

# Evaluación de la exposición de ciclistas a la contaminación del aire: una revisión de la literatura

## Evaluation of cyclists exposure to air pollution: a literature review

Oscar D. Díaz-Fonseca, Néstor Y. Rojas-Roa y Alba I. Rodríguez-Pulido

Recibido 7 junio 2018 / Enviado para modificación 14 diciembre 2017 / Aceptado 20 julio 2018

### RESUMEN

**Objetivos** Describir e interpretar las metodologías y resultados de los principales estudios relacionados con el monitoreo de contaminación atmosférica en ciclistas.

**Métodos** Se buscaron y analizaron las investigaciones a nivel nacional e internacional de los últimos diez años en las bases de datos Cochrane, Scopus, Embase, Science Direct y Pubmed. La búsqueda se realizó de Agosto a Septiembre del año 2017 usando los siguientes descriptores de búsqueda para MeSH: air pollution, bicycling, environmental exposure, environmental health, inhalation exposure, environmental pollutants, transportation, public health y toxicology, y para DeCS: contaminación del aire, ciclismo, exposición a riesgos ambientales, contaminantes ambientales, inhalación, transportes, salud pública y toxicología.

**Resultados** Se identificaron diecinueve artículos publicados elegibles. La mayoría de los estudios se realizaron en Europa y Estados Unidos. En Latinoamérica se han reportado cuatro estudios. Otros estudios buscaban comparar la exposición en distintas rutas en bicicleta, comparar trayectos de una misma ruta, y otros determinar la relación distancia vs exposición. De igual manera, variables como el tráfico vehicular, la distancia a las fuentes de emisión y el tipo de ciclorruta, juegan un papel fundamental en la exposición a contaminantes en ciclistas.

**Conclusiones** Se encontraron diversas variables que influyen de forma directa o indirectamente en la exposición a la contaminación del aire de los usuarios de bicicleta, así como algunos factores que pueden reducir la exposición a estos contaminantes.

**Palabras Clave:** Contaminación del aire; ciclismo; exposición a riesgos ambientales; contaminantes ambientales; exposición por inhalación; transportes; salud pública; toxicología (*fuentes: DeCS, BIREME*).

### ABSTRACT

**Objectives** To describe and interpret the methodologies and results of the main studies related to the monitoring of exposure of cyclists to air pollution.

**Methods** Research and analysis of national and international research of the last ten years in the Cochrane, Scopus, Embase, Science Direct and Pubmed databases. The search was conducted in August and September 2017 using the following search descriptors for MeSH: air pollution, bicycle riding, environmental exposure, environmental health, exposure by inhalation, environmental pollutants, transportation, public health and toxicology. For DeCS: air Pollution, cycling, exposure to environmental risks, environmental pollutants, inhalation, transportation, public health and toxicology.

**Results** Nineteen eligible published articles were identified. Most studies were conducted in Europe and the United States. Four studies have been reported in South America. Other studies seek comparisons on different bicycle routes, compare exposure during variations of the same route, and others determine the distance-exposure relationship. In the same way, variables such as vehicular traffic, distance to the emission sources and the type of bike path, play a fundamental role in the exposure to pollutants in cyclists.

OD: Ing. Ambiental y Sanitario. Bogotá, Colombia. [odiazf@unal.edu.co](mailto:odiazf@unal.edu.co), [oddf64@gmail.com](mailto:oddf64@gmail.com).

NR: Ing. Químico. Ph. D. Fuel and Energy en University of Leeds. Profesor asociado Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. [nyrojasr@unal.edu.co](mailto:nyrojasr@unal.edu.co)

AR: MD. Especialista en Salud Ocupacional y Medicina del Trabajo. M. Sc. Toxicología Clínica en Université Catholique de Louvain. Profesora asociada al Departamento de Toxicología, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. [airrodriguez@unal.edu.co](mailto:airrodriguez@unal.edu.co)

**Conclusions** Several variables were found that influence, directly or indirectly, the cyclists exposure to air pollution, as well as some factors that can reduce this exposure.

**Key Words:** Air pollution; bicycling; environmental exposure; environmental health; inhalation exposure; environmental pollutants; transportation; public health; toxicology (*source: MeSH, NML*).

La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) ha clasificado la contaminación del aire como carcinogénica para los humanos (1). Esto es un problema global toda vez que nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado, lo cual se ve reflejado en 4,2 millones de muertes en el 2016, aproximadamente, asociadas a la mala calidad del aire (2). Los contaminantes del aire se pueden dividir en dos grandes grupos, los gases y el material particulado. Los gases, a diferencia del material particulado, una vez es cuantificada su concentración en el ambiente y con sus características fisicoquímicas, se puede establecer los efectos tóxicos sobre el organismo (3). El material particulado es una mezcla compleja de partículas sólidas y líquidas de diversos tamaños y composiciones (4), que incluye hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (5), carbono elemental (6), compuestos de carbono orgánico (7,8), metales (9), entre otros. A su vez, se divide en filtrable y condensable (10).

Para el material particulado las diferencias en tamaño y composición química de las partículas pueden potenciar ciertos efectos toxicológicos más que otros con variaciones en el sitio de deposición, adsorción dentro del sistema respiratorio y capacidad de inducir inflamación y muerte celular (11); por ejemplo, en la fracción gruesa de material particulado, con diámetro aerodinámico menor a 10 micrómetros, se disminuye las tasas de fertilidad en humanos (12). La fracción fina, diámetro aerodinámico no menor a 2,5 micrómetros, tiene la capacidad de alterar la función respiratoria en personas sanas (13). Las partículas ultrafinas (PUF), con diámetro inferior a 0,1 micrometros, pueden causar daño al ADN (14) y afectar adversamente las enfermedades cardiovasculares, particularmente las crisis hipertensivas (15).

Una población que se encuentra especialmente vulnerable a los efectos de la contaminación atmosférica son los usuarios de bicicleta, ya que se encuentran realizando actividad física a distancias muy cercanas a fuentes de emisión vehicular (16,17). De acuerdo con la OMS los desplazamientos rápidos en bicicleta son considerados como ejercicios vigorosos (18) y si bien hay estudios que mencionan que los beneficios de cambiar de un medio de transporte pasivo a uno activo, como la bicicleta, hay otros que muestran cómo la bicicleta es un factor de riesgo para la inhalación de mayores cantidades de contaminantes (19).

La bicicleta se está convirtiendo de nuevo en el modo de transporte favorito, tanto en los países en desarrollo como en los desarrollados (20). En los países en desarrollo la creciente congestión del tráfico vehicular hace que la bicicleta pueda sea un medio de transporte más rápido que los motorizados. Sin embargo, debido a los altos niveles de contaminantes peligrosos, principalmente los generados por el tráfico vehicular, el ciclista podría estar expuesto a concentraciones más altas (21). Por este motivo, es fundamental monitorear los ciclistas y los corredores por donde estos transitan, llamados ciclorrutas.

## METODOLOGIA

Para la búsqueda y localización de las fuentes bibliográficas se utilizaron las bases de datos Cochrane, Scopus, Embase, Science Direct y Pubmed. La búsqueda se realizó de abril a mayo del 2018 usando los siguientes descriptores de búsqueda para MeSH: Air pollution, Bicycling, Environmental Exposure, Environmental Health, Inhalation Exposure, Environmental Pollutants, transportation, public health, toxicology, y para DeCS: contaminación del aire, ciclismo, exposición a riesgos ambientales, contaminantes ambientales, inhalación, transportes, salud pública, toxicología.

Para la selección de los artículos se leyó el título y el resumen/abstract de cada uno. De los artículos seleccionados se extrajo el resumen, los resultados y las conclusiones. Como criterio de exclusión no se seleccionaron artículos de revisión.

## RESULTADOS

Se encontraron 33 artículos y se seleccionaron e identificaron diecinueve artículos publicados elegibles. La mayoría de los estudios se realizaron en Europa y Estados Unidos. En Latinoamérica se han reportado cuatro estudios.

### Distancia al tráfico vehicular

Pattinson (22) analiza el comportamiento de las PUF, monóxido de carbono (CO) y el material particulado inferior a 1 micrómetros (PM<sub>1.0</sub>) de tres bicicletas que viajan a distancias diferentes alejadas del tráfico vehicular, sobre la carretera, a 7 y 19 metros. La exposición promedio a PUF y CO fue aproximadamente 20-30% (p<0.01) más baja a 7 metros y de 40-50% a 19 metros, que en la carretera

( $p < 0.01$ ). Esto indica que, en condiciones contaminadas, la bicicleta que se transporta sobre la carretera no solo experimentó concentraciones promedio más altas, sino que hubo concentraciones elevadas de contaminantes en toda el área inmediatamente adyacente a la vía. Este tipo de estudios presentan una metodología simple que se puede aplicar en cualquier entorno de transporte para el diseño y monitoreo de ciclorrutas.

### Tipo de ciclorruta

De igual forma, un estudio realizado por MacNaughton (23) en Boston, Estados Unidos, analizó el impacto de tres tipos de ciclorrutas después de ajustar por la densidad de tráfico, la concentración de fondo y las intersecciones. Los tipos de ciclorrutas estudiados fueron: Bike paths también llamados, senderos para bicicletas, están separados del tráfico de vehículos. Bike lanes, también llamados carriles para bicicletas son adyacentes al tráfico separados por una barrera física. Designated bike lanes o Carriles para bicicletas designados, son carriles compartidos para autobuses y ciclistas (23).

Los senderos exclusivos para bicicletas, tienen concentraciones más bajas de Black Carbon (BC), hollín emitido por los motores de gasolina y Diesel (24) y  $\text{NO}_2$  que los carriles para bicicletas. Se predijo que el BC aumentaría en un 33% en carriles para bicicletas en comparación con los senderos para bicicletas. Y se prevé que el  $\text{NO}_2$  aumentará en un 31% en carriles para bicicletas y en un 59% en carriles para bicicletas designados (23). Este estudio evidencia que los ciclistas pueden reducir su exposición a los contaminantes producto del tráfico vehicular durante su viaje al trabajo utilizando senderos para bicicleta, independientemente del aumento potencial de tráfico a lo largo de estas rutas.

De acuerdo con el modelo utilizado, se encuentra que el  $\text{NO}_2$  tiene cuatro variables que son estadísticamente significativas con un nivel de significación del 5%, estas variables son densidad de tráfico ( $p = 0.04$ ), concentración de fondo ( $p < 0.0001$ ), densidad de vegetación ( $p = 0.0008$ ) y las intersecciones ( $p < 0.0001$ ). Sin embargo, para el BC la única variable que fue estadísticamente significativa fue el número de intersecciones ( $p < 0.0001$ ). Con esto se evidencia que se debe seguir buscando y analizando variables que ayuden a predecir las concentraciones de BC y fortalecer las variables ya usadas para predecir las concentraciones de  $\text{NO}_2$ , por ejemplo, hacer un aforo vehicular discriminado, para la variable de densidad de tráfico (23).

La principal limitación de este estudio fue la incapacidad de modelar completamente las complejas variaciones espaciales y temporales, ya que, en el caso del tráfico vehicular, se usaron niveles medios de tráfico diario en lugar de medidas en tiempo real (25).

El BC es altamente sensible a las fuentes de emisión, por lo tanto, similar a lo que ocurre con el monóxido de carbono (26), este dependerá del tráfico vehicular en tiempo real. Este estudio recomienda usar ciclorrutas en senderos para bicicletas sobre los bicarriles y los senderos designados, principalmente para reducir la exposición a  $\text{NO}_2$ .

### Bicicleta vs otros medios de transporte

La intensidad del ejercicio puede llegar a ser un factor importante para establecer, parcialmente, el riesgo por exposición a contaminantes atmosféricos (19). Los principales estudios se realizaron en España (17), Reino Unido (27), Bélgica (28) y dos en Latinoamérica, en Colombia (29) y Chile (30).

En Barcelona, De Nazelle evidenció que las concentraciones promedio de cada uno de los contaminantes son diferentes para cada uno de los modos de transporte, bicicleta, caminar, bus y coche ( $p < 0.05$ ). Además, los ciclistas generalmente estuvieron expuestos a concentraciones más bajas que los viajeros motorizados, pero cuando se tuvieron en cuenta las tasas de inhalación y el tiempo de viaje, experimentaron mayores dosis inhaladas de BC y PUF en comparación con los pasajeros del autobús y dosis inhaladas comparables con conductores de automóviles (17).

Asimismo, Kingham (31) estudió tres medios de transporte: carro, bus y bicicleta (sobre la vía y fuera de la vía) en horas pico, cuando se produce mayor aglomeración en los transportes (32), en la mañana y en la tarde. En contraste con los demás estudios, para el  $\text{PM}_{1.0}$  los ciclistas están más expuestos que los conductores de coche ( $p < 0.05$ ). Los ciclistas sobre la carretera están expuestos a niveles significativamente más altos de CO,  $\text{PM}_{1.0}$  y UFP que los ciclistas fuera de carretera ( $p < 0.05$ ).

Se encontró un estudio (33) en donde se midió un grupo de contaminantes que hacen parte de los compuestos orgánicos volátiles (COV), butano, tolueno, etilbenceno y xileno, además de ser el único donde se usaron muestreadores pasivos. Al igual que en los demás artículos el coche fue el medio de transporte más contaminado para todos los contaminantes y la bicicleta llegó a ocupar el segundo lugar para el tolueno con 28,7 partes por billón (ppb). Es importante analizar estos contaminantes, especialmente cuando uno de ellos es clasificado por la IARC en el grupo 1, es decir, como un agente cancerígeno para los humanos, como es el caso del benceno (33).

Un estudio desarrollado por Okokon (34) en Helsinki en Finlandia, Rotterdam en los Países Bajos y Thessaloniki en Grecia determinó que los ciclistas y pasajeros de autobuses están más expuestos a los contaminantes del aire relacionados con el tráfico que los conductores de automóviles, siempre que las ventanillas del automóvil estén cerradas.

### Estudios en Latinoamérica

Un estudio realizado por Suarez (30) en el 2014 se analizó las concentraciones de  $PM_{2.5}$  y PUF en cuatro modos de transporte, bicicleta, bus, carro y metro, las mediciones se realizaron en horas de la mañana (8-9 a.m). En este estudio se midió la concentración de fondo de estos contaminantes con un monitor estático. Para los viajeros en bicicleta se encontró una contribución estadísticamente significativa del tráfico vehicular sobre el  $PM_{2.5}$  y las PUF, de  $25 \mu g m^{-3}$  y  $25600 pt cm^{-3}$ , respectivamente. Para  $PM_{2.5}$  y PUF el medio de contaminación más contaminado fue el bus. La media de  $PM_{2.5}$  en los trayectos en bicicleta fue de  $50,9 \mu g m^{-3}$  superando únicamente al modo de carro con  $46,5 \mu g m^{-3}$  y para PUF el medio más contaminado fue el bus con  $70000 pt cm^{-3}$ , en segundo lugar la bicicleta con  $63\ 900 pt cm^{-3}$ . En este estudio se establece la gran importancia que tiene las concentraciones de fondo en la modelación de la calidad del aire.

En el estudio realizado por Morales (29) en el 2016, se seleccionaron seis modos de transporte tanto pasivos como activos, entre estos la bicicleta, donde se midieron las concentraciones de PUF, BC y  $PM_{2.5}$  en tres rutas diferentes. El estudio encontró que la concentración de exposición a  $PM_{2.5}$  y BC podría ser hasta seis veces mayor en los autobuses del sistema rápido en comparación con la exposición de la concentración de usuarios de bicicletas. También para los ciclistas la configuración geométrica de las calles determina la exposición a los contaminantes atmosféricos, donde una calle abierta, a pesar del tráfico vehicular, puede presentar reducciones importantes en la exposición a estos contaminantes (29).

Un estudio desarrollado por Franco (35) monitoreó las concentraciones de  $PM_{2.5}$  y BC en 4 tipos de ciclorrutas de la ciudad de Bogotá. Todas las mediciones se realizaron entre semana y fines de semana, entre las 7-10 a.m, este fue el único estudio que realizó monitoreos los fines de semana. Existe una diferencia estadísticamente significativa entre las concentraciones de contaminantes en días laborables y los fines de semana ( $p < 0,0001$ ).

En un estudio realizado por Rojas (36) en el 2011, en Bogotá, se realizaron mediciones de  $PM_{10}$  en dos sitios sobre la ciclorruta de una vía congestionada de alto tráfico vehicular. En este estudio también se realizó el cálculo de dosis inhalada y en contraste con otras investigaciones, se usaron encuestas a los ciclistas para establecer un valor más aproximado de la población que transita por esta ruta. Se calcularon las dosis medias diarias inhaladas de  $PM_{10}$  para diferentes modos de esfuerzos, ligero y medio. Los ciclistas con un esfuerzo alto podrían inhalar una dosis entre 45% y 64% mayor de  $PM_{10}$  que con un esfuerzo bajo (36). Este estudio eviden-

cia la importancia de la intensidad del ejercicio durante el desplazamiento de los ciclistas urbanos.

### Zonas de mayor exposición

En el estudio realizado por Berghmans (21) se evidenció que el uso de una videocámara y georreferenciación detallada de las ciclorrutas pueden ayudar a identificar zonas o actividades de mayor exposición a material particulado, como la aceleración de los vehículos en los semáforos para PUF o pasar por construcciones para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Así como también la identificación de patrones de comportamiento temporal de los contaminantes, en donde se encontró que los niveles de UFP en la mañana fueron casi dos veces más altos en comparación con la tarde, debido a la mayor actividad vehicular durante las horas pico de la mañana.

De igual forma, Boogaard (37) en un estudio realizado en 11 ciudades de Holanda, evidenció que durante el uso de bicicleta hay variables que afectan de manera aguda la concentración de algunos contaminantes y se relacionan principalmente con el tráfico vehicular, por ejemplo el paso de una motocicleta llegó a aumentar las concentraciones de PUF y  $PM_{2.5}$ , en 58,4% y 5,9% respectivamente. Así mismo, un estudio realizado por Zuurbier (38) evidencia que los picos de contaminación están relacionados con el paso de algunos tipos de vehículos en específico como motocicletas, camiones y buses, esto únicamente para PUF.

### Contaminación Vs condiciones ambientales

Thai (39) realizó un estudio en Vancouver, Canadá, donde seleccionó una única ruta con amplia variedad de microambientes que van desde barrios residenciales hasta vías arteriales principales y construcciones. Además de encontrar en zonas de alto tráfico concentraciones elevadas de PUF y en zonas de construcción elevadas concentraciones de  $PM_{10}$ , encontró que tanto para  $PM_3$ , material particulado con diámetro aerodinámico inferior a 3 micrómetros, ( $r=0,57$ ) como niveles de partículas ultrafinas ( $r=-0,76$ ) se correlacionaron significativamente con la temperatura del aire. Como  $PM_3$  se forma por coagulación, condensación, combustión y otras reacciones químicas en la atmósfera, una temperatura elevada puede aumentar la velocidad de estos procesos de formación, lo que da como resultado concentraciones de  $PM_3$  más altas (40). La correlación negativa entre las partículas ultrafinas y la temperatura se puede explicar de manera similar. Las temperaturas más altas pueden aumentar las tasas de condensación o coagulación, lo que resulta en una pérdida más rápida de partículas ultrafinas y, por lo tanto, menores concentraciones (41,42). De igual forma, la mejor correlación se presentó entre la velocidad del

viento y PUF ( $r=0,81$ ). Diversos estudios han evidenciado el potencial de las variables climáticas para alterar el destino y transporte de diversos contaminantes como el  $PM_{10}$  (43) y el ozono (44).

### Ciclismo y eventos en salud

Se encontraron tres estudios que analizaron los efectos agudos de la exposición a contaminantes con un enfoque de evaluación de riesgo en la salud de los ciclistas:

Park (45) analizó la respuesta respiratoria aguda de 32 ciclistas de California, Estados Unidos, los cuales realizaron dos recorridos, uno por una vía de alto y otro de bajo flujo vehicular. Antes y después de cada trayecto se realizó una espirometría y durante el recorrido se midieron las concentraciones de PUF, siendo tres veces mayor en el trayecto de alto flujo ( $p<0,0001$ ). Se observaron asociaciones significativas entre los niveles elevados de concentración media de PUF y la función pulmonar disminuida en la capacidad vital forzada y en el volumen respiratorio forzado en el primer segundo ( $p<0,01$ ). Una desventaja del estudio fue que midió solo un contaminante, esto puede ser un problema a la hora de modelar la respuesta respiratoria de los ciclistas, ya que, si bien el efecto puede ser generado por ese contaminante en específico, también se puede producir por un efecto tóxico sinérgico de dos o más contaminantes. De igual forma, como se quieren analizar los efectos agudos tanto respiratorios como cardíacos, es posible incluir valores máximos de exposición a lo largo de los trayectos, además de los valores promedio que es lo que hacen todos los estudios. De igual forma, Strak (46) realizó un estudio similar donde las asociaciones entre la contaminación del aire y la función pulmonar fueron predominantemente negativas, aunque ninguna fue estadísticamente significativa ( $p>0,05$ ).

En otro estudio realizado por Weichenthal (47) con ciclistas sanos evidenció que la exposición a corto plazo a la contaminación del aire relacionada con el tráfico puede contribuir a cambios en la regulación autonómica del corazón en las horas inmediatamente posteriores al ciclismo. En general, estos resultados sugieren una disminución de la modulación parasimpática del corazón.

La contaminación atmosférica juega un papel fundamental en la calidad de vida de las personas, en donde, algunas condiciones o hábitos de vida pueden influir de manera importante en la exposición a estos contaminantes. Este es el caso de los ciclistas urbanos, ya que decisiones en la ruta o en el diseño de las ciclorrutas pueden regular de manera positiva o negativa la calidad del aire que se respira.

La elección de la ruta, la hora y día del trayecto, el esfuerzo realizado puede reducir la exposición a contaminantes, dependiendo el tráfico de cada ciudad, en Europa

generalmente son más contaminadas las horas pico de la mañana en comparación con la tarde (48).

Si bien hay guías que establecen que el uso de bicicleta mejora la salud de los usuarios al hacer mayor actividad física cotidiana (49), esta conclusión es algo apresurada para el contexto latinoamericano, ya que se han realizado con estudios realizados en Europa, Estados Unidos, Australia y Nueva Zelanda (50), donde hay diferencias en la calidad del aire (51), en las vías, en el tipo de vehículos, en el tipo y composición de los combustibles y también en la fisiología de la población, un factor importante en cuanto análisis de riesgo en salud.

De igual forma, es viable considerar que con el tiempo se regule el BC y las PUF para evaluar la calidad del aire en estaciones de tráfico, cerca de vías de alto flujo vehicular, principalmente en las grandes urbes donde el aporte de las fuentes móviles es superior al 70% (52) ♣

**Agradecimientos:** Al Departamento de Toxicología de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, especialmente al grupo de investigación de Toxicología Ambiental y Ocupacional (TOXICAO).

**Conflictos de intereses:** Ninguno.

## REFERENCIAS

1. International Agency for Research on Cancer (IARC)-World Health Organization (WHO). Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths. IARC Sci Publ. 2013;161.
2. Organización Mundial de la Salud (OMS). Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado Sin embargo, cada vez hay más países que toman medidas [Internet]. [cited 2018 Jun 4]. Available from: <http://bit.ly/2Es53o0>.
3. Rojas NY. Material particulado atmosférico y salud. Bogotá: Ediciones Uniandes, Facultad de Ingeniería.; 2005.
4. Mu L, Deng F, Tian L, Li Y, Swanson M, Ying J, et al. Peak expiratory flow, breath rate and blood pressure in adults with changes in particulate matter air pollution during the Beijing Olympics: A panel study. Environ Res [Internet]. 2014;133:4–11.
5. Sýkorová B, Kucbel M, Raclavský K. Composition of airborne particulate matter in the industrial area versus mountain area. Perspect Sci [Internet]. 2016;7:369–72. Available from: <http://bit.ly/2HJc1pi>.
6. Singh S, Tiwari S, Hopke PK, Zhou C, Turner JR, Panicker AS, et al. Ambient black carbon particulate matter in the coal region of Dhanbad, India. Sci Total Environ [Internet]. 2018;615:955–63.
7. Ruckerl R, Hampel R, Breitner S, Cyrus J, Kraus U, Carter J, et al. Associations between ambient air pollution and blood markers of inflammation and coagulation/fibrinolysis in susceptible populations. Environ Int [Internet]. 2014;70:32–49.
8. Nishikawa M, Matsui I, Batdorj D, Jugder D, Mori I, Shimizu A, et al. Chemical composition of urban airborne particulate matter in Ulaanbaatar. Atmos Environ [Internet]. 2011;45(32):5710–5. Available from: <http://bit.ly/2MkGjEL>.
9. Fomba KW, van Pinxteren D, Müller K, Spindler G, Herrmann H. Assessment of trace metal levels in size-resolved particulate matter in the area of Leipzig. Atmos Environ [Internet]. 2018;176(August 2017):60–70. Available from: <http://bit.ly/2Et1OfQ>.

10. Feng Y, Li Y, Cui L. Critical review of condensable particulate matter. *Fuel* [Internet]. 2018;224(February):801–13. Available from: <http://bit.ly/2WqWluO>.
11. Wagner DR, Clark NW. Effects of ambient particulate matter on aerobic exercise performance. *J Exerc Sci Fit* [Internet]. 2018;16(1):12–5. Available from: <http://bit.ly/2VNTayo>.
12. Nieuwenhuijsen MJ, Basagaña X, Dadvand P, Martinez D, Cirach M, Beelen R, et al. Air pollution and human fertility rates. *Environ Int*. 2014;70:19–24.
13. Wu S, Deng F, Hao Y, Wang X, Zheng C, Lv H, et al. Fine particulate matter, temperature, and lung function in healthy adults: Findings from the HVNR study. *Chemosphere* [Internet]. 2014;108:168–74. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.01.032>.
14. Peixoto MS, de Oliveira Galvão MF, Batistuzzo de Medeiros SR. Cell death pathways of particulate matter toxicity. *Chemosphere*. 2017;188:32–48.
15. Franck U, Odeh S, Wiedensohler A, Wehner B, Herbarth O. The effect of particle size on cardiovascular disorders - The smaller the worse. *Sci Total Environ* [Internet]. 2011;409(20):4217–21. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.049>.
16. Matt F, Cole-Hunter T, Donaire-Gonzalez D, Kubesch N, Martínez D, Carrasco-Turigas G, et al. Acute respiratory response to traffic-related air pollution during physical activity performance. *Environ Int* [Internet]. 2016;97:45–55. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.011>.
17. de Nazelle A, Fruin S, Westerdahl D, Martinez D, Ripoll A, Kubesch N, et al. A travel mode comparison of commuters' exposures to air pollutants in Barcelona. *Atmos Environ* [Internet]. 2012;59:151–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.05.013>.
18. Salud OM de la. OMS | ¿Qué se entiende por actividad moderada y actividad vigorosa? WHO [Internet]. 2013 [cited 2017 Nov 21]; Available from: [http://www.who.int/dietphysicalactivity/physical\\_activity\\_intensity/es/](http://www.who.int/dietphysicalactivity/physical_activity_intensity/es/).
19. McCafferty WB. Air Pollution and Athletic Performance. 1981.
20. Rabl A, de Nazelle A. Benefits of shift from car to active transport. *Transp Policy* [Internet]. 2012;19(1):121–31. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.09.008>.
21. Berghmans P, Bleux N, Panis LI, Mishra VK, Torfs R, Van Poppel M. Exposure assessment of a cyclist to PM10 and ultrafine particles. *Sci Total Environ* [Internet]. 2009;407(4):1286–98. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.041>.
22. Pattinson W, Kingham S, Longley I, Salmond J. Potential pollution exposure reductions from small-distance bicycle lane separations. *J Transp Heal* [Internet]. 2015; Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jth.2016.10.002>.
23. MacNaughton P, Melly S, Vallarino J, Adamkiewicz G, Spengler JD. Impact of bicycle route type on exposure to traffic-related air pollution. *Sci Total Environ* [Internet]. 2014;490(2):37–43. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.111>.
24. U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). Black Carbon Research [Internet]. [cited 2018 May 24]. Available from: <https://www.epa.gov/air-research/black-carbon-research>.
25. Zhang L, Guan Y, Leaderer BP, Holford TR. Estimating daily nitrogen dioxide level: Exploring traffic effects. *Ann Appl Stat*. 2013;7(3):1763–77.
26. US EPA O. Technical Data and Reports on Carbon Monoxide Measurements and SIP Status. [cited 2018 May 24]; Available from: <https://www.epa.gov/co-pollution/technical-data-and-reports-carbon-monoxide-measurements-and-sip-status>.
27. M. J.Nieuwenhuijsen & K. Determinants of Personal Exposure to PM2.5, Ultrafine Particle Counts, and CO in a Transport Microenvironment. *Environ Sci Technol*. 2009;43 (13):4737–4743.
28. Luc Int Panisab, Bas de Geusc, Grégory Vandenbulcked, Hanny Willemsa, Bart Degraeuwea, Nico Bleuxa, Vinit Mishraa, Isabelle Thomasd RM. Exposure to particulate matter in traffic: A comparison of cyclists and car passengers. *Atmos Environ*. 2010;44(19):2263–70.
29. Morales Betancourt R, Galvis B, Balachandran S, Ramos-Bonilla JP, Sarmiento OL, Gallo-Murcia SM, et al. Exposure to fine particulate, black carbon, and particle number concentration in transportation microenvironments. *Atmos Environ* [Internet]. 2017;157(1):135–45. Available from: <http://bit.ly/2JCHgWs>.
30. Suárez L, Mesías S, Iglesias V, Silva C, Cáceres DD, Ruiz-Rudolph P. Personal exposure to particulate matter in commuters using different transport modes (bus, bicycle, car and subway) in an assigned route in downtown Santiago, Chile. *Environ Sci Process Impacts* [Internet]. 2014;16(6):1309–17. Available from: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C3EM00648D>.
31. Kingham S, Longley I, Salmond J, Pattinson W, Shrestha K. Variations in exposure to traffic pollution while travelling by different modes in a low density, less congested city. *Environ Pollut* [Internet]. 2013;181:211–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2013.06.030>
32. FundéuBBVA. hora pico/hora punta | Fundéu BBVA [Internet]. 2011 [cited 2018 May 24]. Available from: <http://bit.ly/2WkYwfb>
33. Chertok M, Voukelatos A. Comparison of air pollution exposure for five commuting modes in Sydney-car, train, bus, bicycle and walking. *Heal Promot J* [Internet]. 2004;15(1):63–7. Available from: [http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/latest\\_classif.php](http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/latest_classif.php).
34. Okokon EO, Yli-Tuomi T, Turunen AW, Taimisto P, Pennanen A, Vouitsis I, et al. Particulates and noise exposure during bicycle, bus and car commuting: A study in three European cities. *Environ Res* [Internet]. 2017;154(September 2016):181–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2016.12.012>.
35. Franco JF. Urban Air Pollution in Bogota , Colombia : an Environmental Justice Perspective Urban Air Pollution in Bogota , Colombia : an Environmental Justice Perspective. 2016;(June 2012).
36. Fajardo OA, Rojas NY. Particulate matter exposure of bicycle path users in a high-altitude city. *Atmos Environ*. 2012;46:675–9.
37. Boogaard H, Borgman F, Kamminga J, Hoek G. Exposure to ultrafine and fine particles and noise during cycling and driving in 11 Dutch cities. *Atmos Environ* [Internet]. 2009;43(27):4234–42. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.05.035>.
38. Zuurbier M, Hoek G, Oldenwening M, Lenters V, Meliefste K, van den Hazel P, et al. Commuters' exposure to particulate matter air pollution is affected by mode of transport, fuel type, and route. *Environ Health Perspect*. 2010; 118(6):783–9.
39. Thai A, McKendry I, Brauer M. Particulate matter exposure along designated bicycle routes in Vancouver, British Columbia. *Sci Total Environ*. 2008;405(1–3):26–35.
40. H.S. Adams, M.J. Nieuwenhuijsen RNC. Determinants of fine particle (PM2.5) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK. *Atmos Environ* [Internet]. 2001; 35:4557–66. Available from: <http://bit.ly/2we1xZQ>.
41. Vinzents PS, Møller P, Sørensen M, Knudsen LE, Hertel O, Jensen FP, et al. Personal exposure to ultrafine particles and oxidative DNA damage. *Environ Health Perspect*. 2005;113(11):1485–90.
42. Kittelson DB, Watts WF, Johnson JP. Nanoparticle emissions on Minnesota highways. *Atmos Environ*. 2004;38(1):9–19.
43. Montoya-Rendon M, Zapata-Saldarriaga P, Correa-Ochoa M. Contaminación ambiental por PM10 dentro y fuera del domicilio y capacidad respiratoria en Puerto Nare, Colombia. *Rev. Salud Pública (Bogotá)*. [Internet]. 2013;15(1):103–15. Available from: <http://bit.ly/2JAFgxU>.
44. Zlatev Z, Georgiev K, Dimov I. Influence of climatic changes on pollution levels in the Balkan Peninsula. *Comput Math with Appl* [Internet]. 2013;65(3):544–62. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.camwa.2012.07.006>
45. Park HY, Gilbreath S, Barakatt E. Respiratory outcomes of ultrafine particulate matter (UFP) as a surrogate measure of near-roadway exposures among bicyclists. *Environ Heal A Glob Access Sci Source* [Internet]. 2017;16(1):1–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1186/s12940-017-0212-x>.

46. Strak M, Boogaard H, Meliefste K, Oldenwening M, Zuurbier M, Brunekreef B, et al. Respiratory health effects of ultrafine and fine particle exposure in cyclists. *Occup Environ Med*. 2010;67(2):118–24.
47. Weichenthal S, Kulka R, Dubeau A, Martin C, Wang D, Dales R. Traffic-related air pollution and acute changes in heart rate variability and respiratory function in urban cyclists. *Environ Health Perspect*. 2011;119(10):1373–8.
48. Chaney RA, Sloan CD, Cooper VC, Robinson DR, Hendrickson NR, McCord TA, et al. Personal exposure to fine particulate air pollution while commuting: An examination of six transport modes on an urban arterial roadway. *PLoS One*. 2017;12(11):1–15.
49. Ministerio de Transporte. Guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas. 2016. 33 p.
50. Mueller N, Rojas-Rueda D, Cole-Hunter T, de Nazelle A, Dons E, Gerike R, et al. Health impact assessment of active transportation: A systematic review. *Prev Med (Baltim)* [Internet]. 2015;76:103–14. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ypmed.2015.04.010>
51. Organización Mundial de la Salud (OMS). OMS | Los efectos sobre la salud-Departamento de Salud Pública, Medio Ambiente y Determinantes Sociales de la Salud [Internet]. WHO. OMS; 2014 [cited 2018 May 24]. Available from: <http://bit.ly/2EunIPW>.