada a modos de transporte no motorizado.

Palabras Clave: Contaminación atmosférica, material particulado, emisiones de vehículos, salud pública, planificación de ciudades (*fuentes: DeCS, BIREME*).

ABSTRACT

Objective This pilot study aimed to characterize pedestrians' exposure to air pollution alongside three routes with high traffic in Bogota, Colombia (ninth avenue, eleventh avenue and seventh avenue).

Method Black carbon (BC) was used as an air quality indicator since it is recognized as a tracer compound for emissions from mobile sources. The concentrations of BC were recorded continuously with a portable MicroAethalometer Model AE51. The instrument was carried by the people doing the 1.5 kilometer-long routes, while they filled in an activity form that recorded the events occurring during the walk.

Results A direct (observed) relationship between BC concentration peaks and documented events at each route was found. Although BC concentrations at all three studied corridors indicate an inadequate air quality, different concentration distributions were found for each route. The authors attribute this result to the difference in the volume of heavy traffic (mainly buses and minibuses). Eleventh Avenue was the route with the greatest flow of such vehicles and higher concentrations of BC.

Conclusion The collected evidence reinforces the importance of involving air quality as a critical variable when designing non-motorized transport oriented infrastructure.

Key Words: Air pollution, particulate matter, vehicular emissions, public health, city planning (*source: MeSH, NLM*).

La importancia del estudio y control de la contaminación atmosférica está sustentada en la evidencia sobre su impacto negativo en la salud respiratoria y cardiovascular de las personas, así como con el deterioro de su calidad de vida (1,2). Específicamente, estudios científicos han relacionado la exposición a la contaminación atmosférica con síntomas respiratorios, alteración de la función pulmonar y enfermedad pulmonar obstructiva crónica (3-5). Esta situación es prioritaria en ciudades como Bogotá, reconocida como uno de los centros urbanos con mayor contaminación atmosférica en América Latina (1,6,7) y donde sus autoridades de salud pública han documentado que las enfermedades respiratorias son la principal causa de morbilidad y mortalidad para niños menores de cinco años de edad (8).

A pesar de los esfuerzos realizados por la autoridad ambiental local, las concentraciones de material particulado respirable (PM_{10}) en algunas zonas de la ciudad con frecuencia están por encima de los valores que dicta la normativa nacional y que son considerados como perjudiciales para la salud de las personas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (9). De acuerdo con el último inventario de emisiones para Bogotá, las fuentes móviles emiten cerca del 60 % del PM_{10} (10), con un aporte significativo de los vehículos que utilizan combustible diésel (v.g., buses y camiones), reconocidos científicamente como importantes generadores de partículas

(11). Dada esta condición, son de especial preocupación las concentraciones de material particulado (PM) encontradas en inmediaciones de vías con alto flujo vehicular. En especial cuando es allí por donde circulan los peatones y cuando se estima que cerca del 40 % de los viajes totales diarios en la ciudad se realizan caminando (12).

Se propuso como objetivo principal de este estudio piloto caracterizar la exposición de peatones a PM en tres vías principales y paralelas entre sí en Bogotá, utilizando como indicador el carbono elemental (BC por sus siglas en inglés). Este compuesto, constituye la parte inorgánica del PM y técnicamente es reconocido como trazador de las emisiones provenientes de vehículos diésel (13,14).

MÉTODOS

Se seleccionaron tres corredores viales, ubicados en la zona nororiental del área urbana de Bogotá. Dos de éstas con alto tráfico vehicular y presencia de buses de servicio público (Avenida Carrera Séptima y Carrera Once) y una vía paralela a estos dos corredores con una condición de tráfico vehicular menor (Avenida Carrera Novena). En cada una se hicieron recorridos a pie en tramos de 1.6 kilómetros. Cada recorrido era realizado por un grupo de asistentes de investigación equipados con un monitor de concentraciones de BC en tiempo real, un GPS y un formato para registrar eventos relevantes percibidos durante el recorrido (v.g., bus iniciando marcha, semáforo peatonal en rojo). En la Tabla 1 se presenta la descripción de las tres vías seleccionadas, sus tramos y el número de experimentos realizados.

Tabla 1. Caracterización de los corredores seleccionados y volumen vehicular

Corredor vial	Tramo	Distancia del tramo (Km)	Configuración de la vía	Ancho medio del andén (costado occidental) (m)	Flujo vehicular (vehículos/hora)			Número experimentos
					Liviano	Motos	Pesados (buses y camiones)	
Avenida Carrera Séptima	Entre Calle 72 y Calle 85	1,6	Abierta (Sentidos norte-sur y sur-norte)	2,4	2 306	591	371	5
Carrera Once	Entre Calle 72 y Calle 85	1,5	Cerrada (sentido norte-sur)	2,4	1 952	438	323	5
Avenida Carrera Novena	Entre Calle 72 y Calle 85	1,6	Cerrada (sur-norte)	2,0	1 125	263	89	5

En cada tramo vial se realizaron cinco experimentos durante días hábiles. Cada experimento consistió en la determinación continua de las concentraciones de BC en el andén del costado occidental de cada una de las vías seleccionadas. Las concentraciones de BC fueron determinadas haciendo uso de un MicroAethalometro Modelo AE51 (AethLabs Inc., USA), el cual a través de un método óptico mide la concentración másica de BC. Se tomaron muestras segundo a segundo durante el tiempo de duración de cada recorrido, una vez finalizado cada experimento los valores de concentración registrados se validaron (eliminación de ceros, negativos y valores atípicos) y se almacenaron en una base de datos que al final contó con más de 18 mil observaciones.

Adicionalmente se realizaron conteos vehiculares con el fin de caracterizar las vías y analizar su relación con los niveles de BC encontrados. Dichos conteos se obtuvieron a través del análisis de videos tomados a un costado de cada una de las vías durante cuatro momentos de 15 minutos cada uno. Se tomaron videos en dos días diferentes de la semana, en dos horarios diferentes cada día (mañana y medio día). El análisis de los videos fue realizado por duplicado y el flujo vehicular se categorizó en vehículos livianos, motocicletas y vehículos de pesados (buses de servicio público y camiones).

RESULTADOS

La Figura 1 presenta una serie de tiempo para las concentraciones de BC en uno de los recorridos realizados sobre la Carrera Séptima e ilustra la relación entre algunos de los eventos reportados en campo y los picos de concentración. En la misma figura se puede apreciar cómo hay circunstancias propias de la vía y de la cercanía a las fuentes de emisión que afectan considerablemente los niveles de BC a los que se encuentra expuesto el peatón. La Figura 2 muestra un ejemplo de concentraciones de BC en tiempo real para los tres corredores viales estudiados, obtenidas durante un periodo de medición. Las concentraciones medias de BC para este día específico fueron $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la Carrera Novena, Carrera Once y Carrera Séptima respectivamente. Los resultados, indican que las concentraciones encontradas en las Carrera Séptima y Carrera Once (identificadas por la línea gris y línea gris punteada) presentan valores máximos que incluso superan los $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos picos instantáneos de concentración tienen una magnitud hasta cuatro veces mayor a los registrados en la Carrera Novena.

Figura 1. Serie de tiempo de concentraciones de BC durante uno de los recorridos por la Carrera Séptima. Se relacionan algunos de eventos reportados en campo

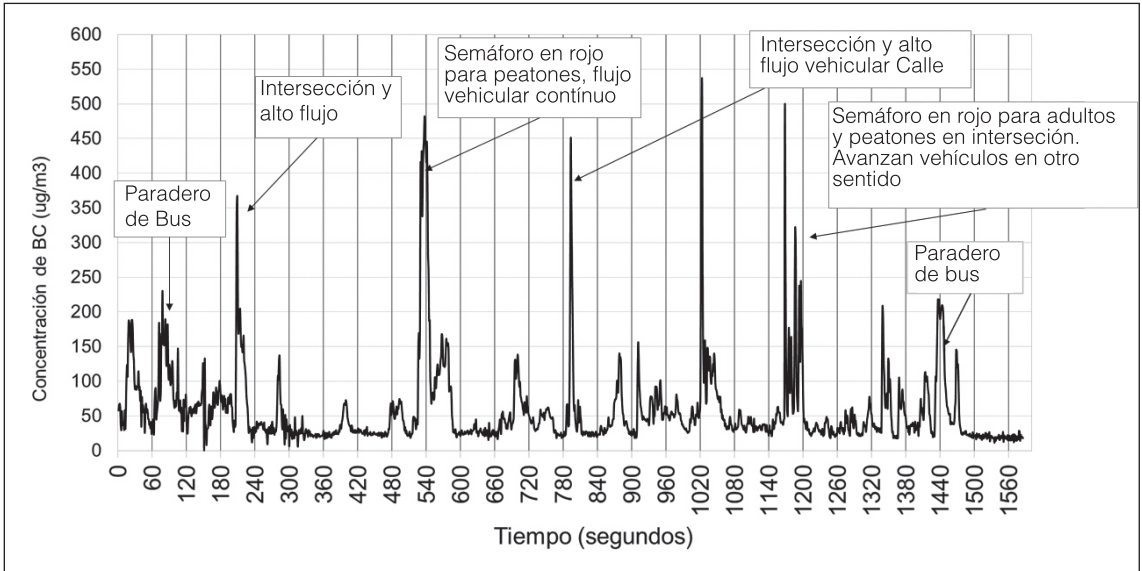
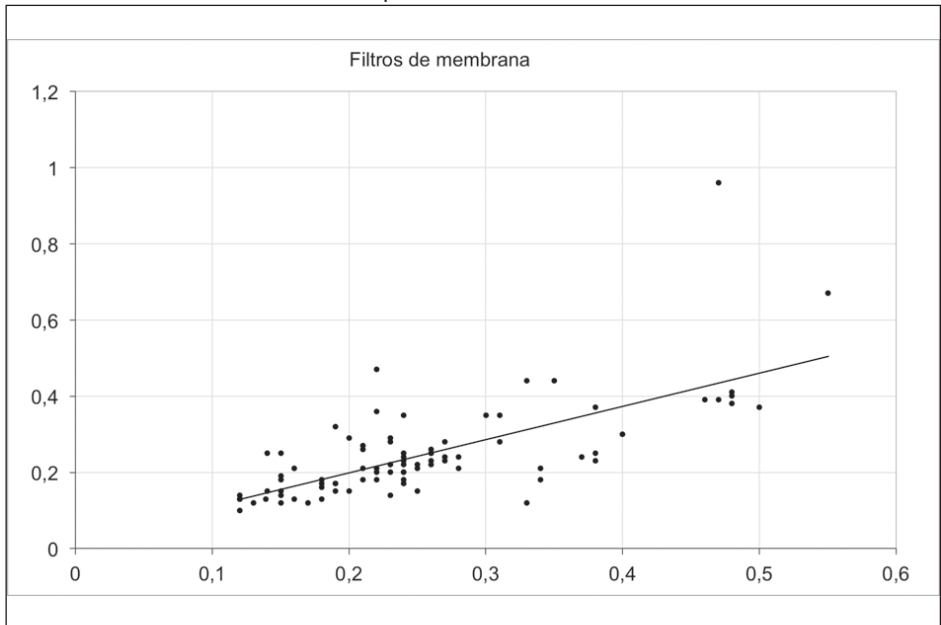
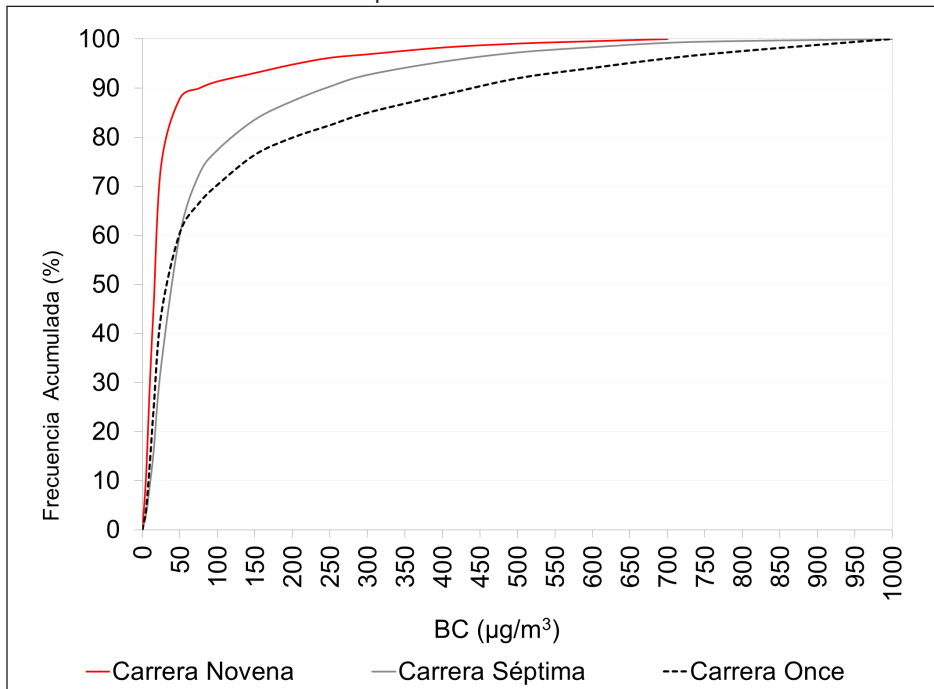


Figura 2. Serie de tiempo de concentraciones de BC durante uno de los recorridos por cada una de las vías estudiadas



La Figura 3 presenta los porcentajes de frecuencia acumulada para las concentraciones de BC en inmediaciones de cada corredor vial, agrupados por tipo de vía. Entendiendo que esta figura es construida a partir de todos los registros de concentración para cada una de las vías, y tomando como valor de referencia una concentración de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (valor guía -24 horas- de la OMS para material particulado fino), se puede evidenciar que en la Carrera Novena el 20 % de los registros superaron ese valor, mientras que para las otras dos vías estudiadas cerca del 70 % de los registros instantáneos de concentración estuvieron por encima del mismo valor de referencia. Los niveles de BC en las tres vías, indican una condición de calidad del aire inadecuada. En la Carrera Once (curva que se encuentra más a la derecha en la Figura) no solamente se presentaron mayores picos de concentración (valores máximos instantáneos cercanos a los $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$), sino también más frecuentes si se le compara con la Carrera Séptima y la Carrera Novena. De acuerdo a los resultados de los aforos que se muestran en la Tabla 1, la Carrera Once fue la que presentó mayor flujo de vehículos pesados (buses, busetas y camiones). Estos resultados sugieren un impacto en la calidad del aire relacionado con la cantidad y tipo de tráfico que circula por la vía.

Figura 3. Frecuencia acumulada para las concentraciones de BC discriminadas para cada una de las vías estudiadas



DISCUSIÓN

Se cuantificaron las concentraciones de BC a las que están expuestos los peatones en tres vías paralelas y con alto tráfico vehicular en la ciudad de Bogotá. La posibilidad de registrar algunos de los eventos que ocurren mientras el peatón camina (Figura 1) permitió documentar que existen circunstancias propias de la vía y de la cercanía a las fuentes de emisión que afectan considerablemente los niveles de BC a los que se encuentra expuesto el peatón (v.g. intersecciones y paraderos de transporte público).

El recolectar datos continuos y en tiempo real permitió destacar el comportamiento altamente dinámico de las concentraciones de BC durante los recorridos a pie. Esta variabilidad indica un impacto importante de fuentes cercanas, principalmente tratándose de BC que son partículas más finas asociadas a emisiones de tráfico pesado que usa diésel como combustible (14-16). Para el caso específico mostrado en la Figura 2, los más altos y más frecuentes picos de concentración se presentaron en la Carrera Once y la Carrera Séptima, vías donde se encontró el mayor volumen de vehículos de transporte público que utilizan combustible diésel, así como de motocicletas. En la Carrera Once y Carrera Séptima se documentó hasta cuatro veces el flujo de tráfico pesado y dos veces el flujo de motocicletas comparado con lo registrado en la Carrera Novena (Tabla 1). Pensando en reducir la exposición y entendiendo que los tramos de vía estudiados son paralelos entre sí, un peatón que conozca este tipo de información, podría eventualmente tomar la decisión de caminar por la vía menos contaminada.

Estudios en ciudades europeas han destacado la importancia del impacto del tráfico vehicular en los niveles de contaminación a los que están expuestas las personas al caminar, así como la importancia de involucrar los conceptos de exposición a la contaminación atmosférica cuando se diseña infraestructura para el peatón (17-18). En general son limitados los estudios de concentraciones de BC a las que están expuestos peatones en inmediaciones de corredores viales. Los niveles para material particulado fino (PM_{2.5}) reportados en vías de dichas ciudades europeas son hasta una tercera parte de los valores de concentración media de BC obtenidos para los recorridos peatonales realizados en este estudio. Como antecedente en Bogotá, Franco et al (19) midieron BC a nivel de piso en espacios exteriores de escuelas ubicadas frente a vías principales de la ciudad. Las concentraciones encontradas estuvieron entre los 25 ug/m³ y 40 ug/m³, si bien son espacios diferentes a los analizados en el presente trabajo, estos

resultados coinciden en cuanto a la relevancia de los niveles de BC en inmediaciones de vías de alto tráfico y su impacto en la exposición personal.

Nuestros resultados, aún reconociendo que se trata de un estudio piloto, reiteran la importancia de la problemática de contaminación del aire en Bogotá. A pesar de los esfuerzos de la autoridad ambiental por mejorar esta condición (v.g., Plan Decenal de Descontaminación del Aire, mayores controles a fuentes industriales), las personas cuando caminan en las vías de la ciudad, están expuestas a concentraciones de contaminantes atmosféricos nocivas para la salud. Se debe reconocer que la calidad del aire en Bogotá sigue siendo un aspecto ambiental de la mayor relevancia y su solución depende de un compromiso conjunto entre distintas partes. Las autoridades de planeación, movilidad, salud y ambiente, los gremios, la academia y los ciudadanos son todos actores fundamentales en la solución *

Agradecimientos: Al Semillero de Investigación Vestigium de la Facultad de Ingeniería de la Universidad EAN. En especial: Alejandra Galeano, Andrea Carolina Parra, Daniela Vargas, Estefanía Sanabria, Lina Carranza, Tania Parra.

REFERENCIAS

1. World Health Organization [Internet]. Air Quality Guidelines Global Update. [Internet]. Disponible en: http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf. Consultado marzo de 2014. Consultado abril del 2014.
2. Franco JF. Contaminación Atmosférica en Centros Urbanos. Desafío para Lograr su Sostenibilidad: caso de estudio Bogotá. Revista EAN. 2012; 72:193-205.
3. Calderón-Garciduenas L, Mora-Tiscareno A, Fordham LA, Chung CJ, Valencia-Salazar G, Flores-Gómez S, et al. Lung radiology and pulmonary function of children chronically exposed to air pollution. Environmental Health Perspectives. 2006; 114: 1432-1437.
4. Holguin F, Flores S, Ross Z, Cortez M, Molina M, Molina L, et al. Traffic-related exposures, airway function, inflammation, and respiratory symptoms in children. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. 2007; 176: 1236-1242
5. Hernández-Flórez LJ, Aristizabal-Duque G, Quiroz L, Medina, Katalina, Rodríguez-Moreno, Natalia, Sarmiento, Rodrigo, & Osorio-García, Samuel D. Contaminación del aire y enfermedad respiratoria en menores de cinco años de Bogotá, 2007. Revista de Salud Pública. 2013, 15(4): 552-565.
6. The Economist Intelligence Unit [Internet]. Índice de Ciudades Verdes de América Latina. [Internet]. Disponible en: http://www.siemens.com/press/pool/de/events/corporate/2010-11-lam/Study-Latin-American-Green-City-Index_spain.pdf. Consultado abril del 2014.
7. World Health Organization. Ambient (outdoor) air pollution in cities database 2014. [Internet]. Disponible en: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/. Consultado julio 2014.
8. Secretaría Distrital de Salud de Bogotá. Nacimientos y mortalidades evitables: comparativo 2008, 2009, 2010. [Internet]. Disponible en: <http://www.saludcapital.gov.co/sitios/VigilanciaSaludPublica/Protocolos%20de%20Vigilancia%20en%20Salud%20>

- Publica/Documento%20Preliminar%20Diagn%C3%B3stico%20Distrital%202010.pdf. Consultado julio de 2014.
9. Zhu T, Melamed M, Parrish D, Gauss M, Gallardo-Kliener L, Lawrence M, et al. WMO/IGAC Impacts of Megacities on Air Pollution and Climate. World Meteorological Organization. 2012; 205: 149-151.
 10. Secretaría Distrital de Ambiente. Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá, Alcaldía Mayor de Bogotá; 2011.
 11. Baldassarri LT, Battistelli CL, Conti L, Crebelli R, De Berardis B, Iamiceli AL, et al. Evaluation of emission toxicity of urban bus engines: Compressed natural gas and comparison with liquid fuels. *Science of the Total Environment*. 2006; 355: 64-77.
 12. Secretaria Distrital de Movilidad. Movilidad en Cifras 2012. Alcaldía Mayor de Bogotá. [Internet]. Disponible en: http://www.movilidadbogota.gov.co/hiwebx_archivos/audio_y_video/final%20cifras%202012.pdf. Consultado agosto de 2014.
 13. Westerdahl D, Fruin S, Sax T, Sioutas C. Mobile platform measurements of ultrafine particles and associated pollutant concentrations on freeways and residential streets in Los Angeles. *Atmospheric Environment*. 2005; 39: 3597-3610.
 14. Fruin, SA, Winer AM, Rodes CE. Black carbon concentrations in California vehicles and estimation of in-vehicle diesel exhaust particulate matter exposures. *Atmospheric Environment*. 2004; 38: 4123-4133.
 15. Kirchstetter TW, Aguiar J, Tonse S, Fairley D, Novakov T. Black Carbon Concentrations and Diesel Vehicle Emission Factors Derived from Coefficient of Haze Measurements in California: 1967-2003. *Atmospheric Environment*. 2008; 42: 480-491.
 16. Nelson PF, Tibbett AR, Day SJ. Effects of vehicle type and fuel quality on real world toxic emissions from diesel vehicles. *Atmospheric Environment*. (2008); 42: 5291-5303.
 17. Do Vale ID, Vasconcelos AS, Duarte GO. Inhalation of particulate matter in three different routes for the same OD pair: A case study with pedestrians in the city of Lisbon. *Journal of Transport & Health*. 2015; 2: 474-482.
 18. Nyhan M, McNabola A, Misstear B. Comparison of particulate matter dose and acute heart rate variability response in cyclists, pedestrians, bus and train passengers. *Science of the Total Environment*. 2014; 468-469: 821-831.
 19. Franco JF, Rojas NY, Sarmiento OL, Behrentz E. Urban air pollution in school-related microenvironments in Bogota, Colombia. *Ingeniería e Investigación*. (2013); 33, 2: 42 - 48.