



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN PRODUCTO DEL TRÁFICO
VEHICULAR SOBRE LOS NIVELES DE CARBOXIHEMOGLOBINA Y
LA RESPUESTA RESPIRATORIA EN CICLISTAS URBANOS DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA–SEDE BOGOTÁ**

Óscar David Díaz Fonseca

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Medicina, Departamento de Toxicología
Bogotá, Colombia

2021

**IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN PRODUCTO DEL TRÁFICO
VEHICULAR SOBRE LOS NIVELES DE CARBOXIHEMOGLOBINA Y LA
RESPUESTA RESPIRATORIA EN BICIUSUARIOS DE LA UNIVERSIDAD
NACIONAL DE COLOMBIA–SEDE BOGOTÁ**

Óscar David Díaz Fonseca

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Toxicología

Directora:

MSc. MD. Alba Isabel Rodríguez Pulido

Codirector:

PhD. IQ. Néstor Yezid Rojas Roa

Líneas de investigación:

Contaminación ambiental por Material Particulado, Toxicología del Monóxido de Carbono, Efectos adversos en la salud por exposición ocupacional y ambiental a sustancias químicas e Identificación de biomarcadores en población humana expuesta a sustancias químicas.

Grupo de Investigación:

Toxicología ambiental y ocupacional – TOXICAO

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Medicina, Departamento de Toxicología

Bogotá, Colombia

Tienes que saltar del precipicio y construir tus alas en el camino.

Ray Bradbury

Agradecimientos

Primero agradecer a Dios por cada oportunidad y enseñanza que deja en mi camino.

A cada una de las personas que participaron en calidad de voluntarios en el proyecto.

A mi abuela María Lucila Ballesteros por sacar adelante una linda y unida familia, y además, por enseñarnos que la familia y el estudio es lo más importante. Gracias abuelita, todo lo que somos es gracias a ti.

A mi esposa Lorena, mi hijo Thiago, mi madre María I. y mi tía Cristina, por su gran apoyo, amor y comprensión durante este proceso. A mis directores de tesis por sus enseñanzas, acompañamiento y dedicación, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo de este proyecto. A toda mi familia y amigos que contribuyeron en mi desarrollo profesional y personal.

A la Universidad Nacional de Colombia por acogerme, guiarme y brindarme las herramientas para el desarrollo de este proyecto, así como la financiación del mismo por parte de la Vicerrectoría de Investigación, la Dirección de Investigación de la Sede Bogotá y la Facultad de Medicina.

A la Secretaría Distrital de Salud por el apoyo en el monitoreo de calidad del aire y la ejecución de las espirometrías, aspectos fundamentales en el desarrollo del proyecto, en especial a Felipe, Pedro, Johana, Whendy, Freddy, Roger, Jhon Jairo y Ana Gálvez, por el apoyo operativo y logístico.

A Alejandra S., Manuela H. y Camilo J., por su disposición y apoyo incondicional durante el trabajo de campo, sin ustedes este proyecto no habría sido posible.

A Cristian y Sebastian Segura por el apoyo en la grabación del aforo vehicular.

A Sofía Villa y Nancy Patiño por su apoyo en el análisis de las muestras de Carboxihemoglobina.

A Camilo Bernal de Gesoltec por el préstamo sin recelo del Equipo de monitoreo de partículas ultrafinas.

Resumen

La contaminación del aire es considerada una temática de interés a nivel mundial con importantes repercusiones en toxicología y salud pública, dado que existe un alto riesgo de incrementar la carga de intoxicaciones y de morbilidad en diversas poblaciones por la exposición a corto, mediano y largo plazo. El uso de la bicicleta como medio de transporte ha aumentado en Colombia, al igual que el número de vehículos automotores y con ello la congestión vehicular. Una de las consecuencias negativas de esto, es el aumento en la exposición de los *biciusuarios* a altas concentraciones de diversos contaminantes del aire.

En el presente estudio de casos cruzados realizado en 37 voluntarios, biciusuarios, tanto hombres como mujeres, de la Universidad Nacional de Colombia–sede Bogotá, se evaluaron los cambios en los niveles de carboxihemoglobina (COHb) y la espirometría, en dos escenarios de exposición a contaminantes atmosféricos, condicionados por la presencia de la contaminación producto del tráfico vehicular en una *ciclorruta* adyacente a la Universidad y paralela a una vía de alto flujo vehicular en la ciudad de Bogotá: la Avenida Carrera 30 o Avenida Norte-Quito-Sur (NQS). Durante cada trayecto, se determinó el aforo y la velocidad vehicular en dos puntos sobre la Avenida NQS, con el fin de explorar las posibles asociaciones entre estas variables y las condiciones de exposición a contaminantes mediante monitoreo personal.

Se obtuvieron diferencias significativas entre los recorridos de alta y baja exposición para las concentraciones de Partículas Ultrafinas (PUF), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO₂) y Dióxido de Azufre (SO₂), e igualmente entre las Dosis de Exposición Estimadas (DEE) de PUF, CO, y SO₂. Por otra parte, se encontró una buena correlación entre la DEE de CO y el porcentaje de cambio de COHb antes y después del recorrido ($r=0.7571$). Se logró establecer el impacto de las variables de actividad vehicular, meteorológicas y de contaminación de fondo, sobre la exposición a los contaminantes monitoreados. Para las PUF en el escenario de alta exposición, se encontró un mayor peso de la contaminación de fondo, seguido por el de las variables meteorológicas y, por último, el de las fuentes de emisión paralela al recorrido objeto de estudio. Para Black Carbon (BC) en el escenario de baja exposición, se encontró un mayor aporte de las

X IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN PRODUCTO DEL TRÁFICO VEHICULAR
SOBRE LOS NIVELES DE CARBOXIHEMOGLOBINA Y LA RESPUESTA
RESPIRATORIA EN BICIUSUARIOS URBANOS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL
DE COLOMBIA-SEDE BOGOTÁ

fuentes de emisión paralelo al recorrido, seguido por las variables meteorológicas y las concentraciones de fondo. Para explicar la variabilidad de los parámetros respiratorios, el único modelo estadísticamente significativo fue para el Flujo Respiratorio Máximo entre el 25% y el 75% de la Maniobra de Espiración Forzada (*MMEF*₂₅₋₇₅) teniendo como variables explicativas del modelo la DEE de CO y el tamaño promedio de PUF. En conclusión, en el escenario de alta exposición, los biciusuarios estuvieron expuestos a concentraciones de contaminantes mayores que en el escenario de exposición bajo, a excepción del contaminante BC, para el cual no se encontró diferencia significativa. Los voluntarios inhalieron más contaminantes en el escenario de alta exposición, en promedio 83% más PUF. La DEE de NO₂ en promedio fue 1.3 veces mayor y para SO₂ fue 3 veces mayor con respecto al recorrido de baja exposición. El cambio en los niveles de COHb, antes y después de recorrido, se correlacionó mejor con la DEE de CO que con la concentración promedio de CO. Los biciusuarios se expusieron a altos niveles de contaminantes del aire en el nivel de exposición alto comparado con el nivel bajo. Del mismo modo, es preocupante los alto niveles COHb con los cuales algunos voluntarios llegaron al campus, los cuales serían los niveles a los cuales los biciusuarios llegan a desarrollar actividades académicas y/ laborales.

Palabras clave: contaminantes atmosféricos, contaminación del aire, biciusuarios, dosis inhalada, exposición a contaminantes

Abstract

Air pollution is considered a topic of global interest with important repercussions on toxicology and public health since there is a high risk of increasing the burden of poisoning and morbidity in various populations, due to short, medium and long exposure term. The use of bicycles as a means of transport has increased in Colombia, as has the number of motor vehicles and with it, traffic congestion. One of the negative consequences of this is the increased exposure of bicycle users to high concentrations of various air pollutants.

In the present cross-case study carried out in 37 urban cycling volunteers from the Universidad Nacional de Colombia – Bogotá, the changes in carboxyhemoglobin (COHb) levels and spirometry were evaluated, in two exposure scenarios to atmospheric pollutants, conditioned by the presence of pollution caused by vehicular traffic in a bicycle lane adjacent to the University and parallel to a high traffic flow road in the city of Bogotá: Avenida Carrera 30 or Avenida Norte-Quito-Sur (NQS). During each journey, the vehicle capacity and speed were determined at two points on NQS Avenue, in order to explore the possible associations between these variables and the exposure conditions in real time for each pollutant.

Significant differences were obtained between the high and low exposure routes for the concentrations of Ultrafine Particles (PUF), Carbon Monoxide (CO), Nitrogen Dioxide (NO₂) and Sulfur Dioxide (SO₂), and also between the Exposure Doses Estimated (DEE) of PUF, CO, and SO₂. A good correlation was found between the CO DEE and the COHb percentage change before and after the run ($r = 0.7571$). It was possible to establish the impact of the vehicle activity, meteorological and pollution variables on the exposure to the monitored pollutants. For the PUF the high exposure scenario, a greater weight of background pollution was found, followed by that of meteorological variables and, lastly, that of emission sources parallel to the route under study. For BC in the low exposure scenario, a greater contribution from emission sources was found parallel to the route, followed by meteorological variables and background concentrations. To explain the variability of the respiratory parameters, the only statistically significant model was for the Maximum Respiratory Flow between 25% and 75% of the Forced Expiration Maneuver (MMEF25-75) having as explanatory variables of the model the DEE of CO and the average

size of PUF. It was observed that the cyclists arrived at the university with high levels of COHb. In conclusion, in the high exposure scenario, cyclists were exposed to higher concentrations of pollutants than in the low exposure scenario, except for the pollutant Black Carbon, for which no statistically significant difference was found. The volunteers inhaled more pollutants in the high exposure scenario, on average 83% more PUF. The DEE of NO₂ on average was 2 times higher and for SO₂ it was 4 times higher with respect to the low exposure path. The change in COHb levels, before and after the run, correlated better with the DEE of CO than with the average concentration of CO.

Keywords: air pollutants, air pollution, bicyclists, inhaled dose, exposure to pollutants

Contenido

	Pág.
Tabla de contenido	
Resumen	IX
Abstract	XI
Contenido	XIII
2.1. Lista de figuras	XV
2.2. Lista de gráficas	XVI
2.3. Lista de tablas	XVII
2.4. Lista de abreviaturas	XVIII
Planteamiento del problema	1
Justificación	5
Antecedentes y estado del arte	7
Objetivos	15
Objetivo Principal	15
Objetivos específicos	15
1. Marco conceptual	15
2. Metodología	31
2.1. Tipo de estudio	31
2.2. Población de estudio	31
2.3. Tamaño de muestra	31
2.4. Criterios de selección	33
2.4.1. Criterios de inclusión	34
2.4.2. Criterios de exclusión	34
2.5. Consideraciones Éticas	34
2.6. Grupo de investigación	36
2.7. Instrumentos y equipos	37
2.8. Desarrollo del trabajo de campo.	38

2.8.1. Convocatoria de voluntarios.....	38
2.8.2. Procedimiento selección de voluntarios.....	39
2.9. Recorridos.....	39
2.10. Campaña de monitoreo	41
2.11. Espirometría.....	42
2.12. Equipos de monitoreo ambiental.....	43
2.13. Cálculo de Dosis de Exposición Estimada (DEE).....	44
2.14. Caracterización del tráfico	47
2.14.1. Determinación del aforo vehicular.....	47
2.14.2. Determinación del aforo discriminado	48
2.14.3. Determinación de la velocidad promedio	48
2.15. Procesamiento de datos y análisis estadístico	49
3. Resultados y análisis.....	55
4. Conclusiones y recomendaciones	95
4.1. Conclusiones	95
4.2. Recomendaciones	99
5. Limitaciones.....	101

2.1. Lista de figuras

Figura 1-1: Gráfica del Flujo Espiratorio Máximo (72).....	30
Figura 2.9-1: Recorrido de exposición a contaminantes atmosféricos en biciusuarios en Bogotá D.C. año 2019.....	40
Figura 2.9-2 y Figura 2.9-3: Punto de retorno del biciusuario en la Av. Carrera 30 con Calle 89ª, año 2019.....	40
Figura 2.10-1: Toma de muestra de sangre por punción venosa antes del recorrido a biciusuario, año 2019, Universidad Nacional de Colombia	42
Figura 2.11-1 y Figura 2.11-2: Registro fotográfico de la ejecución de la espirometría forzada de los biciusuarios voluntarios del estudio, año 2019, Universidad Nacional de Colombia.....	43
Figura 2.12-1: Disposición de los equipos de monitoreo ambiental en los biciusuarios voluntarios, año 2019, Universidad Nacional de Colombia	44
Figura 2.13-1: Pantallazo del recorrido, resumido, con los datos recolectados por el sensor de frecuencia cardiaca POLAR H10, año 2019.....	46
Figura 2.14-1: Pantallazo del video del aforo vehicular sobre el puente peatonal de la Calle 63, año 2019	48
Figura 2.15-1: Ubicación de la estación de monitoreo de calidad del aire en el Centro de Alto Rendimiento.....	51
Figura 3.3-1: Gráfica de los resultados individuales de los niveles de COHb antes y después del recorrido de alta exposición	67
Figura 3.3-2: Gráfica de los resultados individuales de los niveles de COHb antes y después del recorrido de baja exposición	68

2.2. Lista de gráficas

Gráfica 3.1-1: Tiempo usando la bicicleta como medio de transporte y días de uso de bicicleta por semana, para los voluntarios que participaron en el estudio, año 2019, Universidad Nacional de Colombia	56
Gráfica 3.1-2: Duración promedio del trayecto desde la casa a la universidad, para los voluntarios que participaron en el estudio, año 2019, Bogotá D.C.	58
Gráfica 3.1-3: Distribución de las facultades a las cuales pertenecen los voluntarios que participaron en el estudio, año 2019, Universidad Nacional de Colombia	59
Gráfica 3.5-1: Gráfica de mínimos cuadrados entre las variables, Dosis de Exposición Estimada (DEE) a CO y el porcentaje de cambio de COHb.	87

2.3. Lista de tablas

Tabla 1-1: Relaciona los niveles de CO en el aire, el porcentaje de COHb en sangre y los signos y síntomas clínicos agudos más frecuentes.....	19
Tabla 1-1: Resumen de la toxicocinética del NO ₂	25
Tabla 1-1: Resumen de la toxicocinética del SO ₂	27
Tabla 2.3-1: Resumen de los resultados del estudio de Nicholson & Case.	32
Tabla 2.13-1: Clasificación de la intensidad del ejercicio a partir de los METs.	47
Tabla 2.15-1: Variables independientes incluidas en los modelos de contaminantes... ..	52
Tabla 3.1-1: Descripción de los bicisuarios que participaron en el estudio.	56
Tabla 3.2-1: Resultados generales de las concentraciones de contaminantes ambientales monitoreados de exposición personal minuto a minuto, para los dos niveles de exposición.	60
Tabla 3.3-1: Resultados individuales de los niveles de COHb monitoreados para los niveles de alta y baja exposición.	65
Tabla 3.4-1: Resultados generales del aforo vehicular para los dos niveles de exposición, discriminado por los puntos de aforo de la Calle 63 y Calle 75, año 2019 ...	77
Tabla 3.5-1: Correlación entre el cambio en los niveles de COHb (porcentaje de cambio de COHb y Delta de COHb) y la exposición a CO (Dosis de Exposición Estimada (DEE) de CO y Concentración promedio de CO).	86

2.4. Lista de abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>ATS/ERS</i>	AMERICAN THORACIC SOCIETY/EUROPEAN RESPIRATORY SOCIETY
<i>BC</i>	Black Carbon (Carbono Negro)
<i>CO</i>	Monóxido de Carbono
<i>DEE</i>	Dosis de Exposición Estimada
<i>eBC</i>	Equivalent Black Carbon (Carbono Negro Equivalente)
<i>FEM</i>	Flujo Espiratorio Máximo
<i>LDSA</i>	Lung Deposited Surface Area (Área de Superficie de las Partículas deposita en Pulmón)
<i>MET</i>	The Metabolic Equivalent of Task (Equivalente Metabólico de la Tarea)
<i>MMEF25-75</i>	Flujo Respiratorio Medio entre el 25% y el 75% de la Maniobra de Espiración Forzada
<i>NO₂</i>	Nitrogen Dioxide (Dióxido de nitrógeno)
<i>Ppm</i>	Partes por Millón
<i>PM₁</i>	Particulate Matter with a diameter less than 1 micrometer (Material Particulado interior a 1 micrómetro)
<i>PM_{2.5}</i>	Particulate Matter with a diameter less than 2.5 micrometres (Material Particulado interior a 2.5 micrómetros)
<i>PM₁₀</i>	Particulate Matter with a diameter less than 10 micrometres (Material Particulado interior a 10 micrómetros)
<i>SO₂</i>	Sulfur Dioxide (Dióxido de Azufre)

Abreviatura	Término
<i>TRAP</i>	Traffic-Related Air Pollution (Contaminación del aire relacionada con el tráfico)
<i>CVF</i>	Capacidad Vital Forzada
<i>VEF₁</i>	Volumen Espiratorio Forzado en el primer segundo

Planteamiento del problema

En las principales urbes europeas, el cambio de un medio de transporte pasivo a uno activo, como caminar o usar la bicicleta, ha sido exitoso gracias a la manifestación de sus beneficios, logrando así incentivar su uso como medio de transporte urbano e inclusive la incursión a ciudades amigables con la bicicleta como Ámsterdam (Países bajos), Copenhague (Dinamarca), Berlin (Alemania) (1), entre otras . Del mismo modo, la bicicleta se ha impuesto como la mejor opción de transporte en más de 100 ciudades del mundo, por ser una opción de movilidad ecológica y más aún en medio de la pandemia pues se puede asegurar la distancia físico (2) .

En Bogotá, el uso de bicicleta como medio de transporte se ha incrementado sustancialmente. Hace 15 años entre el 1% y el 2% de los viajes totales se hacían en bicicleta; para el 2015 su participación ya estaba por encima del 5%, con 846727 viajes diarios y para el año 2019 esta cifra rondaba los 1.200.000 trayectos diarios, aproximadamente (3). De acuerdo con el Informe de Calidad de Vida del año 2019 realizado por la organización “*Bogotá Cómo Vamos*”, el 8% de los ciudadanos usan la bicicleta todos los días para sus desplazamientos, y de estos, el 83% se sienten satisfechos con este medio de transporte (4). Del mismo modo, la Secretaría Distrital de Movilidad (SDM) manifiesta que para el año 2020, Bogotá cuenta con 635 kilómetros de carriles para usuarios de bicicleta, 551 corresponden a ciclorrutas permanentes y 84 kilómetros a corredores temporales implementados para facilitar la movilidad en bici y descongestionar el Sistema de Transporte Público con el fin de prevenir el contagio del Covid -19 (5). Sin embargo, es motivo de preocupación que Bogotá sea una de las ciudades con el aire más contaminado de Latinoamérica, de las que llevan un monitoreo de la calidad del aire (6) .

Los problemas de contaminación del aire en la ciudad de Bogotá se pueden atribuir a diversos factores: la alta densidad de fuentes fijas y móviles, siendo esta última la de mayor relevancia por el aumento de la flota y la congestión vehicular (7) Por otro lado, la ciudad

cuenta con peculiares condiciones meteorológicas y geográficas, como la altura a 2600 m.s.n.m., la cual influye disminuyendo la eficiencia de la combustión; también se encuentra el fenómeno de inversión térmica, que ocurre con frecuencia, en especial durante el primer trimestre de cada año, y que dificulta la dispersión y el transporte de los contaminantes (8).

En cada trayecto, los biciusuarios se exponen a una gran variedad de contaminantes atmosféricos, principalmente a aquellos que son producto del tráfico vehicular. Así mismo, al estar realizando una actividad física, son más propensos a inhalar mayores cargas contaminantes, puesto que usar la bicicleta es un ejercicio de alta intensidad física (mayor a 6 equivalentes de actividad metabólica (MET), según la Organización Mundial de la Salud (OMS). Por lo tanto, durante esta actividad se aumenta la función respiratoria, particularmente el volumen minuto y la absorción de oxígeno (9,10). Según McCafferty, existen tres razones que explican el aumento del riesgo de exposición a contaminantes del aire en personas que realizan ejercicio aeróbico: primero, un aumento en la ventilación por minuto durante la práctica deportiva, lo que provoca un incremento en la cantidad de contaminantes inhalados; se ha documentado una mayor deposición de Material Particulado como resultado de las altas tasas de ventilación que ocurren durante el ejercicio. En segundo lugar, se inhala un mayor porcentaje de aire por la boca durante el entrenamiento, evitando así parte de la filtración que normalmente tiene lugar en los conductos nasales. Por último, la velocidad del flujo de aire se aumenta durante la actividad física, lo que puede propiciar que los contaminantes alcancen más profundamente el tracto respiratorio (11).

Es evidente que los biciusuarios, al transitar paralelamente a las vías de alto flujo vehicular, están en riesgo de exponerse a concentraciones importantes de contaminantes atmosféricos, más aún si realizan una actividad física de alta intensidad que implique el aumento de la tasa de inhalación de estos contaminantes y, por ende, los posibles efectos adversos sobre el organismo.

Por lo tanto, debido a los altos niveles de contaminantes peligrosos, principalmente los generados por el tráfico vehicular, el biciusuarios podría estar expuesto a concentraciones más altas de contaminantes con respecto a otros medios de transporte (21). Por este

motivo, es fundamental monitorear los ciclistas y los corredores por donde estos transitan, llamados ciclorrutas, y, además de evaluar los efectos a corto plazo en salud usando biomarcadores de exposición y pruebas de función pulmonar como la espirometría.

El biomarcador de exposición a Monóxido de Carbono es la Carboxihemoglobina (COHb), también llamado el asesino silencioso, dado que no es detectable a través de los sentidos, Carece de olor, sabor, color y no irrita los ojos o la nariz. La COHb es gran importancia teniendo en cuenta que la evidencia científica reporta que exposiciones crónicas a CO, pueden presentarse probables efectos en la orientación temporal a partir de 2,5 % de COHb, deterioro en las facultades psicomotrices y alteraciones cardiovasculares, entre el 5 y 10% de COHb (12).

En la Universidad Nacional de Colombia–sede Bogotá ingresan a diario, entre estudiantes, docentes y administrativos, aproximadamente 3000 usuarios y usuarios de bicicleta, de acuerdo con la información suministrada por la oficina de seguridad y vigilancia de la Universidad. Del mismo modo, la comunidad universitaria elige este medio de transporte alternativo por varias razones: por un lado, su eficiencia respecto a los medios de transporte en la ciudad de Bogotá, ya que a determinadas horas del día, la velocidad promedio de un biciusuarios es mayor que la observada para el tránsito de automotores particulares (13). De igual forma, la condición socioeconómica es un factor importante a la hora de elegir la bicicleta como medio de transporte alternativo, considerando que el transporte es una de las principales inversiones económicas que hacen los estudiantes a lo largo de su carrera (14). Este factor llega a ser aún más importante teniendo en cuenta que en la Universidad Nacional el 73,8% de los estudiantes graduados de pregrado pertenecen a los estratos socioeconómicos 2 y 3 (15).

Teniendo en cuenta los posibles efectos en la salud de los biciusuarios por la exposición a estos contaminantes atmosféricos, es necesario no solo evaluar dicha exposición, sino también determinar el impacto que tiene sobre ella el tráfico vehicular. Además, es importante identificar variables para establecer modelos cada vez más eficientes que permitan entender y predecir las concentraciones de estos contaminantes.

La presente investigación tiene tres intereses principales, enfocados en los biciusuarios de la Universidad, quienes a diario y en cada trayecto convergen en la Universidad Nacional de Colombia–sede Bogotá como origen/destino en común:

- 1) Investigar posibles asociaciones entre las variables de actividad vehicular (aforo vehicular discriminado y velocidad promedio) y la exposición a contaminantes atmosféricos.
- 2) Investigar posibles asociaciones entre las dosis inhaladas de contaminantes atmosféricos y los cambios de los parámetros espirométricos, por la exposición a dos escenarios de exposición a contaminantes atmosféricos.
- 3) Investigar posibles asociaciones entre las dosis inhaladas de CO y los cambios de los niveles de carboxihemoglobina en dos escenarios de exposición a contaminantes atmosféricos.

Dados estos antecedentes, se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿cuál es el posible impacto por la exposición a contaminantes del aire producto del tráfico vehicular en una de las principales vías de Bogotá, sobre los niveles de COHb y la función respiratoria, en biciusuarios de la Universidad Nacional de Colombia?

Justificación

Los biciusuarios son una población que se encuentra especialmente propensa a los efectos de la contaminación del aire, ya que se encuentran realizando actividad física a distancias muy cercanas a fuentes de emisión vehicular (10,16). Si bien hay estudios que mencionan que los beneficios de cambiar de un medio de transporte pasivo a uno activo, como la bicicleta (17), hay otros que muestran cómo la bicicleta es un factor de riesgo para la inhalación de mayores cantidades de contaminantes (19).

Por lo tanto, debido a los altos niveles de contaminantes peligrosos, principalmente los generados por el tráfico vehicular, el biciusuario podría estar expuesto a concentraciones más altas de contaminantes con respecto a otros medios de transporte. Por este motivo, es fundamental monitorear los ciclistas y los corredores por donde estos transitan, llamados ciclorrutas, y, además de evaluar los efectos a corto plazo en salud usando biomarcadores de exposición y pruebas de función pulmonar como la espirometría.

El biomarcador de exposición a Monóxido de Carbono es la Carboxihemoglobina (COHb), también llamado el asesino silencioso, dado que no es detectable a través de los sentidos, Carece de olor, sabor, color y no irrita los ojos o la nariz (18). La COHb es gran importancia teniendo en cuenta que la evidencia científica reporta que exposiciones crónicas a CO, pueden presentarse probables efectos en la orientación temporal a partir de 2,5 % de COHb, deterioro en las facultades psicomotrices y alteraciones cardiovasculares, entre el 5 y 10% de COHb (12).

Por otra parte estudios han demostrado que la exposición a corto plazo a diferentes niveles de contaminación del aire, tiene efectos significativos en la función respiratoria medidos por el flujo espiratorio máximo y la frecuencia respiratoria, personas sanas (19). En estudios realizados en usuarios de bicicletas, se encontró asociaciones significativas entre el aumento de los niveles de concentraciones de PUF para la contaminación del tránsito cercano a la carretera y las disminuciones en las mediciones de la función pulmonar (20).

Por otra parte, si bien la investigación realizada por Rabl & de Nazelle, en el año 2012, demostró que los efectos de hacer ejercicio son más benéficos que los efectos adversos que pueda generar la contaminación atmosférica (17), estas conclusiones se hicieron con base en un estudio realizado en Barcelona (España), donde los biciusuarios gozan de una mejor calidad del aire que en Bogotá (Colombia), según el análisis de Morales Betancourt et al. en el año 2017 (10),(21). Lo anterior, planea la necesidad de investigar las condiciones ambientales, en términos de calidad del aire, con las cuales se transportan los biciusuarios de Bogotá e investigar un posible efecto en salud a corto plazo.

Los biciusuarios de la Universidad Nacional de Colombia son una población que se ha mantenido y ha crecido paulatinamente a lo largo de los años. Diariamente ingresan al campus aproximadamente 3000 biciusuarios, de acuerdo con la información suministrada por la oficina de seguridad y vigilancia de la Universidad, provenientes desde diversas ubicaciones de la ciudad de Bogotá, y también fuera de ella (15).

Teniendo en cuenta que los biciusuarios de la Universidad son una población propensa a los efectos de los contaminantes atmosféricos, debido al incremento de la tasa respiratoria relacionado con el tipo de ejercicio que realizan para su desplazamiento y su cercanía a las vías de alto flujo vehicular por donde circulan (22), se hace necesario conocer el comportamiento de los principales contaminantes atmosféricos en las ciclorrutas por las que transitan masivamente, como la Carrera 30, también llamada Avenida Norte Quito Sur (NQS), principalmente en horas de alta congestión y polución, en el llamado periodo de “hora pico”.

Es importante enfocarse en aquellos contaminantes emitidos por el tráfico vehicular, tales como el *Black Carbon* (BC), las Partículas Ultrafinas (PUF), el Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO₂) y Dióxido de Azufre (SO₂), dado que las vías paralelas a las *ciclorrutas* son el escenario perfecto para la generación y acumulación de la contaminación. Además, estos contaminantes se han asociado con varios resultados adversos para la salud, entre otros, aumento del asma, riesgos cardiovasculares, infarto de miocardio, cáncer de pulmón, y aumento de la mortalidad (23). De la misma manera, es primordial identificar qué factores están asociados al aumento de estas

concentraciones, principalmente variables del régimen de tráfico, como la velocidad vehicular promedio y el aforo vehicular discriminado.

Considerando los efectos en la salud humana y las características de los mencionados contaminantes, es necesario ir más allá de un cálculo de dosis inhalada y usar un biomarcador de exposición específico como la carboxihemoglobina, así como también realizar una prueba de función pulmonar, como la espirometría, para poder establecer una medida del impacto de los efectos de estos contaminantes del aire en los expuestos, recalcando que el abordaje que se propone en este estudio, no se ha realizado en nuestro país.

Con base en lo anterior, fue importante llevar a cabo la presente investigación, que permitió explorar los posibles efectos en la COHb y los principales parámetros espirométricos por la exposición a BC, PUF, CO, NO₂ y SO₂ en usuario de bicicleta. El conocimiento generado en este estudio permitirá que las Autoridades Ambientales, de salud y las entidades encargadas de planeación a nivel distrital conozcan el comportamiento de estos contaminantes y los factores asociados a ellos, con el fin de generar herramientas para la toma de decisiones en materia de movilidad.

Antecedentes y estado del arte

Carboxihemoglobina y actividad física

En el año 1983 en Nueva York (Estados Unidos), Nicholson & Case seleccionaron 16 corredores para medir el cambio en los niveles de carboxihemoglobina (COHb) antes y después de correr por media hora en dos lugares diferentes: en una carretera y un parque, definidas de alta y baja exposición a contaminantes, en horas de tráfico pico. Mientras los corredores hacían ejercicio, un grupo de control conformado por 10 sujetos sanos se encontraban en el área de ejercicio de los corredores, sin realizar ningún tipo de actividad física, pero permaneciendo el mismo tiempo que los corredores. Los resultados de este estudio mostraron que la COHb de los corredores aumentó durante el ejercicio en ambos lugares del 1,7% al 5,1% y del 1,3% al 4,2% ($p < 0,001$). Los niveles de COHb también aumentaron en los no corredores, pero en menor grado (de 0,83% a 2,44%, $p < 0,05$). Los datos indican que correr o detenerse cerca del tráfico en un área urbana eleva la COHb a

los niveles encontrados en los fumadores crónicos de cigarrillos. Estos hallazgos cuantifican la exposición potencialmente dañina a los vapores de monóxido de carbono en un entorno urbano. Cabe aclarar que en el estudio se excluyó todo tipo de fumadores (9). En el año 2005 en San Isidro (Perú), Terashima et al., realizaron un estudio en el cual 11 corredores aficionados, no fumadores, sin cardiopatías ni enfermedades respiratorias, corrieron alrededor de un club de golf durante 45 minutos en horario de alto y bajo tránsito vehicular. Se midió la COHb antes y después del ejercicio y durante el trayecto se monitoreó la concentración de CO con un analizador portátil. Los resultados indicaron que en el horario de alto tránsito vehicular se encontró una diferencia estadísticamente significativa de COHb antes y después de hacer ejercicio ($p=0,039$); mientras que en el horario de bajo tránsito vehicular no se encontró diferencia estadísticamente significativa de COHb antes y después de hacer ejercicio ($p=0,722$). Al comparar la variación de COHb de ambos horarios, la diferencia del registro no fue estadísticamente significativa ($p=0,219$). La mediana de la concentración de CO en el aire, en los puntos de monitoreo del recorrido, fue de 0 ppm. Los niveles de COHb no superaron los límites de la producción endógena de COHb ($< 1\%$) en ningún participante (24), lo cual no supone ningún efecto aparente en las personas evaluadas.

Evaluación de la exposición a los contaminantes del aire en biciusuarios

En Christchurch (Nueva Zelanda), un estudio realizado por Pattinson *et al* en el año 2015, se equiparon tres bicicletas con un conjunto de instrumentos idénticos para mediciones ambientales. Las bicicletas se desplazaron continuamente a lo largo de la carretera la primera, la acera de la carretera (a 7 m) la segunda y sobre la ruta todo terreno (a 19 m) la tercera, durante un tiempo de monitoreo de 6 h y 45 min. En dicho estudio, se monitorearon PUF, CO y partículas finas ($PM_{1.0}$). Los resultados destacaron los posibles beneficios de las *ciclorrutas* segregadas definidas como aquellas que se encuentran separadas del tráfico de vehículos, lo que no solo ayuda e informa a los encargados de la planificación de las ciudades, sino que también advierte que separar a los biciusuarios del tráfico vehicular podría ser un factor clave en la reducción de inhalación de contaminantes en los usuarios. Para la ruta sobre la carretera, se obtuvieron concentraciones medianas de PUF cercanas a 40000 pt/cm^3 , CO de 1 ppm y PM_1 cercanas a $5 \mu\text{g/m}^3$. Los resultados permiten concluir que la exposición promedio a PUF y CO fue de aproximadamente 20-

30% ($p < 0.01$) más baja en la acera (a 7 m de la carretera), la ruta que está separada del tráfico de vehículos y 40-50% más baja en la ruta todo terreno (a 19 m), a diferencia de los valores obtenidos sobre la carretera ($p < 0.01$).

Otro importante estudio realizado en Boston (Estados Unidos) por MacNaughton et al. en el año 2014, con la ayuda de una estación móvil de monitoreo de contaminantes producto del tráfico vehicular, midió Black Carbon (BC) y NO_2 a lo largo de cinco rutas de la ciudad. Las rutas examinadas se clasificaron de acuerdo a los siguientes tipos de *ciclorrutas*: *bike paths* o *bicisenderos*, aquellos que están separados del tráfico de vehículos; *bike lanes* o *bicicarriles*, los cuales son adyacentes al tráfico, y *designated bike lanes* o carriles designados para bicicletas, que son carriles compartidos por autobuses y bicisuarios; después de ajustar la densidad del tráfico, la concentración de fondo y la proximidad a las intersecciones, se encontró que los *bicicarriles* tenían concentraciones de BC y NO_2 que eran aproximadamente un 33% más altas que en los *bicisenderos*. La distancia desde las ciclorrutas a la carretera, la presencia de barreras de vegetación y el número de intersecciones (densidad de intersección) que reducen la velocidad de los vehículos, parecen influir en estas variaciones. La variable de tráfico vehicular no fue significativa en este estudio. Lo anterior, sugiere que los bicisuarios pueden reducir su exposición a Contaminación del Aire Relacionada con el Tráfico (*TRAP*, por sus siglas en inglés), durante sus viajes, si hacen uso de los *bicicarriles* preferentemente de los *bicisenderos*, independientemente si existe o no aumento del tráfico cerca de estas rutas (23).

Estudios que miden el cambio en los parámetros de función pulmonar después de la exposición a contaminantes atmosféricos

Un estudio realizado en el 2008 por Mu et al. en Beijing (China), encontró que las variaciones en la exposición a corto plazo al material particulado están asociadas con cambios en la función pulmonar. En el estudio se aprovecharon las variaciones controladas artificialmente en los niveles de contaminación del aire que ocurrieron durante los Juegos Olímpicos de 2008. En la investigación participaron 201 personas, a las cuales se les midió el pico-flujo en tres puntos temporales: antes, durante y después de las olimpiadas. Se excluyeron los participantes con antecedentes médicos de cáncer y enfermedades respiratorias como el asma, además de ser discriminados en función de su estado de

fumador (19). El porcentaje de implicados en el estudio que tuvieron un flujo espiratorio máximo superior a 400 L / min aumentó del 30% en el período preolímpico al 49,4% en la etapa olímpica y disminuyó al 33,4% en la fase postolímpica. Un incremento de los niveles del flujo espiratorio máximo se observó en el 78% de los participantes al comparar los valores durante el período olímpico con los preolímpicos (19). El estudio encontró que la exposición a corto plazo a diferentes niveles de contaminación del aire, tiene efectos significativos en la función respiratoria medidos por el flujo espiratorio máximo y la frecuencia respiratoria (19).

En Beijing (China) Wu *et al.* realizó otra investigación, donde se determinaron 32 componentes químicos del PM_{2.5} y se estudió su asociación con alteraciones en la función pulmonar, en un panel de 21 estudiantes universitarios. Los sujetos de estudio se trasladaron de un área suburbana a un área urbana con niveles y contenidos cambiantes de contaminación del aire en Beijing (China), y realizaron a diario la prueba de FEM en la mañana y en la tarde (matutino/vespertino) y el VEF₁, sobre seis meses, en tres períodos del estudio. Los niveles diarios de contaminantes atmosféricos se controlaron desde una estación central de monitoreo del aire, ubicada a 300 metros de los dormitorios de las escuelas en cada campus; los resultados mostraron reducciones significativas tanto en el FEM vespertino, como en el VEF₁ matutino/vespertino asociados a los diversos componentes del PM_{2.5}, entre los cuales aparecen de manera más consistente en las reducciones de la función pulmonar los siguientes: cobre, cadmio, arsénico y estaño (componentes de PM_{2.5}) ; así mismo, el PM_{2.5} mostró las asociaciones inversas más consistentes en el cambio la función pulmonar (25).

Del mismo modo, Wu *et al.* realizó otra investigación, de manera simultánea, sobre los efectos del PM_{2.5} y la temperatura ambiental sobre la función pulmonar. El estudio se desarrolló en un panel de 21 estudiantes universitarios, los cuales pertenecían a un grupo de reubicación natural de voluntarios sanos o HVNR (Healthy Volunteer Natural Relocation, por sus siglas en inglés). Cada sujeto del estudio utilizó a diario un medidor electrónico para registrar el Flujo Espiratorio Máximo (FEM), y el Volumen Espiratorio Forzado en 1 segundo (VEF₁). El medidor fue usado 2 veces al día durante 6 meses, en 3 períodos, antes y después de mudarse de un área suburbana a un área urbana con cambios en la

concentración de $PM_{2.5}$, y en la temperatura de Beijing. Los efectos de exposición se estimaron utilizando modelos mixtos lineales generalizados que controlan posibles factores de confusión. El estudio encontró que el $PM_{2.5}$ se asoció significativamente con reducciones en el FEM nocturno y con el VEF_1 de la mañana y la tarde, mientras que la temperatura se asoció con significancia estadística con reducciones en FEM matinal y aumentos en el VEF_1 matutino. Estos hallazgos sugieren que la contaminación del aire y la temperatura pueden actuar conjuntamente para causar un deterioro en la función pulmonar incluso en adultos jóvenes y sanos (26).

Para el año 2016, en Barcelona (España) Matt et al., evaluaron los efectos agudos de la exposición a Contaminación del Aire Relacionada con el Tráfico (*TRAP*, por sus siglas en inglés) sobre los resultados de las pruebas respiratorias antes y después de dicha exposición. Los ensayos se hicieron con 30 adultos sanos, donde cada uno de ellos realizó ejercicio en 4 escenarios diferentes de exposición, durante 2 horas. Los escenarios se definieron por la combinación del estado de exposición, entorno de alto y bajo tráfico, y la actividad física (*PA*, por sus siglas en inglés) descanso o ejercicio intermitente. Para evitar un efecto diurno, todos los experimentos y mediciones se programaron a la misma hora durante el día, de 08:00 a 10:00 A.M., lo que se conoce como la "hora punta" del tráfico matutino. Los días de estudio se programaron entre semana, días de mayor tráfico.

Las espirometrías se realizaron en 3 momentos: antes (T_0), inmediatamente después (T_1) y 7 horas más tarde de la exposición (T_2). En casi todos los resultados respiratorios, excepto para el FEM, la exposición alta a TRAP, disminuyó la variabilidad/diferencia entre el estado de reposo y el de *PA*. No hubo disparidades consistentes con respecto a los resultados respiratorios durante el segundo punto de tiempo (T_2). El estudio demostró que las personas sanas experimentan un aumento significativo a corto plazo en la función de las vías respiratorias superiores durante varias horas después de realizar actividad física, incluso en entornos altamente contaminados. Sin embargo, la exposición alta a TRAP, en comparación con la TRAP baja, atenuó los beneficios respiratorios inmediatos de la *AP*, es decir, los individuos experimentaron una caída a corto plazo en la función de las vías respiratorias altas y bajas, independientemente del nivel de actividad física, tras la exposición aguda a altas concentraciones de partículas gruesas de PM (16).

De igual forma, en Pennsylvania (Estados Unidos), un estudio realizado por Rundel et al. en el año 2008 analizó los efectos de la exposición a PUF sobre la función pulmonar. Las pruebas se realizaron antes y después de dos sesiones de ejercicio de 30 minutos, con 4-5 días de diferencia, inhalando concentración de partículas bajas (7382 ± 1727 partículas* cm^{-3}) o altas ($252,290 \pm 77,529$ partículas* cm^{-3}); la investigación se llevó a cabo en 12 hombres no asmáticos, a quienes les realizaron prueba de espirometría. La función pulmonar en reposo normal no cambió después del ejercicio baja exposición de PUF. La disminución de la función pulmonar tras el ejercicio en alta exposición a PUF fue estadísticamente significativa (VEF_1 , $p = .0005$; FEF_{25-75} , $p = .002$). El cambio en el VEF_1 se correlacionó significativamente con el cambio en FEF_{25-75} ($r = .66$, $p = .001$) (27).

Por otra parte, la investigación realizada por Rabl & de Nazelle, en el año 2012, demostró que los efectos de hacer ejercicio son más benéficos que los efectos adversos que pueda generar la contaminación atmosférica (17). Sin embargo, estas conclusiones se hicieron con base en un estudio realizado en Barcelona (España), donde los biciusuarios gozan de una mejor calidad del aire que en Bogotá (Colombia), según el análisis de Morales Betancourt et al. en el año 2017 (10),(21).

Evaluación de la función pulmonar en biciusuarios expuestos a contaminantes atmosféricos

Strak et al. condujeron una investigación, en Utrecht (Países Bajos), de 12 adultos sanos y usuarios de bicicleta, quienes se expusieron a una ruta de baja y alta intensidad de tráfico durante la hora pico de la mañana. La exposición a la contaminación del aire relacionada con el tráfico vehicular se caracterizó por mediciones de PM_{10} , BC y PUF. En el estudio se midieron la función pulmonar (VEF_1 , CVF, FEM), antes, después y 6 horas más tarde del ciclo, el óxido de nitrógeno (NO) exhalado y los síntomas respiratorios. La asociación entre la diferencia después y antes de la exposición en los efectos sobre la salud y la exposición a contaminantes durante el uso de la bicicleta se evaluó con modelos de regresión lineal. El estudio concluyó que hay diferencias significativas en el número de Partículas Ultrafinas y la exposición al hollín entre 2 rutas urbanas de bicicleta. La exposición a PUF y BC, se asoció débilmente con un aumento del NO exhalado, indicativo de inflamación de las vías respiratorias, y disminuciones en la función pulmonar 6 horas después de la exposición. Una limitación del estudio fue el tamaño de muestra relativamente pequeño. (28).

De igual forma, en el 2008, en Sacramento (Estados Unidos), Park, Gilbreath & Barakatt realizaron un estudio donde se reclutaron 32 bicisuarios, los cuales completaron 2 viajes, en 2 días diferentes, en una ruta de alto y bajo tráfico vehicular. La función pulmonar de cada participante se midió antes y después de cada trayecto y la exposición a PUF se calculó durante los trayectos usando un contador de partículas de condensación. El análisis encontró asociaciones significativas entre el aumento de los niveles de concentraciones de PUF para la contaminación del tránsito cercano a la carretera y las disminuciones en las mediciones de la función pulmonar (20).

Estudios realizados en Colombia

En Colombia 3 investigaciones han estudiado la concentración de los principales contaminantes atmosféricos en el ambiente de los bicisuarios. Estudios en los cuales las vías de alto flujo vehicular son las protagonistas.

En el año 2011, en Bogotá (Colombia), Fajardo & Rojas realizaron 29 mediciones de PM_{10} en dos sitios fijos de muestreo mediante impactadores Harvard, en la ciclorruta de la Calle 80, una vía de alto tráfico vehicular. En el estudio se realizaron encuestas a los bicisuarios, con el fin de calcular las dosis medias diarias inhaladas (ADD_c) de PM_{10} para diferentes modos de esfuerzo: ligero y medio, y se compararon con las dosis inhaladas de referencia con una concentración de 25 microgramos/metro cúbico (ADD_r). La relación se estableció como ADD_c/ADD_r , y a modo de conclusión, el estudio estableció la necesidad de construir las *ciclorrutas* en vías secundarias y de bajo tráfico vehicular, así como la realización de estudios que comparasen niveles de exposición de los diferentes modos de transporte, utilizando técnicas personales de medición de contaminantes en tiempo real, junto con registros de Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés); además de determinar los factores de configuración de calles que afectan la velocidad del viento, la dispersión de contaminantes y por lo tanto, la exposición, para que se puedan hacer recomendaciones de política pública (29).

Para el año 2016, nuevamente en la ciudad de Bogotá (Colombia), se realizó un estudio, esta vez a cargo de Morales Betancourt et al., en el cual se calculó la dosis inhalada de Partículas Finas ($PM_{2.5}$), Carbón Negro Equivalente (BC_e) y Partículas Ultrafinas, en modos de transporte activos (caminar y bicicleta), además de pasivos motorizados (bus,

Transmilenio, carro, taxi y motocicleta); es necesario aclarar que las mediciones se realizaron simultáneamente en los modos disponibles en cada segmento de carretera. Así mismo, se exploraron los impactos del modo de viaje, la carga de tráfico y la configuración de la calle, sobre la dosis y la exposición a estos contaminantes, dando como resultado que los viajeros de modos motorizados experimentaron concentraciones de exposición significativamente más altas que los peatones y los biciusuarios ($p < 0.05$); en cambio, estos últimos (los peatones y los usuarios de bicicletas) en una configuración de calle abierta estuvieron expuestos a las concentraciones promedio más bajas de $PM_{2.5}$ y BC_e , es decir, 6 veces más bajas que las percibidas por los viajeros que utilizaron el Transmilenio en el mismo segmento de la calle. La presencia de carriles para bicicletas en las aceras tiene un impacto significativo en la reducción de la concentración de exposición para los biciusuarios, en comparación con aquellos que viajan en carriles de tráfico mixto (21).

El estudio realizado por Franco et al, en el año 2016, se enfocó en monitorear los senderos para bicicletas (*ciclorrhutas*) en la ciudad de Bogotá (Colombia) haciendo uso de una bicicleta equipada para monitorear $PM_{2.5}$ y Black Carbon (BC) durante todos los días de la semana. Las calles estudiadas fueron: Avenida Boyacá, Avenida calle 26, Avenida carrera 19 y Carrera 11. Para BC, la concentración más alta fue para la Av. Boyacá con una concentración aproximada de $50 \mu g \cdot m^{-3}$, para el recorrido entre semana. La concentración más baja fue para la Carrera 11, con una concentración cercana a $25 \mu g \cdot m^{-3}$, para el recorrido el domingo. Para $PM_{2.5}$, la concentración más alta fue para la Calle 26 con una concentración aproximada de $137,5 \mu g \cdot m^{-3}$, para el recorrido entre semana. La concentración más baja fue para la Av. 19, con una concentración cercana a $37,5 \mu g \cdot m^{-3}$, para el recorrido el domingo. El estudio recomienda que, mientras se promueva la bicicleta como un medio de transporte alternativo en Bogotá, es importante reducir los niveles de exposición a la contaminación atmosférica de los biciusuarios. Por otra parte, es recomendable considerar el uso de calles secundarias de bajo nivel de tráfico, para implementar nuevas obras de infraestructura dedicada al uso de la bicicletas, así como barreras físicas en carreteras de tráfico pesado donde se encuentran las rutas ya existentes para su uso (30).

Objetivos

Objetivo Principal

Determinar el posible impacto de la exposición a contaminantes del aire sobre los niveles de carboxihemoglobina y la respuesta respiratoria en biciusuarios de la Universidad Nacional de Colombia-sede Bogotá y la posible asociación con las características del régimen de tráfico de una de las principales vías de la ciudad de Bogotá.

Objetivos específicos

- Evaluar las concentraciones en el aire de CO, PUF, Dióxido de Nitrógeno, Dióxido de Azufre y BC a las que están expuestos los biciusuarios en un trayecto de alto tráfico vehicular.
- Evaluar los cambios en los niveles de carboxihemoglobina en sangre y la espirometría asociados a la actividad de transporte activo a lo largo de una vía de alto tráfico vehicular.
- Establecer la posible asociación de las variables de actividad vehicular con la exposición de los biciusuarios a las concentraciones de CO, PUF, Dióxido de Nitrógeno, Dióxido de Azufre y Carbono Negro.
- Establecer la posible asociación entre la dosis inhalada de CO, PUF, Dióxido de Nitrógeno, Dióxido de Azufre y Carbono Negro y el cambio en los niveles de carboxihemoglobina y la respuesta respiratoria en la espirometría antes y después del trayecto.

1. Marco conceptual

Contaminación atmosférica

Entendida como la presencia en el aire de sustancias y formas de energía que alteran la calidad del mismo, ya sea que implique riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza. De la definición anterior, se desprende que

una sustancia sea considerada contaminante o no, dependiendo de los efectos que produzcan sobre los receptores. Las fuentes de contaminación atmosférica se pueden clasificar en fuentes fijas y móviles, entre ellas las emisiones generadas por el tráfico vehicular (31).

Generalidades contaminantes del aire producto del tráfico vehicular

Los contaminantes del aire producto del tráfico son aquellos generados por la quema de combustible de un vehículo motorizado, el combustible puede ser gasolina, diésel o Gas Natural Vehicular (GNV). Estos contaminantes se han asociado con varios resultados adversos para la salud, entre otros, aumento del asma, riesgos cardiovasculares, infarto de miocardio, cáncer de pulmón, y aumento de la mortalidad (23). Además de ser Gases de Efecto Invernadero como el Dióxido de Carbono (CO₂).

Los principales contaminantes del tráfico son:

- Monóxido de Carbono (CO)
- Dióxido de Carbono (CO₂)
- Óxidos de Nitrógeno (NO_x)
- Dióxido de Azufre (SO₂)
- Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)
- Material Particulado (PM)
- Black Carbon (BC)

Monóxido de carbono

El Monóxido de Carbono (CO) es un gas inodoro e incoloro que se produce por la combustión incompleta de hidrocarburos. De acuerdo con la densidad relativa de su vapor (0,97) es menos denso que el aire en condiciones de temperatura y presión estándar (32). Las mayores fuentes de CO para el aire exterior son los automóviles, camiones y otros vehículos o maquinaria que queman combustibles fósiles (33).

Destino y transporte del CO en el aire:

Cuando se libera CO al medio ambiente, ingresa al aire y permanece en la atmósfera durante un promedio de aproximadamente 2 meses. Finalmente, el CO reacciona con otros compuestos de la atmósfera y se convierte en dióxido de carbono. Los microorganismos que se encuentran en el suelo y el agua también pueden convertir el CO en dióxido de carbono (34). El CO es ligeramente más liviano que el aire (densidad relativa del gas=0,97), por lo cual se espera que ascienda lentamente a través de la atmósfera hasta su dilución en capas superiores de la atmósfera, para posteriormente transformarse en Dióxido de Carbono (35).

Cinética y Mecanismos de daño tóxico por la exposición a CO

El CO después de ingresar por inhalación a través de los pulmones, difunde rápidamente a la sangre, con una vida media de aproximadamente 5 horas en el organismo. En el compartimento vascular, el CO se une a proteínas que contienen el grupo hemo, particularmente citocromo c oxidasa y mioglobina. Igualmente, se liga a la hemoglobina de la sangre, causando hipoxia a través de la formación de COHb como resultado de un cambio estructural que sufre la Hb cuando el CO ocupa uno de los cuatro sitios de que dispone esta molécula para su unión con el oxígeno (efecto *Haldane*), disminuyendo así la cantidad de oxígeno disponible a nivel de los tejidos. El CO se elimina sin cambios por vía pulmonar. La disminución de la COHb depende de la tasa de CO liberado a partir de las hemoproteínas, de la ventilación alveolar, la concentración de oxígeno en el aire inhalado, la duración de la exposición y el nivel de saturación de la COHb. Los órganos más sensibles al daño por el CO son aquellos que tienen alto consumo de oxígeno como el cerebro y el corazón (36).

El CO también genera inflamación al aumentar los niveles de hemo citosólico y la proteína hemo oxigenasa-1, lo que resulta en un aumento del estrés oxidativo intracelular; además, se une a la proteína hemo plaquetaria, causando la liberación de NO. El exceso de NO produce peroxinitrito (ONOO), que a su vez afecta la función mitocondrial y empeora la hipoxia tisular (37).

El CO induce la agregación plaquetaria-neutrófila y la desgranulación de neutrófilos; también, liberación de mieloperoxidasa, proteasas y especies reactivas del oxígeno que contribuyen al estrés oxidativo, peroxidación lipídica y apoptosis. La interacción de

proteasas con xantina deshidrogenasa en células endoteliales forma xantina oxidasa, que inhibe los mecanismos endógenos contra el estrés oxidativo. Además, la hipoxia inducida por CO activa el factor 1a inducible por hipoxia, que puede estimular la regulación génica protectora o nociva dependiendo de la dosis de CO y los factores del huésped (38).

Biomarcador

Los marcadores biológicos o biomarcadores son indicadores de los cambios medibles, ya sean estos bioquímicos, fisiológicos o morfológicos, que se asocian con la exposición a un tóxico (39). Otra definición, nos dice que el término “biomarcador” se utiliza para medir una interacción entre un sistema biológico y un agente de tipo químico, físico o biológico, la cual es evaluada como una respuesta funcional o fisiológica, que ocurre a nivel celular o molecular y además está asociada con la probabilidad del desarrollo de una enfermedad (39). Los biomarcadores son parámetros biológicos que proveen información sobre la presencia de un tóxico en el organismo, informan acerca del estado normal o patológico de un individuo y/o una población, y son utilizados para la comprensión de diferentes enfermedades. Suelen clasificarse en biomarcadores de exposición, efecto y de susceptibilidad. (39)

Biomarcadores de exposición

Sustancia química (generalmente un agente tóxico), o metabolitos que resultan de su biotransformación, y cualquier alteración bioquímica precoz, cuya determinación en los líquidos biológicos, tejidos o aire exhalado permite evaluar la intensidad de exposición o riesgo para la salud (40).

Carboxihemoglobina

El CO es clasificado como un gas asfixiante por la alta afinidad que tiene con la hemoglobina (Hb), entre 200 y 300 veces más afín que el oxígeno y formar una unión reversible CO–Hb llamada carboxihemoglobina (COHb). La COHb es el biomarcador de exposición por excelencia para establecer la exposición a CO. Por lo tanto, los efectos

tóxicos de este agente químico, entre otros, han sido atribuidos a su interacción reversible con la Hb, interacción que genera la hipoxia tisular producida por la incapacidad de la Hb para transportar el oxígeno a los tejidos (37).

Tabla 1-1: Relaciona los niveles de CO en el aire, el porcentaje de COHb en sangre y los signos y síntomas clínicos agudos más frecuentes

CONCENTRACIÓN AMBIENTE DE CO	Niveles sangre COHb %	CUADRO CLÍNICO.
Menos de 35 ppm (cigarrillo)	5-9	Ninguna o cefalea leve
0.005% (50 ppm)	10-19	Cefalea leve, disnea de grandes esfuerzos, vasodilatación cutánea, sabor amargo en mucosa bucal, dolor abdominal, bradipsiquia. Puede haber aumento de leucocitos y leve incremento de lactato en sangre.
0.01%(100ppm)	20-29	Cefalea pulsátil moderada, disnea de moderados esfuerzos, niveles de enzimas cardíacas elevadas en sangre.
0.02% (200ppm)	30-39	Cefalea severa, irritabilidad, fatiga, visión borrosa, dolor torácico, puede haber arritmias cardíacas, rabdomiolisis y alteraciones en la escala de Glasgow. Pueden presentarse signos de isquemia en el EKG, niveles de lactato elevados en sangre.
0.03-0.05%(300-500ppm)	40-49	Cefalea, taquicardia, náuseas, confusión, letargia, colapso, respiración Cheyne-Stokes. Signos de infarto en el EKG.
0.08-0.012% (800-1200ppm)	50-69	Coma, convulsiones, pérdida de conciencia, falla respiratoria y cardíaca. Niveles

		elevados de enzimas cardiacas, acidosis láctica.
0,19%(1900ppm)	70-80	Muerte

Fuente. Tomado de con autorización de los autores (36).

Análisis de Carboxihemoglobina en sangre

El grado de exposición al CO es evaluado mediante la medición del porcentaje de la saturación de COHb en la sangre. Esta medida es relevante para las investigaciones de la intoxicación aguda accidental o deliberada y de la exposición crónica en un lugar de trabajo o el medio ambiente, dado que se trata de un biomarcador específico de exposición y de efecto al mismo tiempo. El grado de exposición a CO se mide por la saturación de Carboxihemoglobina en sangre (41).

Material particulado

El material particulado es una mezcla compleja de partículas sólidas y líquidas de diversos tamaños y composiciones, que incluyen hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), carbono elemental, compuestos de carbono orgánico, metales de transición y componentes reactivos. Se cree que el material particulado, también llamado el cóctel de contaminación del aire, es responsable de muchos efectos adversos para la salud (19).

El material particulado se puede clasificar de acuerdo con el diámetro aerodinámico de la partícula en:

- PTS: partículas totales
- PM₁₀: partículas con diámetro aerodinámico menor de 10 µm
- PM_{2.5}: partículas con diámetro aerodinámico menor de 2.5 µm
- PM₁: partículas con diámetro aerodinámico menor de 1 µm,
- PM_{0.1}: partículas con diámetro aerodinámico menor de 0.1 µm, también se conocen como partículas ultrafinas (PUF)

El PM₁₀ representa la masa de las partículas que entran en el sistema respiratorio, y además incluye tanto las partículas gruesas (de un tamaño comprendido entre 2,5 y 10 µm), como las finas (de menos de 2.5 µm) que se considera contribuyen a los efectos en la salud observados en los entornos urbanos. Las primeras se forman por medio de

procesos mecánicos, como las obras de construcción, la resuspensión del polvo de los caminos y el viento. Las segundas se forman por condensación de metales o compuestos orgánicos que son vaporizados por procesos de combustión a altas temperaturas o por condensación de gases, que son convertidos por medio de diferentes reacciones atmosféricas en sustancias de baja presión de vapor. Lo anterior, se genera principalmente por fuentes de combustión y suelen estar compuestas principalmente por partículas secundarias formadas en la atmósfera a partir de uno o varios precursores gaseosos como el NO_2 , SO_2 , COV , NH_3 , entre otros, mediante procesos químicos o por reacciones en fase líquida (8,36).

En la mayor parte de los entornos urbanos están presentes ambos tipos de partículas, gruesas y finas, pero la proporción correspondiente a cada uno de ellas es probable que varíe de manera sustancial, entre las ciudades del mundo según la geografía, la meteorología y las fuentes específicas de material particulado de cada lugar (42). El combustible diésel que se utiliza extensamente en Colombia en el transporte público constituye una fuente muy importante de partículas finas al ambiente, y el contenido de azufre presente en este combustible es fundamental para determinar el nivel de partículas en las emisiones, ya que mientras mayor sea su contenido, mayor será la formación de estas en el ambiente (36).

Partículas ultrafinas o $\text{PM}_{0.1}$ (PUF)

Si bien, los estudios que determinan la masa de las partículas han sido fundamentales para monitorear la calidad del aire, en los últimos años el interés se ha centrado en cuantificar el número de partículas. El hollín recién emitido podría ser un componente importante de la exposición a partículas para los viajeros, tanto en número como en masa, debido a la proximidad de los viajeros a las fuentes (43). Además, se sabe que las emisiones de los tubos de escape de los vehículos contienen una gran cantidad de PUF. Estas partículas no siempre están bien representadas en las mediciones de partículas en masa tradicionales, pero pueden tener efectos pronunciados en la salud (21).

Las partículas ultrafinas se forman por nucleación, que es la etapa inicial en la que el gas se convierte en unas partículas; dichas partículas pueden crecer hasta alcanzar el tamaño de $1\mu\text{m}$, ya sea por condensación, es decir, cuando otros gases se condensan en ella, y/o

por coagulación, dos o más partículas se combinan para formar una mayor. Las partículas ultrafinas ($PM_{0.1}$) forman parte de la fracción fina ($PM_{2.5}$) (43).

Las partículas ultrafinas se caracterizan por tener un diámetro inferior a 100 nm, y se miden típicamente como concentración de un número de partículas; tales partículas, pueden tener una vida útil corta (menor a 2 días) y, como resultado, una variabilidad espacial que difiere en función de la proximidad a la fuente de emisión. Se ha informado que el tráfico es una de las principales fuentes de PUF y el número de partículas está relacionado con las emisiones de escape de los vehículos nuevos-(44).

Los aerosoles orgánicos primarios son la fracción de masa predominante en las PUF, mientras que los secundarios son predominantes en partículas más grandes como $PM_{2.5}$. Las PUF tienen una vida atmosférica más corta que las partículas finas, así como el transporte a velocidades, y por lo general se distribuyen de forma menos uniforme sobre una ciudad que las partículas finas (45).

Las diferencias en composición, propiedades químicas y tamaño contribuyen a los distintos efectos sobre la salud, con variaciones en el sitio de deposición, absorción dentro del sistema respiratorio, capacidad de inducir inflamación y muerte celular (46).

Destino y transporte ambiental del PUF en el Aire:

La variabilidad de las PUF se puede ver afectada por los procesos de nucleación influenciados principalmente por las altas concentraciones de precursores gaseosos, principalmente el dióxido de azufre y las variables meteorológicas, como la temperatura y la humedad, para formar partículas de mayor diámetro (47). Cabe aclarar que, después de la nucleación, las partículas crecen por condensación en rangos de tamaño más grandes, eventualmente hasta alcanzar diámetros de 100 nm el mismo día (48), principalmente PM_1 , las cuales posteriormente se depositan en la superficie, ya sea por deposición seca o húmeda.

Del mismo modo, las PUF, a diferencia del $PM_{2.5}$ y PM_{10} , presenta datos mucho menos homogéneos y están altamente influenciadas por la cercanía a la fuente de emisión, principalmente el tráfico vehicular (49).

Área de Superficie Depositada en los pulmones (LDSA, por sus siglas en inglés): Producto de la cuantificación simultánea del número de partículas ultrafinas y del diámetro de las mismas. El medidor de partículas ultrafinas determina automáticamente una nueva variable denominada Área de Superficie de las Partículas, también llamado LDSA, el cual permite establecer el área estimada de las partículas que estarían en contacto con las vías respiratorias inferiores, dado que por el diámetro de estas partículas pueden atravesar fácilmente el sistema respiratorio (50).

Mecanismos de daño tóxico por la exposición al material particulado

La contaminación del aire se ha asociado con efectos nocivos para la salud humana. Entre las características más importantes del PM que se encuentran asociadas a su efecto tóxico están la composición química, el tamaño, la ruta de exposición y la dosis inhalada de las partículas (36). La composición del PM varía en el tiempo y el espacio, de acuerdo con la región donde se genere. La presencia de metales de transición, iones, compuestos inorgánicos, minerales, radicales de materiales de carbono, gases reactivos, materiales de origen biológico le atribuyen diferentes efectos tóxicos; igualmente, sustancias de alta solubilidad como el sulfato de amonio, cloruro de sodio, carbón elemental asociado a compuestos orgánicos y metales, elementos traza como cadmio, mercurio y los compuestos provenientes de los tubos de escape de los vehículos que utilizan diésel como combustible como el vanadio, el zinc, hidrocarburos policíclicos aromáticos, mezclas complejas de sulfatos, compuestos de nitrógeno, carbón y metales, están relacionadas con la toxicidad del PM (36). Las partículas pequeñas pueden penetrar profundamente en los pulmones y causar graves problemas (42). Las partículas ultrafinas tienen una mayor acción tóxica por unidad de masa, la reactividad que presentan en su superficie incrementa con la disminución del tamaño de la partícula, con capacidad de generar una gran respuesta inflamatoria intersticial a nivel pulmonar y proagregante a nivel circulatorio, al ser tan pequeñas, se favorece la penetración de estas partículas hasta los sitios más profundos del tracto respiratorio y su depósito altera los mecanismos de limpieza pulmonar que realizan los macrófagos (36).

El contacto continuo a este material particulado fino puede causar daño constante al ADN y aumentar las posibilidades de mutaciones; por lo tanto, la exposición crónica incrementa el riesgo de desarrollar cáncer como resultado de la alteración de los genes que controlan

el crecimiento, la proliferación y la muerte celular. Además, altas concentraciones de material particulado afectan las vías respiratorias, generan radicales libres, promueven el estrés oxidativo e inducen la respuesta inflamatoria aguda y la muerte celular necrótica. Colectivamente, estos efectos pueden conducir a la destrucción de las paredes alveolares y al desarrollo o la exacerbación de los síntomas de las enfermedades pulmonares obstructivas crónicas (EPOC) (51).

El mecanismo de daño tóxico para determinar cómo el material particulado puede influir en la salud y en la función pulmonar pueden darse a nivel local a nivel pulmonar y sistémico a nivel cardiovascular y otros órganos (36). Las investigaciones han sugerido que quizás medien efectos adversos para la salud a través de la generación de especies reactivas de oxígeno, la activación de vías de señalización celular, así como alteraciones de la función de barrera en las vías respiratorias y las defensas antioxidantes, cuales pueden conducir a la activación de inflamación de las vías respiratorias y los cambios en la función pulmonar (36,49).

Dióxido de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno son una mezcla de gases compuestos de nitrógeno y oxígeno. Tanto el monóxido (NO) como el dióxido de nitrógeno (NO₂) constituyen dos de los óxidos de nitrógeno más importantes toxicológicamente; ninguno de los dos es inflamable y son incoloros a pardo en apariencia a temperatura ambiente. El NO es un gas de olor dulce penetrante a temperatura ambiente, mientras que el NO₂ tiene un fuerte olor desagradable. Los óxidos de nitrógeno son liberados al aire desde el escape de vehículos motorizados, la combustión del carbón, petróleo, o gas natural (52).

Destino y transporte ambiental del NO₂ en el Aire:

El NO₂ tiene una densidad relativa 1.58 veces la del aire, es decir, que una vez es emitido al aire ambiente, este permanecerá en las capas inferiores de la atmósfera hasta que sea diluido (53). Posteriormente, la reacción del NO₂ con sustancias químicas producidas por la luz solar lleva a la formación de ácido nítrico, el principal constituyente de la lluvia ácida.

Del mismo modo, el NO_2 reacciona con la luz solar, lo cual lleva a la formación de ozono y smog en el aire (52), constituyendo parte de los contaminantes secundarios de la atmósfera. Además, el NO_2 tiene una vida media aproximada de un día en su camino reactivo hacia la formación de ácido nítrico. Este ácido nítrico es eliminado de la atmósfera por deposición directa en el suelo o transferido a las gotas de agua (nubes o agua de lluvia) que contribuyen directamente a la deposición ácida (54).

Tabla 1-2: Resumen de la Toxicocinética del NO_2

TOXICOCINÉTICA DEL NO_2	
ABSORCIÓN:	El NO_2 ingresa al cuerpo principalmente por inhalación, se absorbe en todos los niveles del tracto respiratorio, pero la mayor dosis se absorbe en la zona de transición de los pulmones, es decir, la unión entre las vías respiratorias (alveoladas) y de conducción (55). La absorción del NO_2 es del 81 al 90% durante la respiración normal y del 90% durante la respiración forzada (56).
DISTRIBUCIÓN:	El NO_2 se hidroliza en ácido nítrico y luego se transforma en iones de nitrito antes de ingresar al torrente sanguíneo. Después de detener la exposición, el nivel en sangre de estos iones disminuye rápidamente (56)
METABOLISMO:	El NO_2 se hidroliza en ácido nítrico y luego se transforma en iones de nitrito antes de ingresar al torrente sanguíneo. Los nitritos reaccionan con la hemoglobina para formar nitrosilhemoglobina, cuyo nivel está relacionado linealmente con la exposición al NO_2 (56).
ELIMINACIÓN:	La mayoría de los nitratos se excretan en la orina por los riñones. (56).
MECANISMOS DE ACCIÓN DEL NO_2	
El NO_2 produce oxidantes ácidos y radicales libres, los cuales causan los siguientes efectos:	
Acido: El NO_2 reacciona con el agua presente en las vías respiratorias para formar ácidos nitroso (NHO_2) y nítrico (NHO_3), los cuales causan daño en las membranas de	

las células epiteliales pulmonares, principalmente los neumocitos tipo I y los neumocitos tipo II (57).

Oxido: Los diversos óxidos de nitrógeno pueden oxidar directamente las membranas celulares del tracto respiratorio, además de generar intermedios de nitrógeno reactivo, o radicales como el peroxinitrito (ONOO), generando cascadas oxidantes que posteriormente dañan las células epiteliales pulmonares (57).

Dióxido de Azufre

Es un gas incoloro de olor penetrante. Bajo presión es líquido y se disuelve fácilmente en agua. No es inflamable. El Dióxido de azufre (SO_2) se genera, principalmente, por actividades asociadas con el uso de combustibles fósiles (carbón, aceite), tal y como ocurre en plantas de energía o de fundición de cobre. El SO_2 es un gas incoloro, 2.26 veces más pesado que el aire, de olor picante, muy irritante y perceptible desde 1.1 ppm, además de ser muy soluble en agua. A temperatura ambiente y en ausencia de humedad, el SO_2 es un gas relativamente estable y poco reactivo. En presencia de humedad o a temperatura inferior a la temperatura de rocío se convierte en un agente muy corrosivo (58).

Destino y transporte ambiental del SO_2 en el Aire:

El SO_2 es un gas incoloro y no inflamable, de olor fuerte e irritante. Su vida media en la atmósfera es corta de unos 2 a 4 días, y casi la mitad de las emisiones vuelven a depositarse en la superficie, mientras que el resto se transforma en iones sulfato (SO_4^{2-}). Se trata de una sustancia reductora, que con el tiempo y en contacto con el aire y la humedad, se convierte en trióxido de azufre. Es soluble en agua, formando una disolución ácida, y aun siendo inestable en estas condiciones, es capaz de formar sales como los sulfitos y bisulfitos. Es un intermediario importante en la producción del ácido sulfúrico, formándose por la combustión de azufre elemental o de sulfuros, para luego ser oxidado a trióxido de azufre (SO_3), que puede ser transformado directamente en ácido sulfúrico (59), implicado en la generación de la lluvia ácida. El SO_2 tiene una densidad relativa de 2.25 veces la del aire, es decir, que una vez es emitido al aire ambiente este permanecerá en las capas inferiores de la atmosfera hasta que sea diluido (60).

Tabla 1-3: Resumen de la Toxicocinética del SO₂

TOXICOCINÉTICA DEL SO₂	
ABSORCIÓN:	El SO ₂ penetra en el organismo por inhalación y es fácilmente absorbido por la mucosa nasal, cerca del 85% del SO ₂ inhalado es absorbido en las vías nasales (61). Este gas, muy soluble en agua, se hidrata rápidamente, se disocia en los iones sulfito y bisulfito y se absorbe en el tracto respiratorio superior. La absorción es función de la concentración. La penetración en el tracto respiratorio inferior es muy baja durante la respiración tranquila por la nariz, aumenta durante la respiración profunda por la boca y cuando aumenta la frecuencia respiratoria, especialmente durante el ejercicio físico (37,62,63).
DISTRIBUCIÓN:	El SO ₂ absorbido pasa a la sangre, donde es distribuido ampliamente en el cuerpo donde se metaboliza (64).
METABOLISMO:	Es metabolizado por el hígado a sulfatos y sulfonatos que se excretan en la orina. La ruta principal es la oxidación a sulfato por la sulfito oxidasa, presente principalmente en el hígado, pero también en otros órganos (riñón, intestino, corazón y pulmón); de esta forma, se incorpora a la reserva corporal de sulfatos. En los seres humanos, los niveles plasmáticos de S-sulfonatos se correlacionan con los niveles atmosféricos de SO ₂ para la exposición a concentraciones que oscilan entre 0,8 y 15,7 mg / m ³ durante 120 h (63).
ELIMINACIÓN:	Los sulfatos formados se eliminan por la orina (61).
MECANISMOS DE ACCIÓN del SO₂	
El SO ₂ provoca irritación de las membranas mucosas, probablemente debido a su facilidad de disolución para formar ácido sulfuroso. La exposición causa broncoconstricción medida como el incremento de la resistencia al flujo de aire o reducción en el volumen respiratorio forzado. La exposición al dióxido de azufre atmosférico da como resultado un broncoespasmo relacionado con la dosis (57).	

Toxicidad Aguda: La exposición a dosis inferiores a 50 ppm provoca irritación de las mucosas: rinitis, laringitis, bronquitis y conjuntivitis (65). Experimentos humanos llevados a cabo en sujetos normales o asmáticos han demostrado que una inhalación breve de SO₂ a una concentración de 5 a 10 ppm puede producir broncoconstricción. En los asmáticos, el efecto broncoconstrictor del SO₂ aumenta con el esfuerzo físico para concentraciones bajas de 0,1 ppm (64).

Toxicidad Crónica: La exposición prolongada (contaminación del aire, exposición ocupacional) aumenta la incidencia de faringitis y bronquitis crónica. Esto puede ir acompañado de deterioro de la función pulmonar en caso de exposición significativa y prolongada (64).

Carbono negro (*Black Carbon*)

Es una forma pura de carbón amorfo y es considerado un Contaminante Climático de Vida Corta (CCVC) generado a partir de descomposición térmica y la combustión incompleta de combustibles fósiles, biocombustibles o biomasa. Se trata de un componente del material particulado fino (PM_{2.5}). El Black Carbon presente en el aire que respiramos, provoca importantes efectos negativos sobre la salud, ya que por su pequeño tamaño estas partículas son inhaladas por el ser humano y pueden afectar directa o indirectamente al sistema pulmonar y los bronquiolos, e incrementar el riesgo de padecer infecciones respiratorias.

Esta sustancia pese a su corta permanencia en la atmósfera, tiene un gran impacto en el cambio climático mediante la absorción de radiación solar la cual vuelve a emitir en forma de calor (66).

Destino y transporte ambiental del BC en el Aire:

Mediante procesos de coagulación, nucleación y condensación, el BC se mezcla con otros contaminantes para formar partículas de mayor diámetro, principalmente PM₁, las cuales posteriormente se depositan en la superficie, ya sea por deposición seca o húmeda (67). Cabe aclarar que, el BC tiene un tiempo de vida media en el aire de 3 a 8 días, aproximadamente (68).

Biomonitoreo

Consiste en medir la concentración de compuestos químicos, sus metabolitos y productos secundarios en tejidos del cuerpo o fluidos, como la sangre, orina, leche materna, pelo y otras muestras, para estimar la dosis total interna recibida por una persona (40).

Dosis

Cantidad de una sustancia por unidad de peso corporal. La dosis interna o carga corporal representa la porción de sustancia por unidad de peso o volumen que ingresa en un organismo (absorción), o se incorpora a los órganos y/o tejidos (40).

Espirometría

La espirometría es una prueba paraclínica (de apoyo diagnóstico) que permite medir varios aspectos de la función respiratoria. Es una de las exploraciones funcionales respiratorias más utilizada. Se lleva a cabo utilizando un espirómetro, dispositivo especial que registra la cantidad de aire que un sujeto inhala o exhala, así como la velocidad a la cual dicho aire es desplazado hacia fuera o dentro del pulmón (61). Los espirogramas son trazos o registros de la información obtenida con la prueba y corresponden a una curva volumen/tiempo, los valores de base utilizados para interpretar la espirometría son la Capacidad Vital Forzada (CVF), el volumen espiratorio máximo en el primer segundo (VEMS) y la relación VEMS/CVF (69). La prueba espirométrica más común requiere que la persona exhale tan fuerte como pueda, después de haber realizado una inspiración profunda. El esfuerzo del paciente se denomina **Maniobra Espiratoria Forzada** (70).

Parámetros espirométricos

Capacidad Vital Forzada (CVF)

La máxima cantidad de aire o volumen total de aire que puede ser exhalado o expulsado de manera forzada después de una inspiración máxima, o la máxima cantidad de aire que el sujeto puede expulsar, tras haber tomado la mayor cantidad de aire posible. La CVF resulta útil para detectar enfermedades restrictivas, ya que, si se obtienen resultados menores que los esperados, puede indicar que el pulmón no se expande de manera

normal. La CVF también puede estar reducida en las enfermedades obstructivas graves (71).

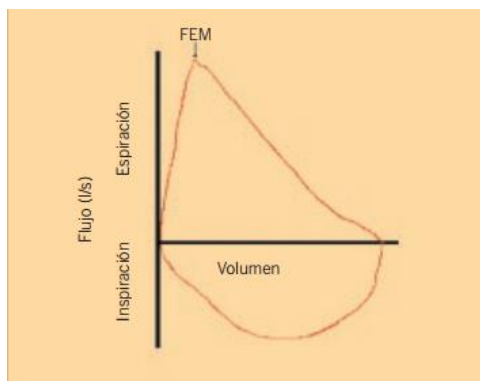
Volumen Espiratorio Forzado en primer segundo (VEF_1)

Es el volumen de aire exhalado durante el primer segundo de la Maniobra Espiratoria Forzada. Se considera el índice espirométrico más representativo de la capacidad ventilatoria global. El VEF_1 es de utilidad para detectar enfermedades obstructivas, ya que una persona con obstrucción de las vías aéreas no será capaz de exhalar tanto aire durante el primer segundo, como si lo hiciese una persona con pulmones normales. El VEF_1 también puede estar disminuido si la persona tiene una enfermedad restrictiva severa (71).

Flujo Espiratorio Máximo (FEM)

También llamado Pico Flujo, equivale al vértice superior de la curva espirométrica, es decir, una curva flujo-volumen (72). Figura 1-1.

Figura 1-1: Gráfica del Flujo Espiratorio Máximo (72).



Fuente: Sociedad Española de Alergología E Inmunología Clínica, Agustín F, L. V. (2013). Pico Flujo Espiratorio Máximo.

Flujo Espiratorio Medio Forzado (FEF_{25%-75%}): flujo medio alcanzado en el tramo de la curva, comprendido entre el 25 y el 75% de la Capacidad Vital Forzada (73).

2. Metodología

2.1. Tipo de estudio

El presente estudio es un diseño observacional de casos cruzados, teniendo en cuenta que los biciusuarios se expusieron de manera corta y transitoria a dos recorridos diferentes influenciados por la presencia de contaminantes del aire (74)

2.2. Población de estudio

Universo: biciusuarios de la ciudad de Bogotá.

Población: biciusuarios de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá. La población estuvo conformada por biciusuarios con vínculo académico o laboral vigente con la Universidad Nacional de Colombia–sede Bogotá, durante la campaña de monitoreo.

Muestra: biciusuarios de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá voluntarios, que manifestaron su interés en participar en el estudio y cumplieron con los criterios de inclusión.

Definición de biciusuario urbano para el estudio: estudiantes, profesores y/o administrativos de la Universidad Nacional de Colombia–Sede Bogotá, que utilicen la bicicleta como medio de transporte para llegar al campus, al menos tres días a la semana. A los biciusuarios seleccionados se les llamó voluntarios.

2.3. Tamaño de muestra

Para el cálculo del tamaño de la muestra, este se determinó según la saturación de COHb reportada antes y de después de cada trayecto. Para esto se tomó como referencia un estudio llevado a cabo en corredores de la ciudad de Nueva York, USA, por Nicholson, J. P., & Case, D. B en 1983, que reportó la media del porcentaje de COHb antes y después de cada recorrido como se muestra en la Tabla 2.3-1 (9).

Tabla 2.3-1: Resumen de los resultados del estudio de Nicholson & Case.

Corredores (n=16)	%COHb en reposo (desviación estándar)	%COHb 30 min después (desviación estándar)
A lo largo de la FDR	1,315 (0,282)	4,175 (0,495)

Fuente: Carboxyhemoglobin Levels in New York City Runners (Nicholson & Case).

Modificada por el autor.

Para el cálculo del tamaño de la muestra, se tuvo en cuenta el coeficiente de variación esperado para los dos estados de exposición, que corresponden a antes y después de realizar la ruta de estudio.

Se espera una variación en los niveles de la COHb en cada individuo, por aspectos tales como metabolismo, talla, peso y estado físico, entre otros factores intrínsecos de cada persona (12).

Por otro lado, la COHb antes de la exposición se puede ver afectada por variables relacionadas con el recorrido desde la casa del voluntario hasta la Universidad, como exposición por la duración del recorrido, la concentración de CO en el recorrido

De acuerdo con lo anterior, y dado que no se contaba en la literatura indexada con estudios específicos para biciusuarios que midieran los porcentajes de COHb en esta población, y luego de realizar una consulta con un experto en epidemiología y bioestadística, se estimó un coeficiente de variación de 2 (200%) para ambos estados de exposición, teniendo en cuenta la alta dispersión de los valores de COHb que se esperaba encontrar en el estudio, como resultado de una importante variabilidad individual que la COHb presenta en cada persona por las diversas variables enunciadas anteriormente (75).

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se aplicó la siguiente ecuación:

Ecuación 2.3-1: Cálculo tamaño de muestra

$$n = \frac{t^2 * ((CV_1 * X_1)^2 + (CV_2 * X_2)^2)}{(X_1 - X_2)^2}$$

Donde:

n: tamaño de muestra

t: nivel de confianza (95% (t=2))

CV₁: coeficiente de variación antes de la exposición

CV₂: coeficiente de variación después de la exposición

X₁: media de la carboxihemoglobina antes de la exposición

X₂: media de carboxihemoglobina después de la exposición

$$n = \frac{(2)^2 * ((2 * 1,33)^2 + (2 * 4,22)^2)}{(4,22 - 1,33)^2}$$

$$n = \frac{4 * ((2,66)^2 + (8,4)^2)}{(2,9)^2}$$

$$n = \frac{4 * (7,08 + 70,6)}{8,41}$$

$$n = 37$$

De acuerdo con lo anterior, el tamaño de la muestra calculado fue de 37 individuos, los cuales se analizaron en la presente investigación.

2.4. Criterios de selección

Para la selección de los biciusuarios que participaron en el estudio se consideraron los siguientes criterios:

2.4.1. Criterios de inclusión

- Estudiantes, docentes y/o personal administrativo de la Universidad Nacional de Colombia–sede Bogotá que utilicen la bicicleta como medio de transporte.
- Usar bicicleta como medio de transporte mínimo 3 veces a la semana.
- Edad entre los 18 a los 60 años.

2.4.2. Criterios de exclusión

- Sufrir de alguna enfermedad crónica como hipertensión arterial, diabetes, enfermedades cardiovasculares, etc.
- Antecedentes de enfermedad pulmonar como enfermedad pulmonar obstructiva crónica, cáncer de pulmón, asma o deformación del tórax.
- Sintomatología respiratoria en el momento de realizar la espirometría: tos o expectoración crónica, disnea o sensación de ahogo.
- Fumadores o exfumadores (mínimo 1 año sin fumar): se excluye todo tipo de fumadores (cigarrillo, tabaco, marihuana, entre otros). Los fumadores tanto pasivos como activos se descartan, ya que el hábito de fumar incrementa los porcentajes de COHb y también está estrechamente asociado con afecciones sobre la función pulmonar (19).
- Uso habitual de protección respiratoria durante el recorrido cotidiano como biciusuario urbano.
- Sujetos con problemas cognitivos o psiquiátricos.

2.5. Consideraciones Éticas

Para el desarrollo de consideraciones éticas del proyecto, se basaron en la norma nacional colombiana, la resolución 8430 del 4 de octubre de 1993, por la cual se establecen las

normas técnicas, científicas y administrativas para la investigación en salud. De acuerdo con el artículo 4, el presente proyecto cumple con dos de las cinco acciones para contribuir al desarrollo de la investigación en salud:

“... ARTÍCULO 4. La investigación para la salud comprende el desarrollo de acciones que contribuyan: a. Al conocimiento de los procesos biológicos y psicológicos en los seres humanos. d. Al conocimiento y evaluación de los efectos nocivos del ambiente en la salud...”

De igual forma, de acuerdo con el artículo 11 de la resolución 8430 del 1993, se puede realizar la siguiente clasificación del riesgo de la investigación de acuerdo con los siguientes procedimientos que se realicen:

- Investigación sin riesgo: Encuestas y recolección de información de los biciusuarios.
- Investigación con riesgo mínimo: Espirometría y extracción de sangre por punción venosa en adultos.

De acuerdo con lo anterior, se considera la probabilidad de que el sujeto de investigación sufra algún daño como consecuencia inmediata o tardía del estudio, la presente investigación se clasificó de acuerdo con el mayor riesgo que se desarrolle dentro del mismo. Por tal motivo la presente investigación se clasificó como riesgo mínimo por la prueba de espirometría y la extracción de sangre por punción venosa, ya que son estudios prospectivos que emplean el registro de datos a través de procedimientos comunes.

Clasificación de los riesgos dentro de la investigación:

Las dos actividades o etapas que requieren consideraciones éticas son las encuestas generales a los biciusuarios de la universidad, la espirometría y la extracción de sangre por punción venosa, siendo estas últimas las de mayores consideraciones éticas.

Toma del consentimiento informado:

Se contactó a los biciusuarios para realizar una encuesta general donde se preguntó, entre otros aspectos, si acepta que la información suministrada sea utilizada con fines académicos para el desarrollo de la presente investigación. De igual manera, para las personas que quisieron participar en el estudio, se realizó una reunión con cada uno de ellos para explicar generalidades del estudio y resolver las respectivas inquietudes, así

como también para que leyeran y firmaran el acta de consentimiento informado, en caso de que así lo deseen (Anexo D).

Del mismo modo, se garantizó que sus datos no podrán ser vistos o utilizados por otras personas ajenas al estudio ni tampoco para propósitos diferentes a los que establece el documento que firma el participante. A los formatos de recolección de la información se les asignó un número de identificación que correspondió con datos recolectados del voluntario y que fue la forma de identificar los datos. Igualmente, ninguno de los datos propios o de identificación de los participantes fue revelado en reportes o en artículos de revista. Lo anterior está contemplado en el consentimiento informado que se entregó a cada participante. Así mismo, el participante tiene la oportunidad de retirarse voluntariamente del estudio (aunque al principio haya dicho que sí) sin que esta decisión repercuta de forma disciplinaria o académica en el vínculo que el participante tenga con la Universidad Nacional de Colombia.

El proyecto fue avalado por el Comité de Ética mediante Acta N.º 012-208-18 del 27 de agosto de 2018. (Anexo A)

2.6. Grupo de investigación

El Grupo de Investigación al cuál es asignado esta tesis es el de Toxicología Ambiental y Ocupacional - TOXICAO, dentro de las líneas de investigación en Toxicología del Monóxido de Carbono, Contaminación ambiental por material particulado e Identificación de biomarcadores en población humana expuesta a sustancias químicas.

La presente investigación se realizó en alianza con el Grupo de Investigación en Calidad del Aire (GICA) de la Facultad de ingeniería y los productos derivados de este proyecto serán compartidos para los dos grupos

2.7. Instrumentos y equipos

Se utilizaron imágenes de divulgación del proyecto en redes sociales y en la página web de la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia (Anexo B).

Formatos:

- Encuesta pre-participativa (Anexo C)
- Consentimiento informado para participar en el estudio (Anexo D)
- Formato de cadena de custodia de las muestras de sangre (Anexo E)
- Formato entrega de resultados a los voluntarios (Anexo F)

Equipos para toma de parámetros biológicos:

- Banda de frecuencia cardiaca marca Polar, referencia H10.
- Espirómetro spiro pro, marca Jaeger.
- Jeringas y frascos tapa lila para la recolección de las muestras de sangre.

En el monitoreo ambiental personal de contaminantes se utilizaron los siguientes equipos:

- Monitor de Partículas Ultrafinas (PUF) DiSCmini, marca Testo: el caudal del equipo es de 1 L/min. El tiempo de resolución del instrumento es 1 segundo y, por lo tanto, se realizaron medias móviles cada 60 segundos. El equipo pesa 0,7 Kg y tiene unas dimensiones de 18 cm x 9,0 cm x 4,25 cm, lo cual lo hace de fácil desplazamiento y no causa molestias a los participantes. Este equipo calcula automáticamente la concentración de PUF y el diámetro de cada partícula y con base en esos dos datos, calcula un parámetro denominado LDSA (Superficie Depositada en los pulmones), el cual se tendrá en cuenta en el análisis de las variables.
- Monitor portátil de gases (CO) RKI Instrument gx-2009: el tiempo base de medición fue de 60 segundos. El método de detección de este equipo es por difusión. El equipo pesa 0,13 Kg y tiene unas dimensiones de 7,0 x 7.5 x 2.5 cm, de fácil desplazamiento y no genera incomodidad a los usuarios.
- Monitor portátil de *Black Carbon* (BC) MICROAETH AE51, marca AETHLABS: es un instrumento de análisis en tiempo real que mide la tasa de cambio en la

absorción de la luz transmitida, gracias a la recolección continua de depósitos de aerosol en el filtro (76). El dispositivo realiza automáticamente la medición a 880 nanómetros (nm) e interpreta el resultado como concentración de *Black carbon* ('BC'). El caudal de equipo se fijó en 100 ml min⁻¹. El tiempo base de medición fue de 60 segundos, el cual reduce el ruido propio del instrumento (77). El dispositivo pesa 0,28 Kg y tiene unas dimensiones de 11.7 x 6.6 x 3.8 cm, lo que hace que sea de fácil desplazamiento y no incomode a los biciusuarios.

- Monitor portátil de gases (NO₂, SO₂ y CO) MultiRAE: el caudal de equipo se fijó en 250 cc min⁻¹. El tiempo base de medición fue de 60 segundos. El dispositivo pesa 0.8 Kg y sus dimensiones son 15 cm x 11.3 x 6.1 cm de profundidad. Este equipo fue el más pesado y grande, sin embargo, no causó molestia a los participantes.

Los equipos de exposición personal que llevaba el biciusuario pesaban 1.91 Kg aproximadamente. En el anexo G se encuentran los respectivos certificados de calibración de los equipos.

2.8. Desarrollo del trabajo de campo.

2.8.1. Convocatoria de voluntarios

Se elaboró una encuesta para realizar un primer acercamiento con los posibles voluntarios, en la que se incluyeron aspectos necesarios para aplicar los criterios de participación en el estudio (Anexo C). De igual forma, la Ingeniera de Sistemas de la Facultad de Medicina habilitó un espacio en la página web, destinado para la Investigación: www.medicina.bogota.unal.edu.co, donde se encontraba una breve descripción del proyecto, el contacto del investigador principal y un enlace de acceso a la encuesta. El enlace de la encuesta y la página del proyecto fueron divulgados junto con una imagen en redes sociales, con acceso mediante un código QR y desde la página web de la facultad se tenía acceso a la página web del proyecto por medio de una imagen (Anexo B).

2.8.2. Procedimiento selección de voluntarios

Un total de 221 individuos que realizaron la encuesta, de los cuales 74 voluntarios cumplieron con los criterios para participar en el estudio. Se contactó a cada uno de los 74 posibles voluntarios y se coordinó una reunión donde se explicó el proyecto. Quienes desearon continuar con el estudio firmaron el consentimiento informado. Posteriormente, se agendó con cada uno de ellos el día y la hora para realizar los recorridos. Si bien, se contactaron los 74 bicisuarios que cumplían los criterios de participación, 37 respondieron positivamente a la citación de la reunión y participaron activamente en el estudio, logrando completar los dos recorridos, realizar la espirometría y la muestra de sangre. Los demás, por diversos motivos, no lograron cumplir estos criterios para ser parte del equipo de voluntarios.

2.9. Recorridos

Cada voluntario participante del estudio realizó los siguientes 2 recorridos:

1. **Recorrido de alta exposición:** trayecto entre semana (lunes a viernes), en hora pico de la mañana (7:00 a 10:00A.M.), ida y vuelta desde la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia–sede Bogotá, sobre la *ciclorruta* de la Carrera 30, desde la Calle 45 hasta la Calle 89a (punto de retorno). El recorrido finalizó en la Facultad de Medicina, y tuvo una distancia aproximada de 14 Kilómetros. Figuras 2.9-1, 2.9-2 y 2.9-3.
2. **Recorrido de baja exposición:** comprende el mismo trayecto de alta exposición, pero se realizó el domingo sin una hora fija, es decir, en la mañana o en la tarde. Inició y finalizó el recorrido en la Facultad de Medicina.

Figura 2.99-1: Recorrido de exposición a contaminantes atmosféricos en biciusuarios en Bogotá D.C. año 2019.



Fuente: Google Earth. Modificada por el autor.

*Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá

Figura 2.99-2 y Figura 2.99-3: Punto de retorno del biciusuario en la Av. Carrera 30 con Calle 89ª, año 2019.



Fuente: Google Earth. Modificada por el autor.

Fuente: el autor.

2.10. Campaña de monitoreo

Para llevar a cabo el recorrido cada voluntario fue citado en la Facultad de Medicina, y posteriormente se condujo al Laboratorio de Toxicología Ambiental y Ocupacional ubicado en la oficina 177 del primer piso de la Facultad. En este espacio, con ayuda de la enfermera se identificaron y registraron los participantes (para ello, se solicitó el documento de identidad y el carnet universitario). Antes de iniciar el trayecto, la enfermera extrajo 4 mililitros de sangre por punción venosa de cada participante, la cual se etiquetó como muestra de sangre A. Como se puede observar en la Figura 2.10-1.

Al finalizar el recorrido, y nuevamente con ayuda de la enfermera, se extrajeron 4 mililitros de sangre por voluntario, la cual se denominó muestra de sangre B. El formato de cadena de custodia de las pruebas se encuentra en el anexo D. Las muestras fueron recogidas en un tubo tapa lila y transportadas al Laboratorio de Toxicología ubicado en el tercer piso de la Facultad, para su almacenamiento a temperatura entre 2 a 8 grados Celsius para su conservación. Mediante espectrofotometría UV/VIS, se determinó la concentración de carboxihemoglobina, a partir de la relación de absorbancias a 540 nanómetros y 55 nanómetros, en el laboratorio de Toxicología de la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia–sede Bogotá.

Figura 2.1010-1: Toma de muestra de sangre por punción venosa antes del recorrido a biciusuario, año 2019, Universidad Nacional de Colombia



Fuente: el autor.

2.11. Espirometría

Para llevar a cabo el procedimiento de Espirometría Forzada, se le solicitó al voluntario tener una espera de 20 minutos en reposo, con el fin de estabilizar su frecuencia respiratoria. En este lapso, cronometrado, se le explicó al participante en qué consistía la prueba, así como las instrucciones a seguir. Una vez realizado el estudio y habiendo obtenido 3 muestras reproducibles, se consideró finalizada esta prueba, según las guías de AMERICAN THORACIC SOCIETY/EUROPEAN RESPIRATORY SOCIETY (ATS/ERS) (78)(ANEXO H).

Las espirometrías fueron tomadas al iniciar y finalizar los trayectos y etiquetadas de la siguiente manera: espirometría A (muestra antes de iniciar el recorrido) y espirometría B

(prueba después de terminar el trayecto), tal y como observa en las Figuras 2.11-1 y 2.11-2.

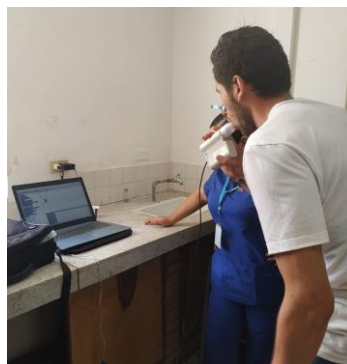
Los valores de base utilizados en el estudio para interpretar la espirometría fueron:

- CVF o capacidad vital forzada
- VEF1 o VEMS: volumen espiratorio máximo en el primer segundo.
- FEM o Flujo Espiratorio Máximo
- MMEF25-75 o Flujo Respiratorio Medio entre el 25% y el 75% de la Maniobra de Espiración Forzada

Figura 2.111-1 y Figura 2.111-2: Registro fotográfico de la ejecución de la espirometría forzada de los bicusuarios voluntarios del estudio, año 2019, Universidad Nacional de Colombia



Fuente: el autor.



Fuente: el autor.

2.12. Equipos de monitoreo ambiental

Una vez finalizada la espirometría, antes de iniciar el recorrido, se equipó a los voluntarios con un chaleco y un morral diseñados para el transporte de los instrumentos de exposición personal, tal y como puede observarse en la Figura 2.12-1. Es necesario aclarar que, debido a la disponibilidad limitada del equipo de monitoreo ambiental, el trayecto se realizó solo una vez.

Figura 2.12-1: Disposición de los equipos de monitoreo ambiental en los biciusuarios voluntarios, año 2019, Universidad Nacional de Colombia



Fuente: el autor.

2.13. Cálculo de Dosis de Exposición Estimada (DEE)

Para el cálculo de Dosis de Exposición Estimada (DEE) para cada contaminante se utilizó la siguiente ecuación (40):

La DEE corresponde a una dosis inhalada, teniendo en cuenta que la ecuación involucra la tasa de inhalación del contaminante en el individuo, el tiempo de exposición y el peso corporal del voluntario.

Ecuación 2.13-1: Cálculo de Dosis de Exposición Estimada (DEE)

$$DEE = \frac{C * TI * TE}{PC}$$

Donde:

C es la Concentración del contaminante en miligramos por metro cúbico (mg/m³).

TI es la Tasa de Inhalación, metros cúbicos por minuto (m³/min).

TE es el Tiempo de Exposición, en minutos (min)

PC es el peso corporal (Kg).

Teniendo en cuenta que, para calcular la dosis inhalada o DEE, la concentración del contaminante debe estar en unidades de mg/m³, a excepción de PUF que se debe reportar en pt/m³, se realizaron las siguientes conversiones de unidades:

Conversión de unidades-PUF:

Unidades: partículas/cm³ (pt/cm³):

$$\frac{pt}{cm^3} * \frac{1000 cm^3}{1 L} \frac{1000 L}{1 m^3} = \frac{pt}{m^3}$$

Conversión de unidades CO, NO₂ y SO₂:

Los gases y vapores como CO, NO₂ y SO₂ se reportan en unidades de partes por millón (ppm) y, por lo tanto, para realizar el cálculo de dosis inhalada se debe hacer la conversión de unidades a µg/m³, para lo cual se utilizó la siguiente ecuación:

Ecuación 2.13-2 Conversión de unidades de ppm a µg m³:

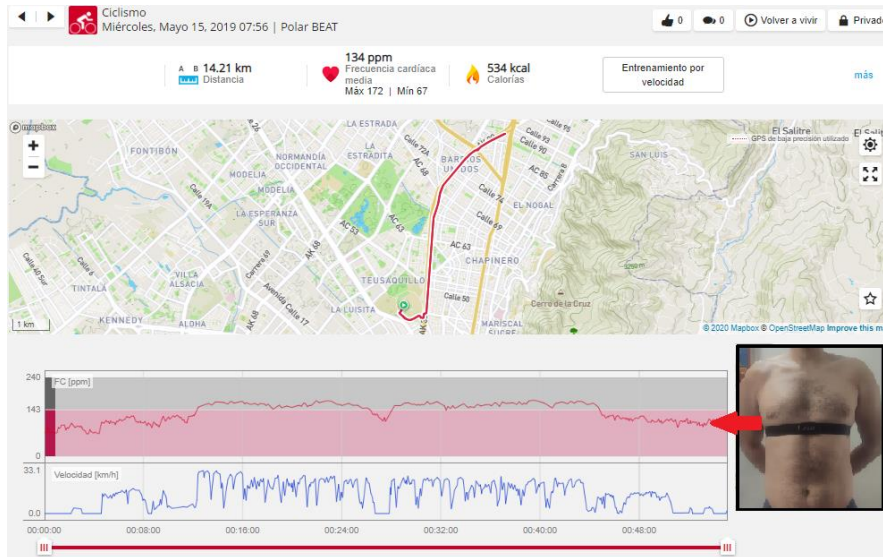
$$\frac{\mu g}{m^3} = \frac{C (ppm) * (PM_C) * 1000}{V_{mol}}$$

Donde C (ppm) es la concentración del contaminante, PM_C es el peso molecular del gas, V_{mol} es Volumen molar del aire a temperatura (17 °C) y presión atmosférica (560mmHg) promedio en Bogotá, dando como resultado 32,312.

2.13.1. CÁLCULO DE LA TASA DE INHALACIÓN

La Tasa de Inhalación se calculó a partir del gasto calórico durante cada recorrido, el cual fue monitoreado en tiempo real y con alta precisión, gracias el sensor de frecuencia cardiaca POLAR H10 (79).

Figura 2.13-1: Pantallazo del recorrido, resumido, con los datos recolectados por el sensor de frecuencia cardiaca POLAR H10, año 2019



Fuente: POLAR®, <https://flow.polar.com/training/analysis/3490852695>, modificada por el autor.

Con base en el gasto calórico durante el recorrido, se calcularon los *METs* (Unidad de medida del Índice Metabólico, por sus siglas en inglés) utilizando la fórmula planteada por Coelho-Ravagnani, 2013 (80):

Ecuación 2.133-3: Cálculo de *METs*

$$METs \text{ de la actividad} = \frac{\text{Gasto calórico (Kcal)}}{(\text{Peso corporal (Kg)}/60) * (\text{tiempo de la actividad (min)})}$$

Una vez calculados los *METs*, teniendo como base el libro *Exposure Factors Handbook 2011 Edition* de la United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA), se identificó la tasa de inhalación reportada en las tablas 6-17 y 6-19, para hombres y mujeres, respectivamente, partiendo de la intensidad del ejercicio obtenido de los *METs*, el sexo y la edad de cada voluntario (81) (ANEXO I).

Tabla 2.133-1: Clasificación de la intensidad del ejercicio a partir de los METs.

	INTENSIDAD DEL EJERCICIO	METs
	Actividades sedentarias y pasivas	<1,5
	Actividades de intensidad ligera	1,5-3
	Actividades de intensidad moderada	3,6
	Actividades de alta intensidad	>6

Fuente: *Exposure Factors Handbook 2011 Edition* de la United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA).

2.14. Caracterización del tráfico

2.14.1. Determinación del aforo vehicular

Para determinar el aforo vehicular durante el recorrido en la vía de interés, se utilizó la metodología recomendada por International Sustainable Systems Research Center (ISSRC), en el Modelo Internacional de Emisiones de Vehículos (IVE, por sus siglas en inglés), el cual está diseñado específicamente para tener la flexibilidad que necesitan las naciones en desarrollo, en sus esfuerzos por abordar las emisiones atmosféricas de fuentes móviles (82). La cantidad de vehículos que pasan por hora se establece a partir de un aforo durante al menos 20 minutos de grabación en dicha hora. En el presente estudio, se contabilizaron 3,5 por cada 10 minutos de grabación y se hicieron 6 videos en total, con un tiempo de 1 minuto cada uno, es decir, se grabaron 21 minutos de aforo vehicular por cada hora de grabación. Por regla de tres simple, se calculó el número de vehículos en una hora (Ecuación 2.14.1-1).

Ecuación 2.144.1-1: Cálculo del aforo vehicular

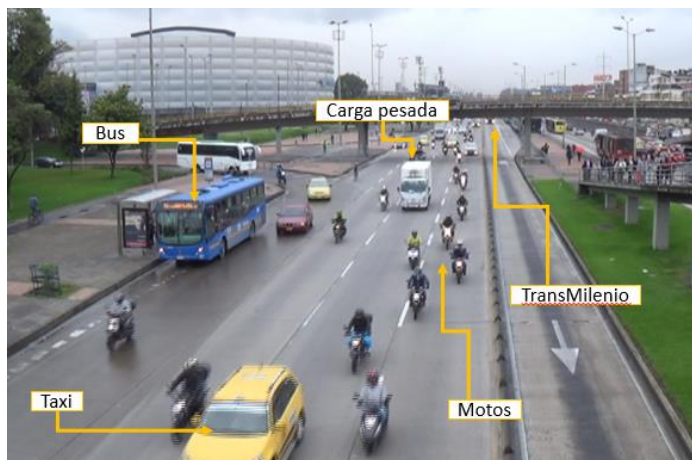
$$Aforo/hora = \frac{60 \text{ minutos} * Aforo \text{ en } 21 \text{ minutos}}{21 \text{ minutos}}$$

El aforo se realizó para dos puntos, correspondientes a los puentes de las calles 63 y 75 y el promedio de los dos fue tomado como aforo del trayecto.

2.14.2. Determinación del aforo discriminado

El conteo del aforo se desarrolló clasificando los vehículos en 6 tipos que fueran fácilmente identificables en las grabaciones, para lo cual se utilizó el formato del Anexo G. Las clases de vehículos reconocidos fueron: motos, taxis, carros particulares, autobuses, carga pesada y Transmilenio, tal y como puede observarse en la Figura 2.14-1. Tres personas hicieron el análisis de los videos, en sesiones en las cuales se contaron paralelamente 2 tipos de vehículos en cada grabación de 3,5 minutos por cada 10 minutos de grabación.

Figura 2.14-1: Pantallazo del video del aforo vehicular sobre el puente peatonal de la Calle 63, año 2019



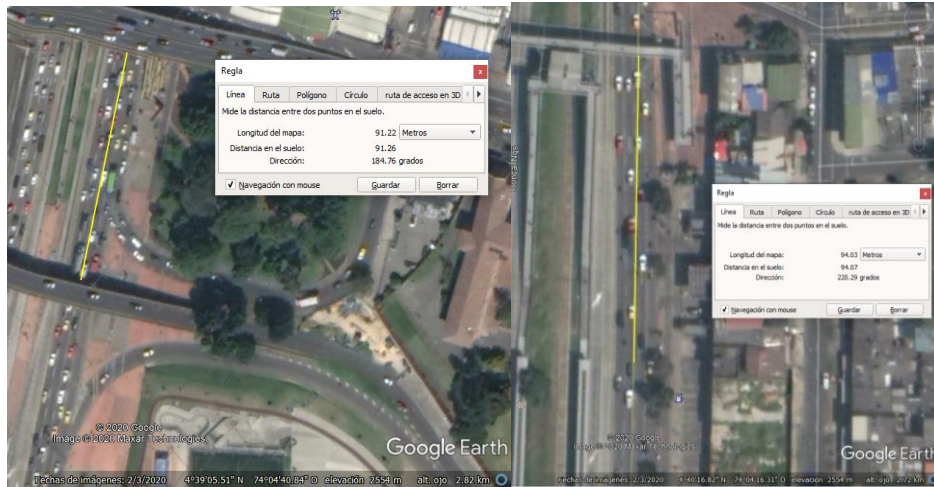
Nombre de Fuente: el autor.

2.14.3. Determinación de la velocidad promedio

Dado que no se contaba con sensores de velocidad para cuantificar la celeridad promedio del tráfico, esta se determinó usando las grabaciones del aforo vehicular y un vehículo trazador, el cual calculó el tiempo en recorrer una distancia establecida. Las distancias para cronometrar el tiempo que tarda un vehículo en atravesar los puntos preestablecidos fueron de 91 y 94 metros para los puentes de la Calle 63 y Calle 75, respectivamente, tal y como se observa en la **Figura 2.14-2**, de conformidad con la información extraída de la herramienta Google Earth. No se tuvieron en cuenta las motos, ya que se observó que

este tipo de vehículos transita entre los otros, y no es representativo de la congestión vehicular.

Figura 2.14-2: Distancia para determinar la velocidad vehicular promedio en el punto de aforo de la Calle 63, año 2019.



Fuente: Google Earth. Modificada por el autor.

Posteriormente, para calcular la velocidad promedio en Kilómetros/hora, se utilizaron las siguientes conversiones de unidades:

$$Velocidad\ del\ tráfico\ \left(\frac{Km}{h}\right) = \frac{Distancia\ (metros) * \left(\frac{1\ Kilómetro}{1000\ metros}\right)}{Tiempo\ (Segundos) * \frac{1\ hora}{3600\ Segundos}}$$

Por cada hora de grabación se evaluaron 6 velocidades y posteriormente se calculó la media de dicha hora.

2.15. Procesamiento de datos y análisis estadístico

El registro de los datos primarios y la organización de las bases de datos se realizó en Excel, para ser exportada al software de código abierto RStudio para el respectivo análisis estadístico.

2.15.1. Pruebas de contraste de muestras

Para el contraste de muestras, se estableció previamente la distribución de cada variable (paramétrica o no paramétrica), se realizaron pruebas de Shapiro-Wilk para evaluar la normalidad, y de F de Fisher para evaluar la homocedasticidad; lo anterior, con el fin de seleccionar las pruebas de contraste de muestras a utilizar. Del mismo modo, se realizó la prueba de Levene, para identificar la igualdad de varianzas entre las muestras. Es importante precisar que se definió un nivel de significancia de 0.05 ($p < 0,05$).

2.15.2. Asociación de las variables de Actividad Vehicular con la exposición de los biciusuarios a las concentraciones de los contaminantes estudiados

Si bien el estudio realizado por Thai estableció que algunas variables ambientales son significativas para predecir la contaminación a determinados contaminantes, dicho estudio en el cual el investigador tomó los datos de una estación fija meteorológica lejana ubicada a 15 Km, considerados como datos representativos de la mesoescala meteorológica urbana de Vancouver (83). En virtud de lo anterior, se incluyeron algunas variables, además de las variables de aforo, que podrían tener un impacto en los contaminantes monitoreados. Las variables tomadas se separaron en dos grupos, el primero se compone de las variables meteorológicas: velocidad del viento, dirección del viento, temperatura y humedad relativa, que indiscutiblemente influyen en el transporte de los contaminantes, en los procesos de nucleación y condensación, permitiendo la formación de partículas de mayor diámetro y alterando la eficacia de la combustión, y por otro lado, el segundo grupo se compone de variables de contaminación de fondo: Concentración de Ozono (O_3), CO, SO_2 , NO_2 y $PM_{2.5}$, las cuales ayudan a entender el estado de la calidad del aire del área circundante al recorrido estudiado.

Es importante precisar que los datos fueron tomados de la estación Centro de Alto Rendimiento de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá – RMCAB, ubicada en la Calle 63 No. 59A – 06, Bogotá D.C, Colombia (Coordenadas geográficas:

4,65847916299°, -74,0839666663°), ubicada a una distancia máxima de 3.5 Km de la ruta de estudio, durante mayo y junio del 2019. **Figura 2.15-1.**

Figura 2.15-1: Ubicación de la estación de monitoreo de calidad del aire en el Centro de Alto Rendimiento.



Fuente: Google Earth. Modificada por el autor.

Una vez explicado lo anterior, con el fin de establecer la relación entre las variables de actividad vehicular, las meteorológicas y de contaminación de fondo, sobre la exposición de los bicusuarios a las concentraciones de CO, PUF, Dióxido de Nitrógeno, Dióxido de Azufre y Carbono Negro, se utilizaron modelos de regresión lasso usando el paquete glmnet en Rstudio, teniendo en cuenta la colinealidad encontrada entre las variables dependientes. En estos modelos, cada contaminante fue la variable dependiente o respuesta (Y) y cada una de las variables de actividad vehicular, meteorológicas y de contaminación de fondo fueron las variables independientes (X_1 , X_2 , X_3 ...). Lo anterior,

para determinar la relación entre cada una de estas variables independientes, sobre las variables dependientes.

Cabe aclarar que, en virtud de los comportamientos disímiles entre los dos niveles de exposición, observados en los diagramas de dispersión entre las variables de aforo y la concentración ambiental de PUF (Anexo I), se vio necesidad de explorar modelos separados para cada nivel de exposición, dado que, por ejemplo, para el nivel de exposición alto se encontró una pendiente positiva en la línea de mínimos cuadrados y para el nivel de exposición una pendiente negativa, lo anterior se observó para los diagramas de dispersión entre las concentraciones de PUF y las variables; Carga Pesada, Buses, Aforo Total, Transmilenio, y velocidad vehicular.

Por otro lado, las variables de contaminación de fondo se definieron considerando únicamente aquellas que podrían tener un impacto en cada contaminante, es decir, aquellas que podrían incrementar las concentraciones o por influir en la dinámica ambiental de cada contaminante. En la siguiente tabla se resumen las variables que se incluyeron para cada modelo. **Tabla 2.15-1.**

Tabla 2.15-1: Variables independientes incluidas en los modelos de contaminantes

VARIABLES X	CONTAMINANTES						
	PUF	TAM	LDSA	CO	BC	NO2	SO2
Motos	X	X	X	X	X	X	X
Taxis	X	X	X	X	X	X	X
Particular	X	X	X	X	X	X	X
Carga pesada	X	X	X	X	X	X	X
Transmilenio	X	X	X	X	X	X	X
Buses	X	X	X	X	X	X	X
Aforo total	X	X	X	X	X	X	X
Velocidad Vehicular	X	X	X	X	X	X	X
Velocidad Viento	X	X	X	X	X	X	X
Temperatura	X	X	X	X	X	X	X
Humedad Relativa	X	X	X	X	X	X	X
Conc. de fondo de SO ₂ ^a	X	X	X				X
Conc. de fondo de O ₃ ^a	X	X	X			X	
Conc. de fondo de PM _{2.5} ^a	X	X	X		X		

Conc. de fondo de CO ^a				X			
Conc. de fondo de NO ₂ ^a						X	

TAM=Tamaño promedio de PUF

a=datos tomados de la estación Centro de Alto Rendimiento de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá – RMCAB

Fuente: autor

2.15.3. Asociación entre la dosis inhalada de CO y el cambio en los niveles de carboxihemoglobina

Para establecer la posible asociación entre la dosis inhalada de CO y el cambio en los niveles de carboxihemoglobina, se determinó el coeficiente de Pearson entre la Dosis de Exposición Estimada a CO y el Delta de COHb, así como también entre la Dosis de Exposición Estimada a CO y el porcentaje de cambio de carboxihemoglobina.

Es importante precisar que el Delta de COHb y el Porcenta de cambio COHb se calcularon de la siguiente manera:

Ecuación 2.15-1: Cálculo de Delta de COHb

$$\text{Delta de COHb} = \text{COHb después} - \text{COHb antes}$$

Ecuación 2.15-2: Cálculo porcentaje de cambio de COHb

$$\text{Porcenta de cambio COHb} = \frac{\text{COHb después} - \text{COHb antes}}{\text{COHb antes}}$$

Del mismo modo, se realizó un modelo lineal de efectos mixtos usando el paquete lme en RStudio, donde se seleccionó tanto el intercepto como pendiente aleatoria para analizar el cambio de cada coeficiente de las variables de efectos fijos, al separarlo por el nivel de exposición. Del mismo modo, se seleccionaron como variables explicativas, efectos fijos y aleatorios, las variables:

Variables explicadas (Y): delta de COHb

Efectos fijos: DEE de CO, duración del recorrido en minutos y frecuencia cardiaca media durante el recorrido.

Efectos aleatorios: Índice de Masa Corporal (IMC) categorizada, Sexo del participante y edad del participante, en términos si es mayor o menor a 22 años, es decir, se utilizó como variable categórica.

2.15.4. Impacto de las dosis inhaladas de CO, PUF, Dióxido de Nitrógeno, Dióxido de Azufre y Carbono Negro y la respuesta respiratoria en la Espirometría antes y después del trayecto:

Para fijar el posible impacto de las dosis inhaladas de CO, PUF, Dióxido de Nitrógeno, Dióxido de Azufre y Carbono Negro, y la respuesta respiratoria en la espirometría antes y después del trayecto, se utilizaron modelos de regresión lineal múltiple donde el cambio de cada parámetro espirométrico fue la variable dependiente o respuesta (Y) y cada una de las dosis inhaladas de contaminantes fueron variables independientes o predictores (X1, X2, X3...).

Para la selección de predictores, se utilizó el método paso a paso (Stepwise) para establecer el mejor modelo de un conjunto de variables predictivas que mejor explican la variable dependiente, emplea criterios matemáticos para decidir qué predictores contribuyen significativamente al modelo y en qué orden se introducen. Se seleccionó este método dado que es una combinación de los métodos de Regresión Forward y Backward, que permite verificar si en algunos de los pasos, de adición de variables, hay variables no significativas, las cuales elimina y repite el paso, para verificar que cada vez que se incluyan las variables las demás sigan siendo significativas. Este método construye el mejor modelo mediante la adición o eliminación de variables predictoras de acuerdo con la medida de ajuste Akaique (AIC).

Adicionalmente, se realizaron modelos lineales de efectos mixtos con el paquete lme en RStudio, seleccionando tanto el intercepto como pendiente aleatoria para analizar el cambio de cada coeficiente de las variables de efectos fijos, al separarlo por el nivel de

exposición. Del mismo modo, se seleccionaron como variables explicativas, efectos fijos y aleatorios, las siguientes variables:

Variables explicadas (Y): capacidad Vital Forzada (CVF), Volumen Espiratorio forzado en el primer segundo (VEF_1), Flujo espiratorio máximo (*FEM*, por sus siglas en inglés) y el flujo espiratorio medio $MMEF_{25\%-75\%}$.

Efectos fijos: DEE de PUF, BC, CO, NO_2 , SO_2 , tamaño promedio de PUF y Área de Superficie Depositada en los pulmones (*LDSA*, por sus siglas en inglés).

Efectos aleatorios: Índice de Masa Corporal (IMC), Sexo del participante y edad del participante, en términos si es mayor o menor a 22 años, es decir, se utilizó como variable categórica.

3. Resultados y análisis

La campaña de monitoreo inició el 02 de mayo y finalizó el 30 de junio de 2019. Un total de 37 voluntarios cumplieron con todos los requisitos, completaron los dos trayectos, realizaron a satisfacción las espirometrías y se obtuvieron las muestras de sangre. Se calcula un aproximado de 1036 Km monitoreados en 74 recorridos.

3.1. Descripción de la población

Los datos de este apartado pueden ser consultados en la Tabla 3.1-1.

Tabla 3.1-1: Descripción de los biciusuarios que participaron en el estudio.

	Todos (n=37)		Hombre (n=30)	Mujer (n=7)
	Media \pm DE	(Min-Max)	Media \pm DE	Media \pm DE
Edad (años)	23 \pm 3.9	(19-38)	22 \pm 4	23 \pm 3
Peso (Kg)	65.4 \pm 9.33	(44-91)	66.6 \pm 8.9	60.28 \pm 9.96
Estatura (m)	1.7 \pm 0.07	(1.52-1.79)	1.71 \pm 0.044	1.59 \pm 0.07
Índice de masa corporal (IMC)	22.8 \pm 2.84	(18.08-30)	22.5 \pm 2.56	23.85 \pm 3.86

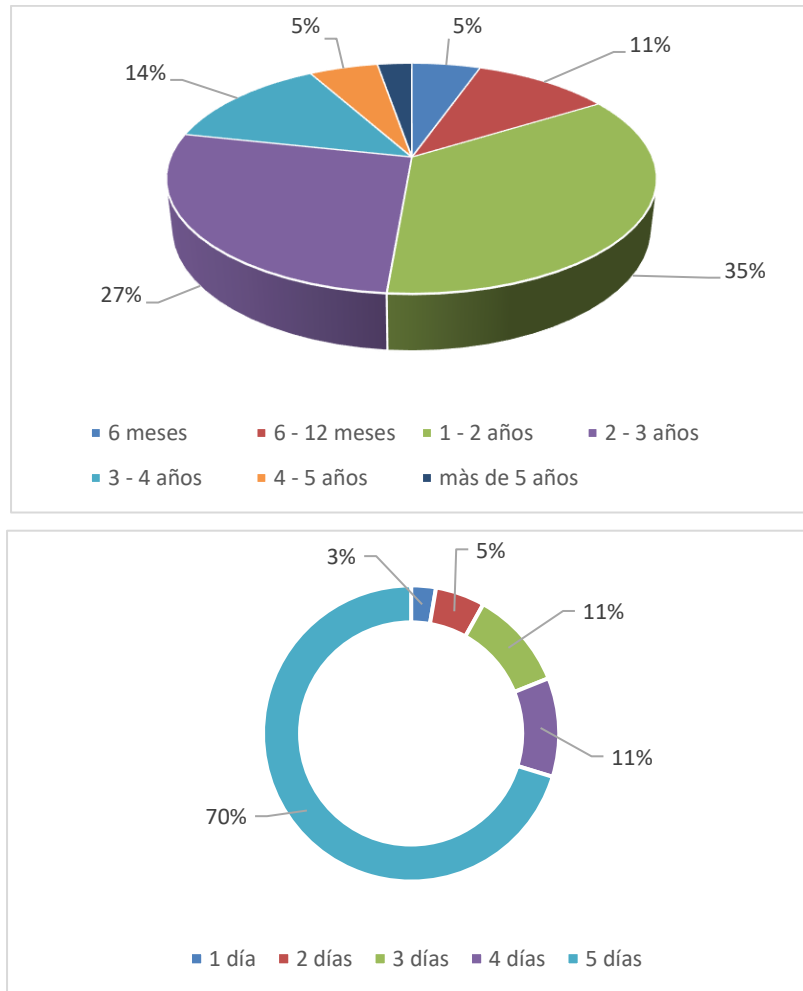
DE=Desviación estándar

Fuente: procesamiento realizado por el autor con datos suministrados por los voluntarios.

Se observa que se trata de una población joven entre la tercera y cuarta décadas, sin sobrepeso y en su mayoría hombres.

A continuación, se presenta el tiempo de uso de la bicicleta por parte de los voluntarios antes del estudio, así como los días de práctica semanal como medio de transporte. El 62 % de los participantes han utilizado la bicicleta entre 1 y 3 años, y el 70 % de los voluntarios ha usado la bicicleta como medio de transporte todos los días de la semana.

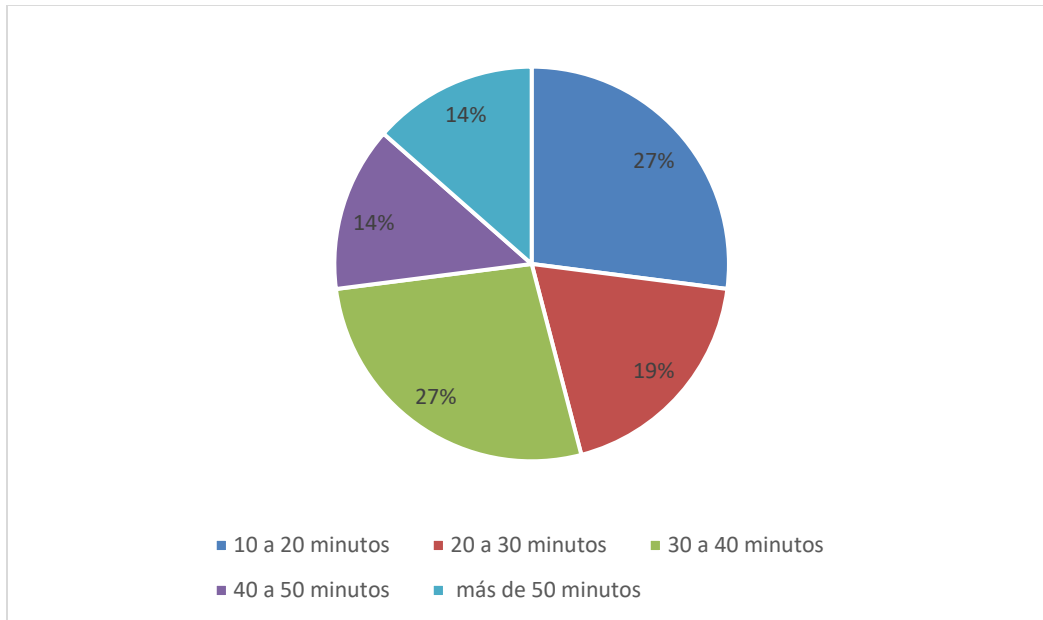
Gráfica 3.1-1: Tiempo usando la bicicleta como medio de transporte y días de uso de bicicleta por semana, para los voluntarios que participaron en el estudio, año 2019, Universidad Nacional de Colombia



Fuente: procesamiento realizado por el autor con datos suministrados por los voluntarios. La población de estudio se moviliza en bicicleta desde su domicilio hasta la Universidad, recorrido durante el cual se exponen a los contaminantes ambientales presentes en estos desplazamientos.

A continuación, se presenta la gráfica de la duración promedio del trayecto desde la casa hasta la universidad, donde se puede evidenciar que el 73 % de los recorridos duran entre 10 y 40 minutos.

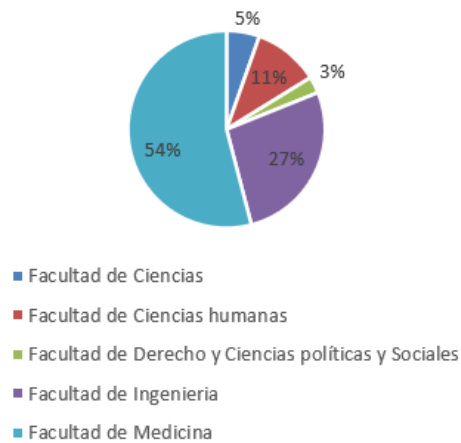
Gráfica 3.1-2: Duración promedio del trayecto desde la casa a la universidad, para los voluntarios que participaron en el estudio, año 2019, Bogotá D.C.



Fuente: procesamiento realizado por el autor con datos suministrados por los voluntarios.

El 100% de los voluntarios correspondió a población de estudiantes, principalmente de las facultades de Medicina e Ingeniería y algunos pertenecían a las facultades de Ciencias, Ciencias Humanas, Derecho y Ciencias políticas y Sociales (Gráfica 3-1.3).

Gráfica 3.1-3: Distribución de las facultades a las cuales pertenecen los voluntarios que participaron en el estudio, año 2019, Universidad Nacional de Colombia



Fuente: procesamiento realizado por el autor con datos suministrados por los voluntarios.

3.2. Resultados y análisis del objetivo 1. Monitoreo de los contaminantes ambientales.

3.2.1. Resultados y análisis de monitoreo personal de la concentración de exposición a contaminantes minuto a minuto

Enseguida, la Tabla 3.2-1 presenta los resultados de los contaminantes monitoreados minuto a minuto en monitoreo personal. Hay diferencias estadísticamente significativas entre los recorridos realizados entre semana y el domingo, tanto en las concentraciones de PUF como en el tamaño promedio de partículas, LDSA, CO, SO₂ y NO₂. ($p < 0,001$). No obstante, no se hallaron diferencias estadísticamente significativas de las concentraciones promedio de BC, entre el nivel de exposición alto y bajo ($p > 0,05$).

Tabla 3.2-1: Resultados generales de las concentraciones de contaminantes ambientales monitoreados de exposición personal minuto a minuto, para los dos niveles de exposición.

Contaminante	N	Alta exposición			Baja exposición			Incremento porcentual ^a	p-valor
		Media ±DE	Min	Max	Media ±DE	Min	Max		
PUF (pt/cm ³)	3788	123852 ±115855	1275	843522	73178 ±77859	1002	843523	69%	<2,2x10 ^{-16***}
Tamaño (nm)	3788	42.62 ±9.30	18.26	92.04	36.974 ±10.15	16.82	96.82	15%	<2,2x10 ^{-16***}
LDSA (µm ² /cm ³)	3788	241.844 ±215	2.957	671.068	113.84 ±126	2.72	1359.64	112%	<2,2x10 ^{-16***}
BC (ng/m ³)	3788	80873 ±123052	4	1105159	81889 ±106022	4	726062	-1%	0.09933
CO (ppm)	3788	1.424 ±1.39	0	8	1.098 ±1.20	0	6	30%	2.26x10 ^{-14***}
NO ₂ (ppm)	3788	0.139 ±0.25	0	1.5	0.074 ±0.24	0	3.4	88%	<2,2x10 ^{-16***}
SO ₂ (ppm)	3788	0.0795 ±0.41	0	6.7	0.028 ±0.23	0	5.10	184%	<2,2x10 ^{-16***}

a= incremento porcentual con respecto al escenario de baja exposición.

*=p<0,05, **=p<0.01, ***=p<0.001

Fuente: procesamiento realizado por el autor con los datos de los equipos de monitoreo ambiental.

Los resultados anteriores muestran que, para los datos minuto a minuto, durante el escenario de exposición alto, los biciusuarios estuvieron expuestos a concentraciones más altas de contaminantes que en el escenario de exposición bajo. En contraste, el BC fue ligeramente mayor para el nivel de exposición bajo; sin embargo, no hubo diferencia estadísticamente significativa.

No obstante, para el BC, se presentó el valor máximo en el escenario alto con un valor 1105159 ng/m³, muy superior al valor máximo reportado en el escenario bajo con 726062 ng/m³. Lo anterior, refleja la necesidad de estudiar el impacto de los picos de contaminación, es decir, aquellos valores extremos a los cuales las personas se pueden exponer en un corto periodo de tiempo.

Los resultados anteriores muestran que, en promedio, durante el escenario de exposición alto, los biciusuarios estuvieron expuestos a concentraciones más altas de contaminantes que en el escenario de exposición bajo, a excepción del BC, que fue ligeramente mayor para el nivel de exposición bajo; sin embargo, no hubo diferencia estadísticamente significativa para este último contaminante. Del mismo modo, en el recorrido de alta exposición se incrementó en promedio la exposición a contaminantes atmosféricos en un 69% para PUF, 112% (LDSA), 30% para el CO, 148% para el SO₂ y 88% para el NO₂, así como también se redujo el diámetro promedio de partículas ultrafinas en 15%, con respecto al recorrido de baja exposición.

Comparando los resultados obtenidos con otros estudios similares, el presente estudio reporta las concentraciones más altas de partículas ultrafinas para el recorrido de alta exposición con una media de **123852** Pt/cm³, seguido del estudio realizado en Londres (Inglaterra) por S. Kaur *et al* con una media 101364 Pt*cm⁻³(84) y el estudio realizado por Morales *et al* (21) en Bogotá (Colombia) sobre la Calle 80 con una mediana de 100000 Pt/cm³. Para el BC, en el estudio realizado por Morales *et al* (21) se expuso, como mediana, concentraciones inferiores a 30000 ng/m³, para los recorridos de la calle Séptima, Calle 80 y Carrera 11 y 13. En el presente se obtuvieron en promedio concentraciones muy superiores, por encima de 80000 ng/m³, tanto para el nivel de exposición baja como para el alto.

3.2.2. Resultados y análisis de la Dosis de Exposición Estimada a contaminantes

En las tablas 3.2-2 y 3.2-4, se presentan los resultados individuales y generales, respectivamente de las Dosis de Exposición Estimada (DEE) de contaminantes para los dos niveles de exposición, para cada uno de los participantes y en cada recorrido.

Tabla 3.2- 2: Resultados individuales de las Dosis de Exposición Estimada (DEE) de contaminantes para los dos niveles de exposición.

ID	RECORRIDO DE ALTA EXPOSICIÓN					RECORRIDO DE BAJA EXPOSICIÓN				
	DOSIS PUF (pt/Kg de PC)	DOSIS BC (ng/Kg de PC)	DOSIS CO (mg/Kg de PC)	DOSIS NO2 (mg/Kg de PC)	DOSIS SO2 (mg/Kg de PC)	DOSIS PUF (pt/Kg de PC)	DOSIS BC (ng/Kg de PC)	DOSIS CO (mg/Kg de PC)	DOSIS NO2 (mg/Kg de PC)	DOSIS SO2 (mg/Kg de PC)
1	366000000,0	642,0	58,2	1,2	0,3	121000000,0	119,0	7,8	2,5	0,3
2	2290102382,0	283,0	15,7	2,3	0,4	777000000,0	78,8	7,1	5,1	1,4
3	3244482386,0	335,9	71,7	1,6	0,4	129000000,0	126,6	8,4	0,1	0,0
4	2214430261,0	262,0	17,9	2,1	3,6	123000000,0	115,6	11,4	0,1	0,0
5	2543530204,0	3528,3	34,4	5,8	1,7	220000000,0	549,0	26,3	0,1	1,4
6	7555883955,0	689,4	37,7	6,8	8,8	288000000,0	479,6	11,9	1,1	0,8
7	4060871988,0	604,8	38,9	16,6	5,3	206000000,0	281,7	29,7	0,1	2,1
8	2920191322,0	1062,7	7,5	22,4	17,8	152000000,0	2643,2	22,9	0,1	0,1
9	1973850587,0	442,4	29,8	3,2	4,0	792000000,0	4799,3	18,5	0,0	0,3
10	6126182246,0	684,2	45,9	0,4	18,5	430000000,0	552,8	8,2	0,4	0,3
11	4841279163,0	1368,3	25,3	2,4	0,7	2828239554,0	8721,1	42,6	22,1	13,2
12	3005124265,0	1338,1	14,8	9,3	3,4	192000000,0	5198,6	79,7	0,7	0,1
13	6931218513,0	616,6	36,7	1,6	9,0	114000000,0	2601,7	32,8	0,1	1,4
14	3415984873,0	3179,4	19,8	9,4	2,4	874000000,0	252,7	19,9	2,3	0,6
15	3426325150,0	2589,3	20,1	2,3	1,2	304000000,0	4154,6	10,0	0,2	1,9
16	3592960670,0	5751,7	24,5	4,1	0,1	897000000,0	4618,9	21,3	4,1	0,1
17	2860913965,0	7534,5	16,9	0,0	0,0	221000000,0	4219,6	25,0	8,9	0,0
18	6004114538,0	1893,1	36,2	1,3	0,4	243000000,0	1840,0	7,8	4,5	0,3
19	1993388951,0	346,5	52,8	0,3	3,0	105000000,0	374,5	24,0	0,0	0,6
20	4203601553,0	882,0	54,4	30,5	5,2	138000000,0	3162,9	12,6	0,2	2,5
21	1220190130,0	261,8	38,5	2,1	1,5	139000000,0	174,9	35,7	0,9	1,7
22	3192754378,0	850,3	46,3	0,0	0,0	435000000,0	245,8	46,8	0,1	0,1
23	1132455496,0	446,1	34,8	0,0	0,0	113000000,0	4015,2	7,3	0,3	0,3
24	1240234976,0	739,7	37,6	0,0	0,0	129000000,0	1104,0	38,8	9,2	6,3
25	4712267996,0	1139,5	22,1	10,0	8,6	195000000,0	1379,6	44,8	3,7	0,9
26	3255560750,0	1885,6	16,0	0,1	4,3	193000000,0	942,2	46,6	5,1	0,1
27	3369732774,0	2682,6	44,4	34,7	30,4	134000000,0	606,9	15,4	0,0	5,1
28	2632657026,0	7871,3	12,4	6,1	1,4	639000000,0	4593,3	9,6	8,3	2,8
29	1668026065,0	7890,0	32,1	6,2	8,9	804000000,0	4940,8	9,7	3,7	0,5
30	4664815636,0	499,2	65,7	13,4	3,9	107000000,0	276,3	9,5	0,7	0,3
31	8561720907,0	1880,7	37,8	2,1	17,5	712000000,0	4681,2	30,8	0,1	2,9
32	1497654675,0	398,7	7,5	0,9	0,5	192000000,0	370,4	6,7	0,0	0,0
33	992377781,3	8041,6	15,0	3,5	1,7	146000000,0	389,3	49,8	8,1	7,2
34	1830946130,0	1143,1	19,3	1,0	0,7	853000000,0	1235,6	11,7	1,7	0,3
35	1015846884,0	1459,9	23,2	0,9	0,4	102000000,0	1309,2	11,1	1,5	0,4
36	2184076701,0	3254,4	34,3	1,4	0,3	146000000,0	3346,3	79,2	2,4	1,1
37	3186734310,0	2186,6	19,1	1,0	0,2	144000000,0	2037,6	8,5	0,9	0,0

PC=peso corporal del voluntario

Fuente: el autor.

Tabla 3.2-3: Resultados generales de la DEE de contaminantes para los dos niveles de exposición.

DEE	Media				Incremento porcentual ^a	p-valor
	N=37		N=37			
	ALTA EXPOSICIÓN		BAJA EXPOSICIÓN			
DEE de PUF	3.33e+09	±1.84e+9	1.82e+9	±1.26e+9	83%	0.0000003621***
DEE de BC	2072.04	±2341.13	2068.61	±2104.70	0.17%	0.4027
DEE de CO	31.49	±15.93	24.05	±18.98	31%	0.0299*
DEE de NO ₂	5.59	±8.24	2.69	±4.29	108%	0.0704
DEE de SO ₂ (ppm)	4.49	±6.69	1.54	±2.61	192%	0.0042**

a= incremento porcentual con respecto al escenario de baja exposición.

*=p<0,05, **=p<0,01, ***=p<0,001

Fuente: el autor.

En relación con la DEE, los voluntarios inhalan en promedio, más contaminantes en el escenario de alta exposición que en el de baja. Para las PUF, los voluntarios inhalan cerca de 83% más partículas ultrafinas en el escenario de alta exposición que en el de baja.

Por otra parte, para el escenario de alta exposición, la DEE para NO₂ obtuvo un incremento porcentual de 192%, con respecto al escenario de baja exposición. Este incremento en la DEE es relevante, si se compara con el promedio de las concentraciones de la exposición a NO₂ obtenidas que fue del 182%. En pocas palabras, con el uso de concentraciones promedio de contaminantes, en lugar de la DEE, se estaría subestimando la exposición real y el potencial tóxico de los contaminantes, para generar posibles efectos en la salud humana. Del mismo modo, el incremento porcentual de la DEE fue mayor para todos los contaminantes, comparándolo con las respectivas concentraciones de contaminantes.

3.3. Resultados y análisis del objetivo 2. Cambio en porcentaje de COHb y Espirometrías.

3.3.1. Resultados Carboxihemoglobina

Se encontró que dos voluntarios reportaron niveles de COHb máximos antes de iniciar el recorrido de 4,60% en el escenario de alta exposición y de 7,50% en el escenario de baja exposición; lo cual significa que algunos biciusuarios llegaron a la Universidad con altos niveles de COHb. Del mismo modo, se pudo evidenciar que los niveles de COHb máximos reportados después del recorrido de alta y de baja exposición fueron 5,50% y 3,90%, en otros dos voluntarios respectivamente, tal y como se observa las celdas de color rojo en la Tabla 3.3-1.

En cuanto a los niveles de COHb, una vez los voluntarios terminaron el recorrido, se evidenció una diferencia estadísticamente significativa en los niveles de COHb entre los dos escenarios de exposición, siendo más alta para el escenario de alta exposición ($p < 0,05$). Tabla 3.3-1.

La evidencia científica reporta que en exposiciones crónicas a CO, pueden presentarse probables efectos en la orientación temporal, a partir de valores de 2,5 % de COHb, deterioro en las facultades psicomotrices y alteraciones cardiovasculares, entre el 5 y 10% de COHb (12). Del mismo modo, los resultados obtenidos inquietan, puesto que algunos biciusuarios de la comunidad universitaria, podrían tener altos niveles de COHb con los cuales estarían llegando a tomar sus clases o a realizar sus actividades laborales, académicas y/o deportivas en el campus; por esta razón, es importante identificar las variables que influyen sobre estos niveles de COHb, además de lograr reconocer a las personas que están en riesgo de sobrepasar estos valores, para tomar medidas preventivas.

Tabla 3.3-1: Resultados individuales de los niveles de COHb monitoreados para los niveles de alta y baja exposición.

ID	ALTA EXPOSICIÓN					BAJA EXPOSICIÓN					
	HBCO ANTES	HBCO DESPUES	DELTA de COHb	PORCENTAJE DE CAMBIO (%)	ESTADO DE CAMBIO	ID	HBCO ANTES	HBCO DESPUES	DELTA de COHb	PORCENTAJE DE CAMBIO (%)	ESTADO DE CAMBIO
1	2,0%	3,9%	1,9%	92,16	SUBE	1	3,2%	2,6%	-0,6%	-17,98	BAJA
2	3,0%	3,0%	0,0%	0,67	SUBE	2	2,6%	0,9%	-1,6%	-63,57	BAJA
3	3,5%	5,5%	2,1%	59,71	SUBE	3	3,8%	3,4%	-0,4%	-11,52	BAJA
4	3,4%	3,0%	-0,4%	-12,21	BAJA	4	3,8%	2,4%	-1,4%	-37,23	BAJA
5	2,5%	2,6%	0,1%	5,67	SUBE	5	3,1%	3,5%	0,4%	13,83	BAJA
6	3,3%	3,6%	0,3%	7,85	SUBE	6	4,0%	3,8%	-0,3%	-6,72	BAJA
7	4,3%	4,4%	0,2%	3,76	SUBE	7	3,3%	3,9%	0,6%	17,22	SUBE
8	4,6%	3,1%	-1,5%	-33,19	BAJA	8	2,3%	3,1%	0,7%	31,62	SUBE
9	2,4%	2,7%	0,3%	11,52	SUBE	9	3,0%	3,5%	0,4%	13,86	SUBE
10	2,7%	3,0%	0,3%	10,07	SUBE	10	3,6%	2,7%	-0,9%	-25,35	BAJA
11	3,9%	3,4%	-0,5%	-13,44	BAJA	11	2,5%	3,3%	0,8%	33,60	SUBE
12	3,8%	2,6%	-1,2%	-31,03	BAJA	12	2,8%	3,8%	1,0%	35,94	SUBE
13	2,5%	2,6%	0,2%	6,10	SUBE	13	2,1%	2,3%	0,2%	11,71	SUBE
14	4,0%	4,0%	0,0%	-0,50	BAJA	14	2,9%	3,6%	0,6%	21,58	SUBE
15	4,6%	3,8%	-0,8%	-17,72	BAJA	15	2,9%	1,9%	-0,9%	-32,75	BAJA
16	4,0%	4,1%	0,1%	3,79	SUBE	16	1,8%	2,5%	0,7%	39,23	SUBE
17	3,3%	3,3%	0,0%	-0,31	BAJA	17	1,5%	1,5%	0,0%	1,99	SUBE
18	2,7%	3,1%	0,4%	14,34	SUBE	18	1,7%	1,4%	-0,2%	-14,29	BAJA
19	2,0%	3,4%	1,4%	71,50	SUBE	19	2,4%	2,9%	0,6%	25,11	SUBE
20	3,3%	3,2%	-0,2%	-4,55	BAJA	20	2,8%	2,2%	-0,7%	-23,05	BAJA
21	1,6%	3,1%	1,5%	93,17	SUBE	21	2,1%	3,4%	1,3%	63,59	SUBE
22	2,9%	3,9%	1,0%	34,62	SUBE	22	1,5%	3,0%	1,5%	99,33	SUBE
23	2,1%	2,7%	0,7%	32,20	SUBE	23	2,4%	2,0%	-0,4%	-17,08	BAJA
24	1,9%	3,1%	1,2%	64,17	SUBE	24	2,1%	3,4%	1,3%	63,59	SUBE
25	2,3%	1,6%	-0,7%	-30,70	BAJA	25	1,7%	2,5%	0,8%	50,00	SUBE
26	4,2%	3,0%	-1,2%	-27,82	BAJA	26	1,7%	3,1%	1,4%	82,94	SUBE
27	1,7%	1,9%	0,1%	6,32	SUBE	27	3,2%	2,2%	-1,0%	-31,68	BAJA
28	3,0%	2,0%	-1,0%	-34,78	BAJA	28	2,2%	1,7%	-0,5%	-21,97	BAJA
29	2,4%	2,5%	0,2%	7,63	SUBE	29	2,4%	2,3%	-0,1%	-5,42	BAJA
30	2,5%	4,6%	2,1%	81,35	SUBE	30	7,5%	2,2%	-5,3%	-70,92	BAJA
31	3,1%	2,6%	-0,5%	-16,34	BAJA	31	4,6%	2,0%	-2,6%	-56,80	BAJA
32	3,7%	2,3%	-1,4%	-37,20	BAJA	32	2,7%	2,2%	-0,5%	-18,98	BAJA
33	3,6%	2,9%	-0,7%	-19,50	BAJA	33	2,1%	3,3%	1,2%	56,07	SUBE
34	2,7%	2,3%	-0,5%	-17,22	BAJA	34	2,6%	2,5%	-0,1%	-2,31	BAJA
35	2,5%	2,6%	0,1%	1,98	SUBE	35	3,0%	1,7%	-1,3%	-43,23	BAJA
36	2,1%	2,2%	0,2%	7,25	SUBE	36	1,8%	3,4%	1,7%	94,35	SUBE
37	2,8%	2,4%	-0,4%	-13,77	BAJA	37	3,0%	2,3%	-0,7%	-24,16	BAJA

Fuente: procesamiento efectuado por el autor con datos reportados por el Laboratorio de Toxicología de la Universidad Nacional de Colombia–sede Bogotá.

Por otro lado, los valores mínimos del delta de COHb para los niveles de exposición alta y baja fueron de -1.54% y -5.30%, respectivamente; lo cual significa que, para la mayoría de los voluntarios los niveles de COHb se redujeron después de realizar los recorridos. **Tabla 3.3-2.**

Tabla 3.3-2: Resultados generales de los porcentajes de COHb monitoreados para los niveles de alta y baja exposición.

Muestra de COHb	N	RECORRIDO ALTA EXPOSICIÓN				RECORRIDO BAJA EXPOSICIÓN				p-valor
		Media	±	Min	Max	Media	±	Min	Max	
% COHb Antes	74	3,00%	±0,08%	1,61%	4,60%	2,80%	±0,01%	1,58%	7,50%	0,1629
% COHb Después (%COHB)	74	3,10%	±0,08%	1,60%	5,50%	2,70%	±0,01%	0,90%	3,90%	0,01206*
COHb antes vs COHb después (p-valor)	-	p=0,6567				p=0,5995				-
% Delta de COHB (%COHB) ^a	37	0,10%	±0,01%	-1,54%	2,06%	-0,10%	±0,01%	-5,30%	0,70%	0,777
% de cambio de COHB ^b	37	8,30%	±0,4%	-37,20%	93,17%	6,20%	±0,4%	-70,90%	99,33%	0,82

n = número de muestras analizadas

a=Delta de COHb = COHb después - COHb antes

b=Porcenta de cambio COHb = $\frac{COHb\ después - COHb\ antes}{COHb\ antes}$

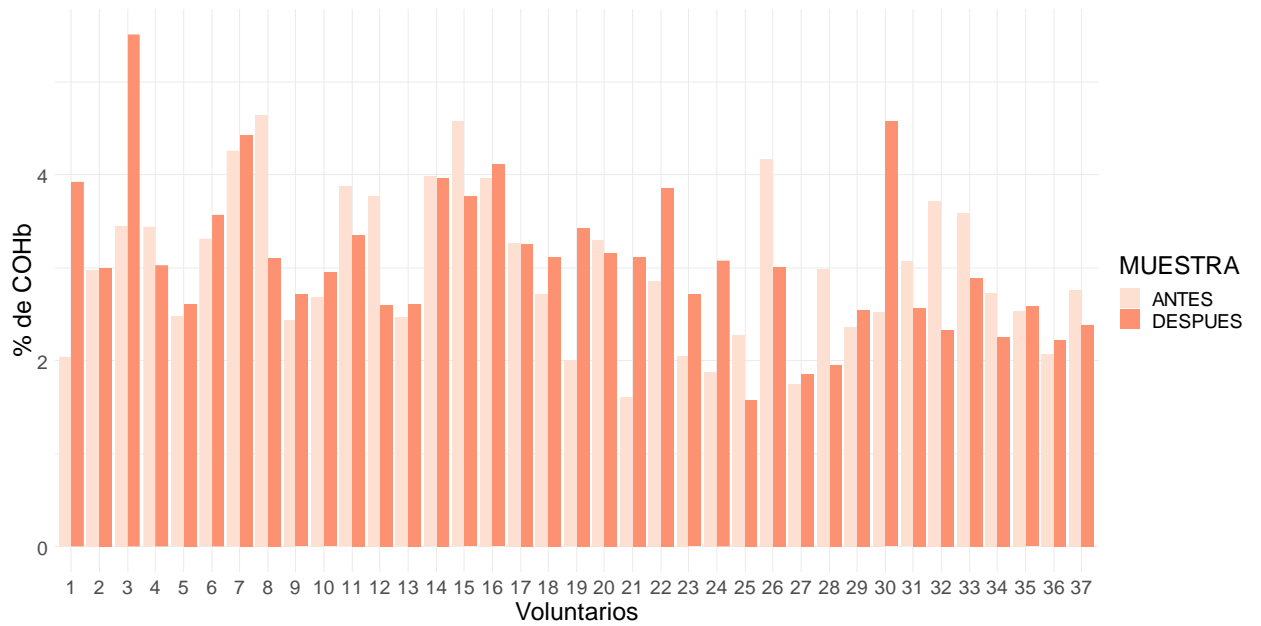
*=p<0,05 , **=p<0.01, ***=p<0.001

Fuente: procesamiento efectuado por el autor con datos reportados por el Laboratorio de Toxicología de la Universidad Nacional de Colombia–sede Bogotá.

Igualmente, los niveles de COHb después del recorrido de alta exposición fueron significativamente mayores que en el escenario de baja exposición, siendo en promedio 41% más altos. El voluntario con la mayor concentración de COHb después del trayecto obtuvo un valor de 5.50%, el cual fue en el recorrido alta exposición.

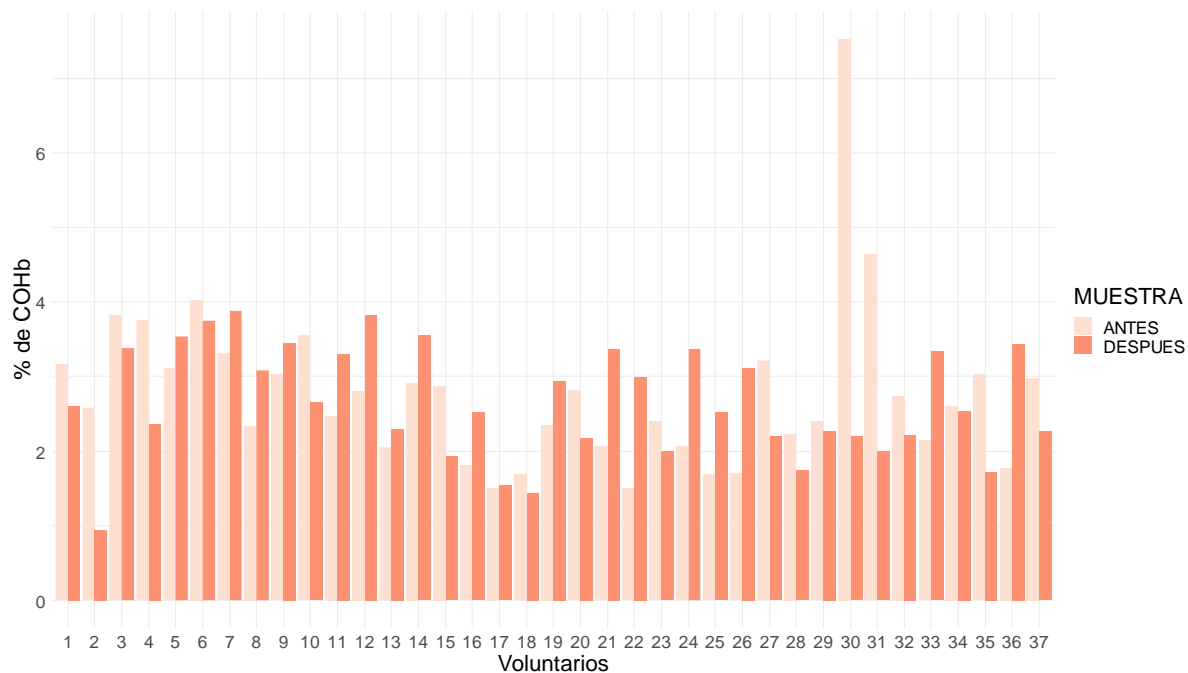
A continuación, se presentan gráficamente los resultados individuales de los niveles de COHb obtenidos antes y después de los recorridos, para los dos escenarios de exposición alto y bajo. Figuras 3.3-1 y 3.3-2.

Figura 3.3-1: Gráfica de los resultados individuales de los niveles de COHb antes y después del recorrido de **alta exposición**.



Fuente: procesamiento efectuado por el autor con datos reportados por el Laboratorio de Toxicología de la Universidad Nacional de Colombia–sede Bogotá.

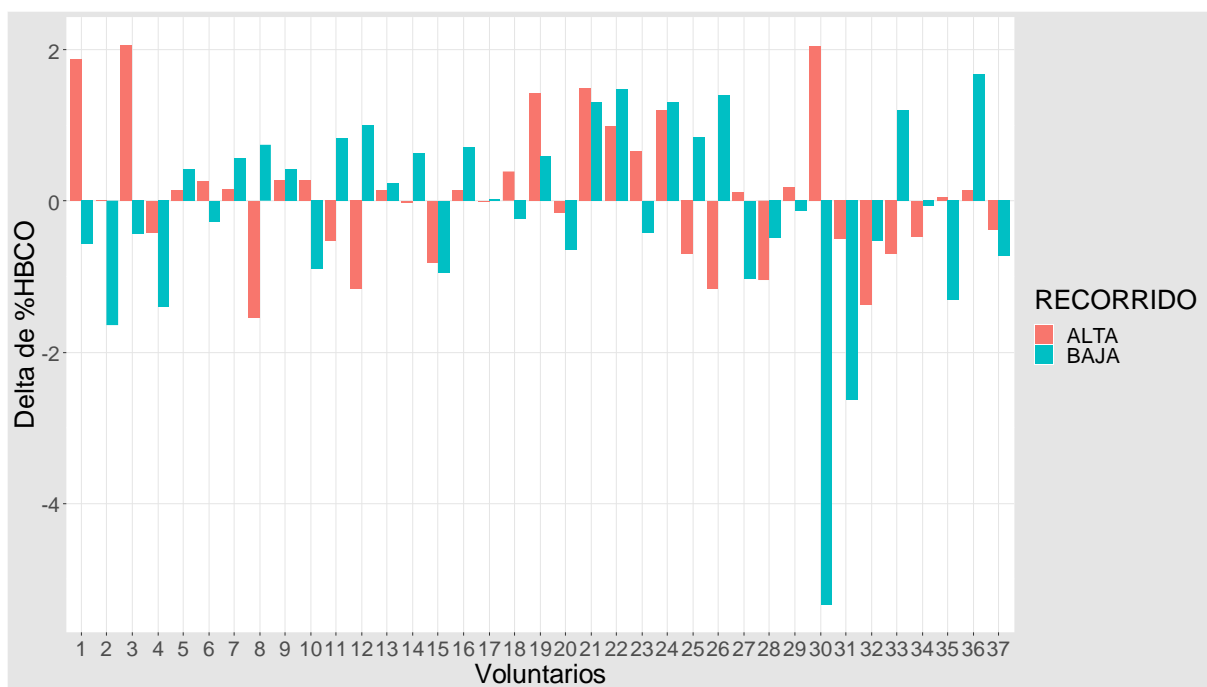
Figura 3.3-2: Gráfica de los resultados individuales de los niveles de COHb antes y después del recorrido de **baja exposición**.



Fuente: procesamiento efectuado por el autor con datos reportados por el Laboratorio de Toxicología de la Universidad Nacional de Colombia–sede Bogotá.

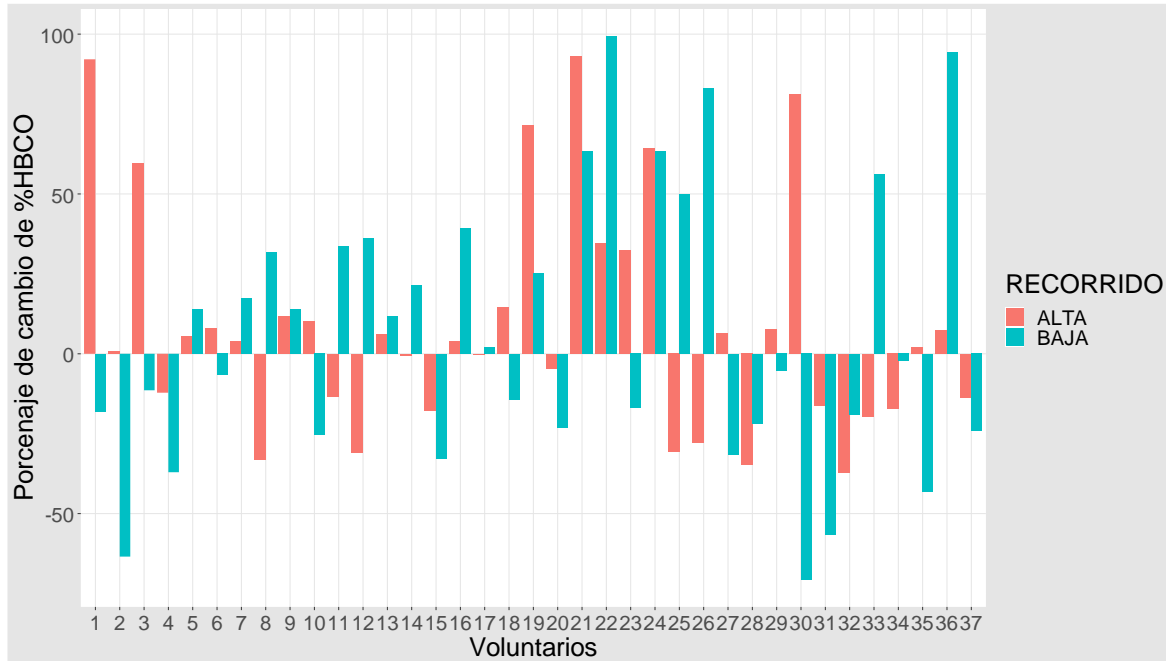
En las siguientes gráficas se presenta de manera individual para los 37 voluntarios, los deltas de COHb y porcentaje de cambio de COHb, figuras 3.3-3 y 3.3-4, respectivamente. Todo ha sido discriminado para los dos niveles de exposición, donde se puede identificar a los voluntarios en los que se aumentaron los niveles de COHb, con respecto al valor inicial.

Figura 3.3-3: Representación gráfica de los resultados individuales del delta de COHb para los niveles de alta y baja exposición.



Fuente: procesamiento efectuado por el autor con datos reportados por el Laboratorio de Toxicología de la Universidad Nacional de Colombia–sede Bogotá.

Figura 3.3-4: Representación gráfica de los resultados individuales del porcentaje de cambio de cambio de COHb para los niveles de alta y baja exposición.



Fuente: procesamiento efectuado por el autor con datos reportados por el Laboratorio de Toxicología de la Universidad Nacional de Colombia–sede Bogotá.

Análisis deltas negativos:

Como se observa en la Figura 3.3-3, se obtuvieron deltas negativos en la variación de COHb. Los resultados de la COHb obtenidos durante el recorrido planteado en este estudio se pudieron ver afectados por las condiciones en el recorrido desde la casa del voluntario hasta la Universidad, reflejados en los resultados negativos de los deltas de COHb; estos hallazgos permiten realizar las siguientes apreciaciones:

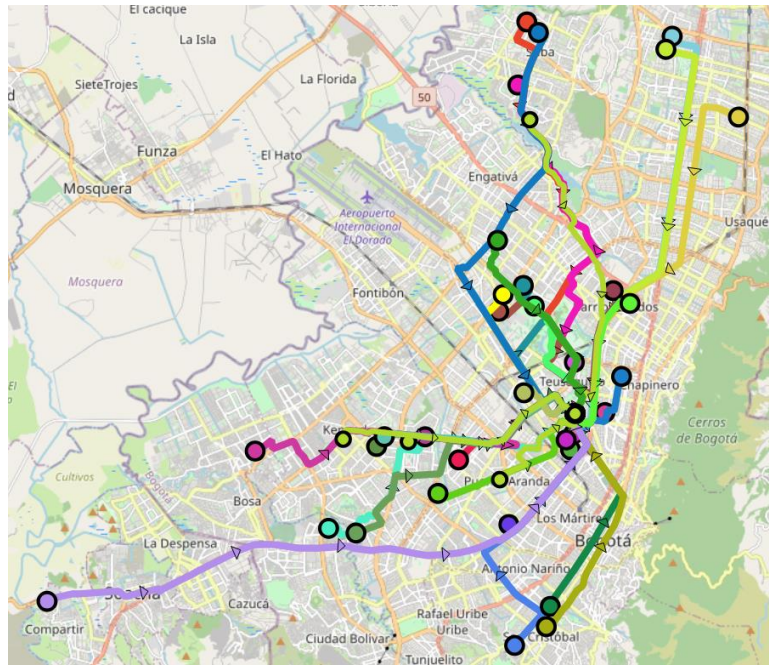
- Para algunos voluntarios, el recorrido de la casa a la Universidad pudo ser más contaminado, en términos de concentraciones ambientales de CO, comparado con los

escenarios de exposición planteados en el presente estudio y, por lo tanto, no se mantuvieron o incrementaron los valores de COHb después de los recorridos.

- Para algunos voluntarios, el esfuerzo físico realizado desde la casa a la Universidad pudo afectar el rendimiento durante los escenarios de exposición planteados en el presente estudio, y, por lo tanto, disminuir la tasa de inhalación y con ello la dosis inhalada de CO.
- Si bien, se eligió la ciclorruta de estudio, por el alto tráfico vehicular adyacente a esta, el impacto del tipo de ciclorruta utilizado por los voluntarios antes de llegar a la Universidad puede jugar un papel fundamental, lo cual fue estudiado y concluido por MacNaughton *et al* (13), quien estableció que la exposición a los contaminantes se incrementará en función de la cercanía de la ciclorruta a la vía por donde transite el bicusuario, independientemente del tráfico vehicular de esta.

Por otro lado, teniendo en cuenta el hallazgo de altos niveles de COHb con los que llegaban algunos voluntarios al campus, tanto entre semana como el domingo, se realizó la georreferenciación de las rutas desde la casa hasta la Universidad de cada uno de los participantes, y con ello se recolectó la información de la distancia y la duración entre los dos puntos. Figura 3.3-5.

Figura 3.3-5: Georreferenciación de las rutas desde la casa hasta la universidad en los voluntarios que participaron en el estudio.



Fuente: procesamiento efectuado por el autor en el programa de Sistema de Información Geográfica de software libre y de código, QGIS, a partir de los datos reportados por los biciusuarios voluntarios del estudio.

Con el fin de identificar las variables que posiblemente podrían tener impacto sobre los niveles de COHb obtenidos antes de los recorridos, se realizó un modelo de regresión lineal. Las variables predictoras que se tuvieron en cuenta fueron:

- Recorrido: baja o alta exposición
- Distancia casa–universidad: kilómetros
- Edad: años
- Duración del trayecto casa-universidad: minutos
- Sexo: F M
- Día en que se toma la muestra: Entre semana o domingo
- Hora de llegada a la universidad
- Tiempo usando la bicicleta: meses

- Días a la semana que usan bicicleta: Entre semana o domingo

Sin embargo, ninguna de estas variables fue significativa para predecir la COHb antes del recorrido, lo cual permite concluir que se debe explorar estas mismas variables en una muestra más grande y/o explorar variables más específicas presentes en este recorrido previo a la Universidad, tales como las concentraciones reales de CO en el aire durante el recorrido, tipo de ruta utilizada por el voluntario, presencia de zonas verdes, variables meteorológicas, etc.

Producto de la georreferenciación de las rutas de los voluntarios desde la casa hasta la Universidad, se identificó que la distancia promedio fue de 8.4 km, la máxima de 21.9 km y la mínima de 1.4 km. Los biciusuarios que participaron en el estudio provienen de 10 de las 20 localidades de la ciudad de Bogotá, y uno de del municipio de Soacha (Cundinamarca).

3.3.2. Resultados y análisis espirometrías

A continuación, se presentan los resultados generales de los parámetros espirométricos objeto de estudio, antes y después de los recorridos, para los dos niveles de exposición.

Cabe precisar que se encontró diferencia estadística para el VEF_1 y el MMEF25-75 (L/s), en las espirometrías realizadas después del recorrido, entre los dos niveles de exposición ($p < 0.05$).

Dado que el VEF_1 es el índice espirométrico más representativo de la capacidad ventilatoria global (85), se observa que al incrementar el nivel de contaminación, el VEF_1 disminuye después del recorrido de alta exposición en comparación con el de baja exposición. Esta disminución es del 3%.

Con relación a la variación del MMEF25-75 (L/s), utilizado para el diagnóstico de las alteraciones obstructivas leves que no afectan al $VEF_{1,(85)}$, se encontró significancia estadística entre el MMEF25-75 (L/s) después del recorrido entre los escenarios de alta y

baja exposición, disminuyendo este índice de manera importante (2,26 L/s ó 51.13% menos) después del recorrido de alta exposición; es decir, que al realizar ejercicio en un escenario de baja contaminación, el flujo medio espiratorio forzado 25-75 de la CVF mejora, inclusive aumenta hasta en un 44.9%, en el grupo estudiado.

En el nivel de exposición baja, se halló diferencia estadística significativa entre el FEM antes y después del recorrido ($P < 0.001$). Tabla 3.3-4, que podría corresponder a una leve obstrucción de la vía aérea superior, pero al observar el porcentaje de variación correspondiente al 10% o menos, esta se considera sin significancia patológica.

Por otra parte, es importante aclarar que no se encontró en la medición basal alguna alteración en su patrón espirométrico para los parámetros evaluados.

Tabla 3.3-4: Resultados generales de los principales parámetros espirométricos, antes y después de los recorridos, para los dos niveles de exposición.

PARÁMETRO ESPIROMETRICO	Momento de la espirometría	Media±DE				<i>p-valor</i>
		Alta Exposición		Baja Exposición		
CVF (L)	Antes	5,13	±0,71	5,14	±0,73	0,7474
	Después	5,06	±0,71	5,16	±0,74	0,2547
	<i>P-valor</i>	0,8677		0,07532		-
VEF ₁ (L)	Antes	4,33	±0,64	4,39	±0,65	0,3362
	Después	4,29	±0,64	4,42	±0,65	0,0488*
	<i>P-valor</i>	0,8817		0,5054		-
FEM (L/s)	Antes	10,16	±1,54	10,03	±1,59	0,3875
	Después	9,89	±1,61	9,96	±1,64	0,6318
	<i>P-valor</i>	0,1244		0,001113**		-

MMEF25-75 (L/s)	Antes	4,42	±1,02	4,61	±1,03	0,2145
	Después	4,42	±1,01	6,68	±1,08	0,0176*
	p-valor	0,5115		0,6374		-

*=p<0,05, **=p<0.01, ***=p<0.001

Fuente: procesamiento efectuado por el autor con datos de las espirometrías realizadas por los voluntarios.

Ahora, se presentarán los resultados generales de los parámetros espirométricos antes y después del recorrido, para establecer si hubo diferencia estadísticamente significativa, independientemente del nivel de exposición. Se encontró que existe diferencia significancia estadística entre el FEM o “flujo pico”, antes y después de realizar el trayecto, con una disminución global del 11% con respecto al promedio del FEM antes del recorrido. (p<0,001). **Tabla 3.3-5.**

Tabla 3.3-5: Resultados generales los principales parámetros espirométricos, antes y después del recorrido.

Parámetro respiratorio	Media±DE				P-valor
	Antes		Después		
CVF	5,139	±0,713	5,117	±0,727	0,25
VEF1	4,363	±0,625	4,356	±0,644	0,7562
VEF1%/CVF	85,723	±4,946	85,802	±4,992	0,9464
FEM	10,1	±1,56	8,925	±1,621	0,000691
MMEF25-75	4,544	±1,022	4,55	±1,047	0,9402

Fuente: procesamiento efectuado por el autor con datos de las espirometrías realizadas a los bicusuarios voluntarios.

3.4. Resultados y análisis del objetivo 3. Asociación entre las variables de actividad vehicular con la concentración de contaminantes ambientales.

3.4.1 Resultados del aforo vehicular.

Los resultados generales del aforo vehicular para los puntos definidos en la Calle 63 y Calle 75 fueron discriminados por los 2 niveles de exposición.

Se evidenció que para los recorridos de **alta y baja exposición** hay diferencia con significancia estadística entre la cantidad de motos (MT), taxis (TX), vehículos de uso particular (VP), carga pesada (CP), Transmilenio (TM), buses (BU), aforo total (AT) y velocidad vehicular promedio (V. vehi), es decir, con todas las variables de actividad vehicular cuantificadas.

Del mismo modo, también se encontró diferencia entre los puntos de aforo para Motos, Taxis, Particulares, Aforo Total y Vehicular Promedio para el recorrido de alta exposición, lo cual permite evidenciar el cambio en la actividad vehicular entre estos dos puntos, atribuido principalmente a la congestión vehicular, la velocidad vehicular, la salida e ingreso de vehículos entre estos puntos. Tabla 3.4-1. Las implicaciones de estas observaciones se podrían relacionar con un aumento en las concentraciones de contaminantes.

Tabla 3.4-1: Resultados generales del aforo vehicular para los dos niveles de exposición, discriminado por los puntos de aforo de la Calle 63 y Calle 75, año 2019

Tipo de vehículo (vehículos/hora)	N	Recorrido Alta exposición (media±DE)					Recorrido Baja exposición (media±DE)					R. Alto vs R Baja.
		Punto de aforo Calle 63		Punto de aforo Calle 75		p-valor	Punto de aforo Calle 63		Punto de aforo Calle 75		p-valor	p-valor
Motos (MT)	37	3495	±1609	2470	±1123	0,0006***	773	±220	639	±179	0,002**	< 2.2x10 ⁻¹⁶ ***
Taxis (TX)	37	1048	±182	1029,1	±715	0,0069**	522	±122	450	±96	0,016*	5.23e-13***
Particulares (VP)	37	3567	±384	2847	±605	0,00008564***	3744	±656	3688	±606	0,531	0.0002735***
Carga Pesada (CP)	37	408	±145	434	±142	0,3343	132	±40	156	±91	0,0001***	2.542 x10 ⁻¹³ ***
Transmilenio (TM)	37	226	±98	210	±58	0,5143	81	±27	78	±10	0,759	2.775 x10 ⁻¹² ***
Buses (BU)	37	102	±43	108	±53,46	0,7119	67	±18,09	64	±20,40	0,288	0.000001004***
AFORO TOTAL (AT)	37	8744	±1627	4628	±825	0,0010**	4546	±704	4434	±647	0,003**	< 2.2x10 ⁻¹⁶ ***
Velocidad (Km/h)	37	31,13	±12,9	22,07	±5,93	0,0006***	48,88	±11,32	55	±5,30	0,002**	2.324x10 ⁻¹² ***

Fuente: autor.

N = Número de recorridos.

*=p<0,05, **=p<0.01, ***=p<0.001

3.4.2 Características del tráfico (aforo vehicular y velocidad promedio) versus exposición de los bicisuarios a las concentraciones de contaminantes del aire estudiados.

Para establecer la influencia que tuvieron las variables de actividad vehicular, las variables meteorológicas y de contaminación de fondo, sobre la exposición de los bicisuarios a las concentraciones de CO, PUF, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y carbono negro, se utilizaron modelos de regresión Lasso, teniendo en cuenta la colinealidad encontrada entre las variables dependientes. Como se mencionó anteriormente, se corrieron modelos para los dos niveles de exposición por separado.

Las variables están dentro de tres categorías:

- Fuentes: corresponden a las fuentes de emisión paralela a los recorridos de los bicisuarios, determinadas por los aforos de cada uno de los tipos de vehículo.

- Meteorología: velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa, medidas en la estación de calidad del aire más cercana.
- Contaminación de fondo: concentraciones de contaminantes medidos por la estación de calidad del aire más cercana.

Para describir el impacto de cada variable independiente, y su respectivo coeficiente en el modelo Lasso, se definió la siguiente clasificación de colores:

- **Gris:** la variable no se incluyó en el respectivo modelo
- **Verde:** la variable obtuvo un coeficiente con efecto positivo
- **Amarillo:** la variable obtuvo un coeficiente con efecto negativo
- **Blanco:** la variable se incluyó en el modelo, pero no tiene un impacto sobre el contaminante.

Del mismo modo, a partir de los coeficientes estandarizados se calculó el impacto relativo (IR) de cada variable, para establecer el peso que tiene cada una de ellas sobre las concentraciones de los contaminantes en la medición de exposición. Lo anterior, se calculó determinado el valor absoluto de cada coeficiente, sumando todos los coeficientes y posteriormente se dividió el valor absoluto de cada coeficiente entre la suma total de coeficientes. En este caso, las celdas rojas reflejan la variable que tuvo un mayor peso con respecto a las demás.

Nivel de exposición alto:

Los resultados de los modelos para el nivel de exposición alto se presentan en la Tabla 3.4-2.

Tabla 3.4-2: Resultados del modelo de regresión Lasso cada uno de los contaminantes del aire monitoreados por exposición personal, para el nivel de **alta exposición**.

		RECORRIDO DE ALTA EXPOSICIÓN									
		PUF		TAM		LDSA		CO	BC	NO2	SO2
CATEGORIA	VARIABLES	IR	Coef.	IR	Coef.	IR	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
Fuentes	MT										
	TX	1%	6,01	12%	-0,01						
	VP	2%	-5,90			3%	-0,01				
	CP	6%	62,81	9%	0,01	8%	0,16				
	TM					2%	0,07				
	BU					0,06%	3,42*10 ⁻⁰³				
	AT			3%	-0,0002	5%	-0,01				
	V. vehi	9%	-1223,98	7%	-0,06	12%	-3,50				
Meteorología	V. viento	5%	-5500,11	5%	-0,36	8%	-19,85				
	Temp	11%	-6067,01	5%	0,1716	12%	-14,09				
	HR			8%	0,05	3%	0,61				
Contaminación de fondo	F _{SO₂}	25%	29180,08	18%	-1,32	16%	38,83				
	F _{O₃}	16%	2325,15	3%	-0,02	18%	-5,17				
	F _{PM_{2,5}}	9%	763,29	30%	0,17	12%	2,19				
	F _{CO}										
	F _{NO₂}										

Fuente: autor.

Motos=MT, taxis=TX, vehículos de uso particular=VP, carga pesada=CP, Transmilenio=TM, buses=U, aforo total=AT y velocidad vehicular promedio=V. vehi, Velocidad del viento=V. viento, Temperatura=TEMP, Humedad relativa=HR, Conc. de fondo de SO₂=F_{SO₂}, Conc. de fondo de O₃=F_{O₃}, Conc. de fondo de PM_{2.5} =F_{PM_{2,5}}, Conc. de fondo de CO=F_{CO}, Conc. de fondo de NO₂=F_{NO₂}, IR=Impacto relativo. Gris: la variable no se incluyó en el respectivo modelo, Verde: la variable obtuvo un coeficiente con efecto positivo, Amarillo: la variable obtuvo un coeficiente con efecto negativo, Blanco: la variable se incluyó en el modelo, pero no tiene un impacto sobre el contaminante, Rojo: variable que tuvo un mayor peso con respecto a las demás.

Para el escenario de alta exposición, ninguna de las variables antes mencionadas tuvo asociación con la exposición a CO, BC, NO₂ y SO₂, de acuerdo con los modelos descritos anteriormente.

Modelo para PUF:

Mediante la aplicación de este modelo a las mediciones de PUF durante días de alta exposición, se encontró un mayor peso de la contaminación de fondo, seguido por el de las variables meteorológicas y, por último, el de las fuentes de emisión paralela al recorrido objeto de estudio. El mayor impacto de la contaminación de fondo y la meteorología sobre el de las fuentes cercanas durante los días de alta exposición resulta un poco contraintuitivo, pero refleja la importancia de la contaminación generada por la ciudad como un todo.

Dentro de las variables de actividad vehicular, se encontró un efecto directo para Taxis y Carga pesada, en contraste con el efecto inverso para el flujo de vehículos particulares, sobre la concentración de PUF. Este efecto contrario puede atribuirse al impacto de la congestión vehicular sobre la generación de este contaminante, pues las emisiones de PUF pueden aumentar cuando la velocidad vehicular es menor, y a la gran diferencia en el aforo de vehículos particulares con respecto al de taxis y vehículos de carga.

Para las variables de concentración de fondo y las meteorológicas, la concentración de fondo de SO_2 y la temperatura tuvieron un efecto proporcional sobre la concentración de exposición de PUF, lo cual es coherente con el papel de ambas variables como promotores de la formación de núcleos de condensación (partículas secundarias) y, por lo tanto, del incremento en la concentración de PUF.

De manera similar, el efecto directo del O_3 se puede atribuir a una mayor reactividad de la atmósfera, que también estaría relacionada con la formación de partículas ultrafinas secundarias.

Finalmente, la velocidad el viento tiene un efecto inverso sobre la concentración de PUF, dado que una mayor velocidad del viento aumenta el transporte y la dispersión de PUF.

Modelo de tamaño promedio de PUF:

Mediante la aplicación de este modelo a las mediciones de tamaño promedio de PUF durante los días de alta exposición, se encontró un mayor peso de las concentraciones de fondo de contaminantes, seguido por las variables relacionadas con la fuente de emisión paralela al recorrido objeto de estudio y, por último, las variables meteorológicas.

Entre las variables de actividad vehicular, se encontró un efecto directo del flujo de vehículos de carga, lo cual permite inferir que este tipo de vehículo estaría emitiendo partículas más gruesas que los otros tipos de vehículos, lo cual es coherente con el tipo de combustible que usan, ya que el Diesel emite partículas de mayor diámetro (86) . Para el flujo de taxis, se encontró lo opuesto, es decir, un efecto inverso, atribuido a que el tipo de partículas emitidas por este tipo de vehículos generaría que el diámetro promedio de PUF sea más bajo.

Por otro lado, se obtuvo un efecto positivo de la humedad relativa en el incremento del diámetro de PUF, presumiblemente por adsorción de humedad por parte de las partículas, lo cual aumenta su tamaño.

Modelo de LDSA:

Para el modelo de LDSA, en el escenario de alta exposición, se obtuvo un resultado similar al modelo de PUF, ya que tuvo un mayor peso la contaminación de fondo, seguida por las variables meteorológicas y, por último, el aporte de las variables relacionadas con la fuente de emisión paralela al recorrido objeto de estudio.

Nivel de exposición Bajo:

Los resultados de los modelos para el nivel de exposición bajo se presentan en la Tabla 3.4-3, donde se puede evidenciar la dificultad de determinar el impacto de las variables estudiadas sobre las concentraciones de Tamaño de partículas ultrafinas, CO, NO₂ y SO₂.

Tabla 3.4-3: Resultados del modelo de regresión Lasso para cada uno de los contaminantes del aire monitoreados por exposición personal, para el nivel de **baja exposición**

		RECORRIDO DE BAJA EXPOSICIÓN									
		PUF		TAM	LDSA		CO	BC		NO ₂	SO ₂
CATEGORIA	VARIABLES	IR	Coef.	Coef.	IR	Coef.	Coef.	IR	Coef.	Coef.	Coef.
Fuentes	MT	9%	45,2084801		13%	0,107754		10%	84,20059		
	TX	6%	-6,07E+01		14%	-0,2414					
	VP	15%	-20,183476		10%	-0,02155					
	CP	5%	-6,85E+01					16%	-3,83E+02		
	TM							20%	2120,851		
	BU	6%	-332,33822		7%	-0,55886		18%	1589,379		
	AT	0,02%	-0,0314544								
	V. vehi	5%	5,96E+02		1%	0,237822		15%	-2,84E+03		
Meteorología	V. viento	12%	-8635,7609		9%	-11,2021		11%	-13492,4		
	Temp							7%	4102,414		
	HR	6%	565,162239		17%	2,51559					
Concentraciones de fondo	FSO ₂	15%	39265,6568		9%	37,83456					
	FO ₃	14%	-1728,7699		20%	-3,95984					
	FPM _{2.5}	6%	970,280062		1%	0,168282		4%	1056,019		
	FCO										
	FNO ₂										

Fuente: autor.

Motos=MT, taxis=TX, vehículos de uso particular=VP, carga pesada=CP, Transmilenio=TM, buses=U, aforo total=AT y velocidad vehicular promedio=V. vehi, Velocidad del viento=V. viento, Temperatura=TEMP, Humedad relativa=HR, Conc. de fondo de SO₂=FSO₂, Conc. de fondo de O₃=FO₃, Conc. de fondo de PM_{2.5}=FPM_{2.5}, Conc. de fondo de CO=FCO, Conc. de fondo de NO₂=FNO₂, IR=Impacto relativo. Gris: la variable no se incluyó en el respectivo modelo, Verde: la variable obtuvo un coeficiente con efecto positivo, Amarillo: la variable obtuvo un coeficiente con efecto negativo, Blanco: la variable se incluyó en el modelo, pero no tiene un impacto sobre el contaminante, Rojo: variable que tuvo un mayor peso con respecto a las demás.

Modelo de PUF: para este modelo se encontró un efecto directo del flujo de motos y un efecto inverso en las demás variables de aforo, a excepción del aforo de

Transmilenio, para el cual no tuvo impacto estadístico en las concentraciones de PUF. Esto se puede atribuir al efecto directo de la velocidad vehicular, teniendo en cuenta que, a mayores velocidades y menor número de vehículos, es decir, menor congestión vehicular, habrá mayor generación de PUF. En contraste, el flujo de motos no se ve tan afectado por los trancones, pues siguen circulando entre los vehículos de mayor tamaño. Del mismo modo, la velocidad vehicular promedio tuvo un efecto inverso. La disminución en la velocidad vehicular se asoció a un incremento en el número de PUF, lo cual es un resultado difícil de explicar desde el punto de vista fenomenológico, pero que podría estar asociado a aceleraciones más bruscas cuando hay menores velocidades, en contraposición a un escenario de velocidades más altas pero constantes.

Por otro lado, se encontró una asociación inversa entre la concentración de fondo de O_3 y los niveles de PUF monitoreados PUF, lo cual se puede atribuir al efecto de fin de semana para el ozono. La formación de ozono es altamente no lineal. Los fines de semana predominan las reacciones de formación de Ozono sobre las de consumo de ozono, pero la formación de PUF no está afectada por este fenómeno. Por lo tanto, se puede establecer que los procesos que forman las PUF se dan menos en el domingo, por lo que hay menos promotores de partículas ultrafinas secundarias, aunque haya más formación de ozono.

Con respecto al tamaño promedio de PUF, ninguna variable mostró una relación en el incremento o disminución del diámetro de dichas partículas, lo cual evidencia el menor impacto de las fuentes de emisión en el escenario de baja exposición.

Modelo de LDSA:

Para LDSA en el escenario de baja exposición, se encontró un efecto inverso del flujo de vehículos particulares, carga pesada y buses y directo de la velocidad vehicular, posiblemente por emisión de partículas relativamente más gruesas con el menor flujo de

estos vehículos a mayor velocidad (menor congestión). Por otro lado, se encontró un efecto directo del flujo de motos y la humedad relativa.

Modelo de BC:

Para BC en el escenario de baja exposición, se encontró un mayor aporte de las fuentes de emisión con flujo paralelo al recorrido, seguido por las variables meteorológicas y la contaminación de fondo.

Para las variables de fuente, se encontró un efecto directo del flujo de motos, buses y aforo total y un efecto negativo para el Transmilenio, siendo este último un resultado inesperado, pues está conformado por motores Diesel que típicamente son emisores de BC. Por otro lado, la velocidad vehicular tuvo un efecto inverso, lo cual es coherente, considerando que el incremento de las concentraciones de BC se pueden atribuir a aceleraciones más bruscas que se presentan en condiciones de menor velocidad.

Para las variables meteorológicas, se encontró el mismo efecto inverso encontrado en el escenario de alta exposición, confirmando el efecto de mayor transporte y dispersión a mayor velocidad del viento.

Para las variables de concentración de fondo, se encontró el efecto directo de la concentración de $PM_{2.5}$ sobre el BC, lo cual es coherente teniendo en cuenta que el BC es uno de los componentes más importantes del $PM_{2.5}$ (87).

3.5 Resultados del objetivo 4. Asociación entre la dosis inhalada de contaminantes y el cambio en los niveles

de COHb y la respuesta respiratoria antes y después de cada trayecto.

3.5.1 Asociación entre DEE de CO y cambio en los niveles de COHb

Para establecer la asociación entre la DEE de CO y el cambio en los niveles de COHb se realizaron dos análisis diferentes, en el análisis 1 se realizaron correlaciones y modelos de regresión simple. Por otra parte, en el análisis 2 se realizó un modelo lineal de efectos mixtos, teniendo en cuenta que se evidencio que estudios con metodología similar utilizaron este análisis estadístico en particular (88–90).

3.5.1.1. Análisis 1 para la asociación entre DEE de CO y cambio en los niveles de COHb

Se encontró una buena correlación entre la DEE (dosis inhalada) de CO y el porcentaje de cambio de COHb ($r=0.7571$), lo mismo ocurrió entre la dosis inhalada de CO y el delta de COHb ($r=0.6849$). Sin embargo, para explorar si la concentración promedio ambiental de CO tiene un mayor impacto que la DEE de CO, se realizaron las mismas correlaciones, incluyendo la variable de concentración promedio de CO, en vez de la dosis inhalada de CO, obteniendo una correlación más baja, tanto con el porcentaje de cambio de COHb ($r=0.4838$) como con el delta de COHb ($r=0.4767$). Tabla 3.5-1.

Los anteriores resultados corroboran, que desde el punto de vista toxicológico, siempre será mejor trabajar con el valor de la dosis inhalada, la cual tiene en cuenta parámetros como la tasa de inhalación del contaminante en el individuo, el tiempo de exposición y el peso corporal del voluntario.

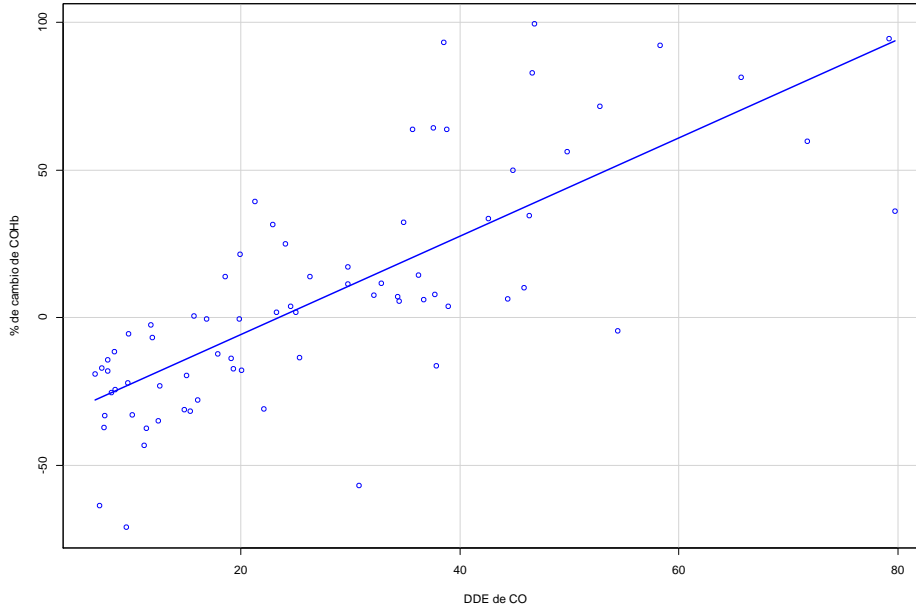
Tabla 0-1: Correlación entre el cambio en los niveles de COHb (porcentaje de cambio de COHb y Delta de COHb) y la exposición a CO (Dosis de Exposición Estimada (DEE) de CO y Concentración promedio de CO).

X	Y	Porcentaje de cambio de COHB	Delta de COHb
		r-pearson	r-pearson
DEE de CO		0,7571	0.6849
concentración de CO		0,4838	0.4767

Fuente: autor

Partiendo de lo anterior, se realizó la siguiente gráfica para la correlación entre la Dosis de Exposición Estimada (DEE) a CO y el porcentaje de cambio de COHb. La gráfica muestra una relación relativamente lineal que corrobora la correlación encontrada.

Gráfica 0-1: Gráfica de mínimos cuadrados entre las variables, Dosis de Exposición Estimada (DEE) a CO y el porcentaje de cambio de COHb.



Fuente: autor.

Teniendo en cuenta la buena correlación entre el cambio de COHb y la DEE de CO, se elaboró un modelo de regresión lineal simple para establecer el impacto de la DEE de CO sobre el delta de COHb y el porcentaje de cambio COHb, con una beta de 0.04368 y 1.661, respectivamente. Los coeficientes de determinación para el delta de COHb y el porcentaje de cambio COHb fueron 0.4617 y 0.5672, respectivamente, considerándose significativos estadísticamente. Tabla 3.5-2. Así, por ejemplo, puede decirse que para este grupo de individuos y para el Delta de COHb, por cada incremento en la inhalación de 1 µg de CO por peso corporal, se incrementará en 0.043 el % de COHb en la sangre.

Tabla 0-2: Correlación entre la Dosis de Exposición Estimada (DEE) de CO y el cambio en los niveles de COHb (delta de COHb y % de cambio de COHb).

PREDICTORES	MODELO-Delta de COHb		MODELO-% de cambio de COHb	
	Coficiente	P-valor	coeficiente	P-valor
DEE de CO	0.04368	1.70e-11***	1.661	5.99e-15***

Coef. Determinación	0.4617	0.5672
P-valor	1.70e-11***	5.99e-15***

*=p<0,05, **=p<0.01, ***=p<0.001

Fuente: autor.

Teniendo en cuenta que las variables de cambio de los niveles de COHb, antes y después del recorrido (% de cambio de COHb y Delta de COHb), se correlacionaron mejor con la Dosis de Exposición Estimada (DEE) de CO que, con la concentración ambiental promedio de CO, es necesario que los estudios se enfoquen en cuantificar la dosis inhalada de contaminantes como medida representativa de la exposición personal a contaminantes atmosféricos, más allá del monitoreo de los contaminantes.

3.5.1.2. Análisis 2 para la asociación entre DEE de CO y cambio en los niveles de COHb (modelo lineal de efectos mixtos)

Se realizó un modelo lineal de efectos mixtos para el delta de COHb, donde se seleccionó tanto el intercepto como pendiente aleatoria para analizar el cambio de cada coeficiente de las variables de efectos fijos, al separarlo por el nivel de exposición. Del mismo modo, se seleccionaron como variables explicativas, efectos fijos y aleatorios, las siguientes variables:

Variables explicadas (Y): delta de COHb

Efectos fijos: DEE de CO, duración del recorrido en minutos y frecuencia cardiaca media durante el recorrido.

Efectos aleatorios: Índice de Masa Corporal (IMC) categorizada, Sexo del participante y edad del participante, en términos si es mayor o menor a 22 años, es decir, se utilizó como variable categórica.

En la tabla 3.5.1-1 se muestran los resultados para el modelo, se presenta un coeficiente del modelo completo (β_{completo}) con un p-valor para cada variable de efecto fijo, así como los respectivos coeficientes para el recorrido de alta y de baja exposición por separado

(β separado). Lo anterior, para evidenciar el cambio de los coeficientes para los resultados del nivel de exposición alto del bajo. Las variables DEE de CO y duración del recorrido fueron estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

Para la DEE de CO, se encontró un efecto positivo tanto para el coeficiente completo como para los coeficientes separados de los dos niveles de exposición, sin una diferencia apreciable entre ellos, lo que significa que independiente del nivel de exposición a la cual se exponga el biciusuario la DEE de CO influirá de la misma manera sobre el cambio en el delta de COHb.

Para la duración del recorrido se evidenció un efecto negativo sobre el delta de COHb, es decir, entre más tarde el voluntario en realizar el recorrido menor será el cambio en los niveles de COHb, efecto que es mayor en el recorrido de baja exposición. Lo anterior, se puede explicar en el hecho que el terminar el recorrido en menor tiempo significa un mayor esfuerzo y, por ende, un incremento en la frecuencia respiratoria y una mayor dosis DEE de CO.

Tabla 0.1-1: Modelo lineal de efectos mixtos para evaluar el impacto de la DEE de CO sobre el cambio de COHb, ajustados por los efectos aleatorios de Índice de Masa Corporal (IMC), sexo del participante y edad del participante.

Predictores	ESCENARIO	Delta de COHb		
		β completo	<i>p</i> -valor	β separado
DEE de CO	Alta	0,0454489	0,00001***	0,0477
	Baja			0,0450
DURACIÓN	Alta	-0,0427043	0,0213*	-0,0013
	Baja			-0,0824
FCmed	Alta	0,0036659	0,5752	-0,0013
	Baja			0,0085

FCmed=frecuencia cardiaca media

*= $p < 0,05$, **= $p < 0,01$, ***= $p < 0,001$

Fuente: autor.

3.5. Asociación entre las dosis inhaladas de los contaminantes y el cambio en los parámetros espirométricos.

Para establecer la asociación entre la dosis inhalada de contaminantes y cada parámetro espirométrico se realizaron dos análisis diferentes, en el análisis 1 se realizaron modelos de regresión múltiple. Por otra parte, en el análisis 2 se realizaron modelos lineales de efectos mixtos, teniendo en cuenta se evidencio que estudios con metodología similar utilizaron este análisis estadístico en particular (88–90).

3.5.2.1. Análisis 1 (modelo regresión lineal múltiple)

Para establecer la asociación entre la dosis inhalada de contaminantes y cada parámetro espirométrico se realizó un modelo regresión lineal múltiple, con el fin de predecir que tanto se puede alterar (variabilidad) el parámetro respiratorio al cambiar la dosis inhalada de contaminantes, en donde la variable explicada sería el parámetro espirométrico y los predictores corresponden a las Dosis de Exposición Estimada (DEE) de contaminantes, tamaño promedio de PUF y LDSA. El coeficiente de determinación explica el impacto de X sobre Y, la significancia estadística ($p < 0.05$) explica que la variable X influye sobre la Y. Además, se incluyó una variable dicotómica para el nivel de exposición, en términos de alto/bajo.

VARIABLES EXPLICADAS (Y): capacidad Vital Forzada (CVF), Volumen Espiratorio forzado en el primer segundo (VEF_1), Flujo espiratorio máximo (*FEM*, por sus siglas en inglés) y el flujo espiratorio medio $MMEF_{25\%-75\%}$.

VARIABLES EXPLICATIVAS (X): DEE de PUF, BC, CO, NO₂, SO₂, tamaño promedio de PUF y Área de Superficie Depositada en los pulmones (*LDSA*, por sus siglas en inglés).

Al correr esta regresión lineal múltiple, se obtuvo una significancia estadística para la relación entre la DEE a CO y el tamaño de la partícula sobre el flujo espiratorio medio $MMEF_{25\%-75\%}$.

El modelo MMEF25-75 se analiza de la siguiente manera: para MMEF25-75 (flujo promedio espiratorio forzado 25-75) el mejor modelo fue el que incluyó las DEE de CO con un efecto negativo y el tamaño promedio de partículas ultrafinas, esta última con un efecto positivo. La DEE de CO con un efecto negativo ($\beta=-0.00105$), se puede interpretar de la siguiente manera: Por cada incremento en un miligramo de CO/Kg de peso corporal en la DEE de CO durante el recorrido, se disminuyó en un 0.105% el MMEF25-75, después del recorrido, con respecto a su valor inicial, aproximadamente y por la disminución en el tamaño de las PUF, se va a disminuir el MMEF25-75. La tabla 3.5-3 presenta los resultados del modelo de regresión lineal múltiple.

Tabla 3.5-3: Mejores modelos para evaluar el impacto de las dosis inhaladas de contaminantes sobre cada uno de los parámetros.

PREDICTORES	MODELO-CVF		MODELO-VEF1		MODELO-FEM		MODELO-MMEF25-75	
	coeficiente	P-valor	coeficiente	P-valor	coeficiente	P-valor	coeficiente	P-valor
DOSIS_PUF_R1	-	-	-	-	-	-	-	-
DOSIS_BC_R1	-	-	-	-	-3.817E-6	0.0828	-	-
DOSIS_CO_R1	-	-	-	-	-	-	-0.00105	0.0398*
DOSIS_NO ₂ _R1	-	-	-	-	-	-	-	-
DOSIS_SO ₂ _R1	-	-	-	-	-	-	-	-
TAMAÑO_R1	-	-	-	-	-	-	0.003817	0.0313*
LDSA_R1	-	-	-	-	-	-	-	-
NIVEL DE EXPOSICIÓN	-0.0164	0.082	-0.01565	0.128	-2.062E-2	0.9351	-	-
Coef. Determinación	0.0286		0.01839		0.04122		0.09137	
<i>P-valor</i>	0.08219		0.1282		0.08371		0.01243*	

*= $p < 0,05$, **= $p < 0,01$, ***= $p < 0,001$

Fuente: autor.

A continuación, se presentan los resultados del modelo de regresión lineal múltiple para cada uno de los parámetros espirométricos:

Ninguno de los resultados de la regresión lineal múltiple fue significativo para los diferentes escenarios, a excepción del modelo DEE y tamaño de partícula vs flujo espiratorio medio $MMEF_{25\%-75\%}$, se presenta a continuación una breve descripción de cada modelo.

Modelo para la CVF: Si bien este modelo no fue significativo, la variable que explicó la variabilidad del modelo fue el escenario de exposición (bajo y alto) a contaminantes, con un efecto negativo ($\beta=-0.0164$), el cual se puede interpretar de la siguiente manera: Cambiar del escenario de exposición bajo al alto, disminuye en un 1.64 % la capacidad vital forzada después del recorrido, con respecto a su valor inicial, aproximadamente.

Modelo para VEF_1 : al igual que para el modelo de CVF se identificó una variable que explicó la variabilidad del modelo, correspondiente al escenario de exposición a contaminantes bajos y altos, con un efecto negativo ($\beta=-0.01565$), el cual se puede interpretar de la siguiente manera: Realizar el escenario de exposición alto, disminuyó en un 1.56 % el Volumen Espiratorio forzado en el primer segundo después del recorrido, con respecto a su valor inicial, aproximadamente.

Modelo FEM: para el flujo espiratorio máximo, el mejor modelo fue el que incluyó la DEE de BC y la variable dicotómica de escenario de exposición a contaminantes (bajo y alto), las dos con efectos negativos, $\beta=-3.817E-6$ y $\beta=-2.06E-6$, respectivamente, los cuales se pueden interpretar de la siguiente manera:

- **DEE de BC:** por cada incremento en un nanogramo de BC/Kg de peso corporal, en la DEE de BC durante el recorrido, se disminuyó un $3.82E-4$ % el flujo espiratorio máximo después del recorrido, con respecto a su valor inicial, aproximadamente.
- **Escenario de exposición a contaminantes:** cambiar del escenario de exposición bajo al alto, disminuyó en un 2.06% el Flujo Espiratorio Máximo después del recorrido, con respecto a su valor inicial, aproximadamente.

DEE PUF	Alta	0,000000001	0,5082	2,30E-13	0,000000001	0,6046	1,29E-11	0,000000001	0,9519	6,46E-12	0,000000001	0,3868	8,93E-12
	baja			5,58E-12			-1,42E-11			-9,31E-13			-1,96E-11
DEE BC	Alta	-0,00000374	0,3086	3,44E-06	-0,00000089	0,7504	4,33E-06	-0,00000525	0,201	2,19E-06	0,00000236	0,5994	1,69E-06
	baja			-5,11E-06			-4,61E-06			-7,13E-06			2,50E-06
DEE CO	Alta	-0,00051263	0,3681	0,000712	-0,00034611	0,3402	0,000442	-0,00064499	0,2423	0,000360899	-0,00150882	0,0635	-0,000329
	baja			-0,00075			-0,00091			-0,000911345			-0,0017483
DEE NO2	Alta	0,00000572	0,9957	0,001164	0,00143075	0,1792	0,002438	0,00051299	0,7103	0,00139299	0,00036227	0,8689	1,78E-03
	baja			-0,000228			0,000712			0,000279468			2,88E-05
DEE SO2	Alta	0,00120692	0,3878	0,000958	-0,00008022	0,9571	-0,00047	0,00248122	0,3266	-0,000908	0,0019446	0,5947	-0,0025627
	baja			0,001293			0,000205			0,003653149			0,00286156
TAMAÑO DE PUF	Alta	-0,00134089	0,216	-0,001108	-0,00111038	0,4372	0,001376	-0,00187453	0,2126	-0,001505313	0,00179474	0,4499	0,00304304
	baja			-0,001409			-0,00293			-0,002089113			0,00151209
DEE DSA	Alta	0,00002406	0,7557	-9,66E-05	0,00005162	0,5948	-0,00025	0,00004334	0,6777	-4,05E-05	0,0002283	0,3604	-0,0001366
	baja			4,51E-05			0,000268			4,74E-05			0,00030796

*=p<0,05, **=p<0.01, ***=p<0.001

Modelo VEF1: ninguna variable fue significativa. Sin embargo, la única variable con el mismo efecto en los niveles de exposición alto y bajo fue DEE NO2, con un efecto positivo. Para las variables restantes se encontraron efectos diferentes entre los dos niveles de exposición.

Modelo FEM: ninguna variable fue significativa. Sin embargo, las variables con el mismo efecto en los niveles de exposición alto y bajo fueron DEE NO2 y Tamaño de PUF, con un efecto positivo y negativo, respectivamente. Para las variables restantes se encontraron efectos diferentes entre los dos niveles de exposición.

Modelo MMEF25-75: ninguna variable fue significativa. Sin embargo, la variable DEE de CO estuvo cerca al valor de significancia con un p-valor de 0,06. Por otra parte, las DEE de BC, DEE de CO, DEE de NO2 y Tamaño de PUF evidenciaron un mismo efecto en los niveles de exposición alto y bajo. Para las variables restantes se encontraron efectos diferentes entre los dos niveles de exposición.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

- En el presente estudio, el 100% de los voluntarios correspondió a estudiantes de diferentes facultades de la Sede Bogotá, pertenecientes a una población joven, sin sobrepeso y en su mayoría hombres. El 62 % reportaron haber utilizado la bicicleta entre 1 y 3 años, y el 70 % ha usado la bicicleta como medio de transporte todos los días de la semana. La duración promedio del trayecto desde la casa hasta la Universidad, en el 73 % de los recorridos duró entre 10 y 40 minutos.
- En términos de calidad del aire, en el escenario de alta exposición, los biciusuarios que participaron en el estudio estuvieron expuestos a concentraciones de contaminantes del aire más altas que en el escenario de baja exposición, a excepción del contaminante *Black Carbon*, para el cual no se encontró diferencia estadísticamente significativa entre las concentraciones obtenidas en los dos escenarios de exposición, lo cual fue un resultado inesperado, teniendo en cuenta que este contaminante es producido por la quema de combustibles fósiles.
- Los voluntarios inhalan (DEE) más contaminantes en el escenario de alta exposición que en el de baja. Para las PUF, en promedio, inhalan 83% más partículas ultrafinas en el escenario de alta exposición que en el de baja exposición; así mismo, para el escenario de alta exposición, en promedio, las DEE de SO₂ obtuvieron un incremento del 192%, con respecto al escenario de baja exposición. Lo anterior, es importante teniendo en cuenta que toxicológicamente se conoce que el SO₂ causa broncoconstricción y las PUF causan respuesta inflamatoria a nivel pulmonar.
- Los biciusuarios que usan la ciclovía que parte de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá saliendo de la Calle 45 con la Carrera 30, por la avenida Norte-Quito-Sur *ciclorruta* carril sur-norte hasta la Calle 94 antes del puente que desemboca en la Autopista Norte, presentaron una mayor exposición los días entre semana de alto flujo vehicular que los días domingo.

- Los niveles de COHb después del recorrido de alta exposición fueron significativamente mayores a los niveles del escenario de baja exposición, siendo 41% más altos, en promedio, y confirmando una mayor contaminación por CO en los recorridos realizados entre semana en hora pico y con un alto flujo vehicular.
- El cambio en los niveles de COHb obtenidos antes y después de los recorridos, se correlacionó mucho mejor con la Dosis de Exposición Estimada (DEE) de CO que con la concentración promedio de CO en el aire. Por lo tanto, la DEE es un mejor estimador de impacto tóxico en los individuos expuestos a la contaminación por CO que la concentración promedio ambiental de CO, puesto que la dosis de inhalación a CO refleja de manera más cercana a la cantidad de este tóxico que está inhalando de forma efectiva el voluntario.
- Se evidenciaron niveles de COHb al llegar a la universidad de 4,6 y 7,5%, para los recorridos de alta y baja exposición, respectivamente, lo cual es relevante considerando que se han reportado en la literatura indexada, efectos en la orientación temporal a partir de 2,5 % de COHb, deterioro en las facultades psicomotrices y alteraciones cardiovasculares, entre el 5 y 10% de COHb (12).
- Los altos niveles de COHb reportados para algunos voluntarios antes de realizar los recorridos definidos en el estudio, se podrían atribuir a la exposición a CO presente durante su desplazamiento desde la casa hasta la Universidad.
- Para el impacto de DEE de CO sobre el cambio en la COHb, se encontró un efecto positivo para los dos niveles de exposición, sin una diferencia apreciable entre ellos, lo que significa que independiente del nivel de exposición del biciusuario, la DEE de CO influirá de la misma manera sobre el cambio en el delta de COHB.
- La duración del recorrido tiene un efecto negativo sobre el cambio en los niveles de COHb, es decir, entre más tarde el voluntario en realizar el recorrido, menor será el cambio en los niveles de COHb, efecto que es mayor en el recorrido de baja exposición.

- Para establecer el impacto de la exposición a CO, se encontró que el incremento de 1 mg de CO/Kg de peso corporal en la DEE de CO, resultaría en un incremento en los niveles de COHb de 0.04%, aproximadamente. Por consiguiente, inhalar 1 mg de CO/Kg de peso corporal en la DEE de CO resultaría en incrementar la saturación de COHb hasta un 4,0%, niveles donde se han descrito afectaciones en la orientación temporal.
- Cuantificar la COHb antes del recorrido en un escenario de exposición crítico, como lo son las horas pico de la mañana entre semana, permite establecer los niveles de COHb con los cuales los biciusuarios llegarían a la Universidad para desarrollar actividades laborales, académicas, administrativas y/o deportivas, siendo esto de gran importancia ya que diversos estudios han descrito los efectos deletéreos cognitivos y neurológicos, así como la capacidad de disminución en el rendimiento deportivo en los individuos, inclusive a bajos niveles de Carboxihemoglobina (91).
- Con relación a las pruebas de función pulmonar, No se encontró en la medición basal, alteración en el patrón espirométrico de los parámetros evaluados.
- Se obtuvo significancia estadística entre el FEM o “flujo pico”, antes y después de realizar el trayecto, con una disminución global del 11% con respecto al promedio general del FEM antes de los recorridos realizados.
- Se encontró diferencia estadística para el VEF_1 y el MMEF25-75 (L/s), en las espirometrías realizadas después del recorrido, entre los dos niveles de exposición.
- Dado que el VEF_1 es el índice espirométrico más representativo de la capacidad ventilatoria global, se observó que al incrementar el nivel de contaminación, el VEF_1 disminuye del 3%, después del recorrido de alta exposición en comparación con el de baja exposición.
- La variación del MMEF25-75 (L/s), utilizado para el diagnóstico de las alteraciones obstructivas leves que no afectan al VEF_1 , se obtuvo significancia estadística entre el MMEF25-75 después del recorrido entre los escenarios de alta y baja exposición, disminuyendo este índice de manera importante (2,26 L/s ó 51.13% menos) después

del recorrido de alta exposición; es decir, que al realizar ejercicio en un escenario de baja contaminación, el flujo medio espiratorio forzado 25-75 de la CVF mejora, inclusive aumenta hasta un 44.9%, en el grupo estudiado.

- Este proyecto cumplió con altos estándares de calidad y rigurosidad en su análisis, puesto que se corrieron varios modelos para tratar de comprender el comportamiento de las variables.
- El único modelo de regresión lineal múltiple estadísticamente significativo que permitió predecir la variabilidad de los parámetros espirométricos por la exposición a los diferentes contaminantes estudiados en los dos niveles de exposición, fue el parámetro MMEF25-75, para el cual, los dos predictores fueron DEE de CO y tamaño promedio de PUF. Siendo este parámetro ventilatorio un indicador de alteraciones obstructivas leves que no afectan al VEF_1 se puede concluir, que los voluntarios pueden estar presentando incipientes alteraciones obstructivas que se reflejan en cambios leves a nivel de los bronquios de mediano y pequeño calibre, al exponerse al CO y PUF.
- No se encontró asociación entre variables de emisión, meteorológicas y de contaminación de fondo, sobre el diámetro promedio de partículas ultrafinas, CO, NO₂ y SO₂, en el escenario de baja exposición. Del mismo modo, para el escenario de alta exposición, ninguna de las variables antes mencionadas tuvo relación con la exposición a CO, BC, NO₂ y SO₂.
- Para el tamaño promedio de PUF en el modelo de alta exposición, se encontró un efecto directo del flujo de vehículos de carga pesada, lo cual se puede atribuir a que este tipo de vehículo estaría emitiendo partículas más gruesas. Para el flujo de taxis, se encontró lo opuesto, es decir, el bajo diámetro de las partículas emitidas por los taxis genera que el promedio del diámetro de partículas sea más bajo.
- Para el modelo de PUF en el escenario de baja exposición, se encontró un efecto directo del flujo de motos y efectos inversos en las demás variables de aforo, a excepción del Transmilenio, para la cual no tuvo ningún impacto en las concentraciones de PUF.

- Para la exposición a BC, ninguna variable fue relevante en el escenario de alta exposición. Sin embargo, para el escenario de baja exposición se encontró un aporte directo del flujo de motos, buses y aforo total. Por otra parte, la velocidad vehicular tuvo un efecto inverso.
- Para los dos niveles de exposición, el efecto directo de la velocidad del viento obtuvo un resultado coherente, con un coeficiente positivo en su relación con la exposición a PUF y BC, confirmando el efecto de transporte y dispersión.
- Al igual que con los modelos de regresión lineal múltiple, aplicando los modelos lineales de efectos mixtos, se encontró dificultad para identificar los efectos de la DEE de contaminantes sobre los parámetros espirométricos. Sin embargo, los modelos lineales de efectos mixtos permiten establecer las variables que presentan resultados diferentes en los dos niveles de exposición, lo cual permite identificar dentro de cada nivel de exposición variables que estén influyendo en el resultado, o también permite diseñar estudios más específicos enfocado en uno de los niveles de exposición.

4.2. Recomendaciones

- Para la academia, se recomienda continuar desarrollando proyectos dentro de la línea de investigación del Monóxido de Carbono, estudiando los niveles de COHb en ciclistas, teniendo en cuenta los altos niveles encontrados en los biciusuarios, así como realizar comparaciones entre tipos de ciclорrutas y diferentes poblaciones. Del mismo modo, complementar los estudios con otros biomarcadores toxicológicos, tanto de efecto como de exposición.
- Para los tomadores de decisiones, se recomienda, continuar desarrollando mediciones de los niveles de COHb en los ciclistas, hacer vigilancia y seguimiento comparando los diferentes tipos de ciclорrutas, y evaluar la efectividad de factores de protección para la exposición a CO, tales como mascarar con filtros. Dentro de la etapa de diseño de ciclорrutas, tener en cuenta aspectos que disminuyan la exposición a contaminantes

del aire, principalmente el CO. Del mismo modo, se recomienda hacer diagnósticos de alternativas entre diferentes ciclorrutas proyectadas y/o evaluar las existentes, dando con especial prioridad la Dosis de Exposición Estimada (DEE) de CO durante el recorrido, sobre las mediciones de las concentraciones ambientales de CO, y que tanto se podrían incrementar los niveles de COHb, y complementarlo con los niveles de COHb medidos y procurar que no se sobrepase del 2.5%. Así mismo, se recomienda promover el flujo de ciclistas en zonas y horas de baja actividad vehicular.

- Se recomienda desarrollar estudios que puedan identificar variables propias del individuo y de la ruta desde el domicilio hasta la Universidad, que afecten los niveles de COHb, y lo que es más importante aún, identificar factores de protección eficaces para disminuir estos niveles, tales como cambios de rutas, bajar la intensidad del ejercicio y usar máscaras con filtros, las cuales se han popularizado en los últimos años.
- Para próximos estudios se recomienda recolectar información detallada de las rutas previas usadas por los biciusuarios antes de llegar a la Universidad, con el uso de cámaras equipadas en el biciusuario y el monitoreo de la exposición a contaminantes, principalmente la concentración de CO.
- Se recomienda igualmente, estudiar el impacto de los picos de contaminación, es decir, aquellos valores extremos a los cuales las personas se pueden exponer en un corto periodo de tiempo, pero que pueden tener un impacto sobre la salud de las personas.
- Del mismo modo, para obtener un dato más detallado y específico del cálculo de Dosis de Exposición Estimada (DEE) para cada individuo, tanto para el CO, como para otros contaminantes, se recomienda la realización de ergoespirometrías, las cuales permiten conocer de una manera más precisa, el comportamiento respiratorio y calcular la tasa de inhalación para diferentes rangos de frecuencia cardiaca durante el esfuerzo, e interpolar posteriormente a los datos tomados en campo; con el fin de armonizar los valores de tasa de inhalación específica con los datos de concentración promedio de CO, para cada trayecto.

- Se recomienda continuar estudiando en biciusuarios, el efecto de los contaminantes producto del tráfico vehicular sobre el VEF_1 y el “flujo Pico”, así como la MMEF25-75, teniendo en cuenta que este último parámetro presentó una alteración estadísticamente significativa, con un efecto igualmente negativo para la DEE de CO y positivo para el tamaño de PUF.
- Se recomienda continuar estudiando el efecto de las variables de tráfico discriminado sobre las PUF y otros contaminantes, para incluir estas variables dentro de los modelos de predicción de calidad del aire, para lo cual se requiere un flujo de información entre las entidades ambientales y en materia de movilidad.

5. Limitaciones

Si bien el tamaño de la muestra de estudio fue calculado estadísticamente con base en las publicaciones internacionales y el cambio en los niveles de COHb, hubiera sido deseable contar con una muestra mayor para fortalecer el análisis de los resultados.

No se logró obtener en la muestra de voluntarios estudiados la participación de adultos mayores a 38 años, docentes de la Universidad ni funcionarios administrativos de la Sede.

Los voluntarios que participaron en el estudio eran en su mayoría de la Facultad de Medicina.

Los voluntarios que participaron en el estudio eran en su mayoría de sexo masculino.

No fue posible medir por exposición personal las concentraciones de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 , dado el peso de estos equipos y la repercusión sobre el rendimiento del biciusuario y los resultados del estudio.

Se presentaron dificultades por el incumplimiento en la hora de llegada por parte de los voluntarios.

Se presentaron dificultades por las condiciones meteorológicas, teniendo en cuenta que si antes o durante el recorrido llovía, se debía reprogramar la actividad.

En número de covariables a incluir en los modelos de regresión lineal múltiple se vio limitado al número de datos recolectados y al tamaño de muestra estudiado.

**ANEXO A: aval por el Comité de Ética mediante Acta N°
012-208-18 del 27 de agosto de 2018:**



ACTA DE EVALUACIÓN: N°. 012-208-18
 Fecha: 27 de agosto de 2018

Nombre completo del proyecto "IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN PRODUCTO DEL TRÁFICO VEHICULAR SOBRE LOS NIVELES DE CARBOXIHEMOGLOBINA Y LA RESPUESTA RESPIRATORIA AGUDA EN CICLISTAS URBANOS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA-SEDE BOGOTÁ".

Versión: 01

Sometido por: el estudiante Oscar David Díaz Fonseca,

Dirigido por: los profesores Alba Isabel Rodríguez Pulido y Néstor Rojas Roja

Presentado por: la profesora Alba Isabel Rodríguez Pulido, Coordinadora Académica

Departamento o Sección: Maestría en Toxicología de la Facultad de Medicina

Fecha en que fue sometido a consideración del Comité: 27 de agosto de 2018

EL COMITÉ DE ÉTICA DE INVESTIGACION DE LA FACULTAD DE MEDICINA. Se constituyó mediante la Resolución 152, (Acta No. 43 del 5 de diciembre de 1996) actualizado mediante resolución 008 (acta 03 de 27 de enero de 2011), de Consejo de Facultad el Comité de Ética de Investigación, el cual está regido por la Resolución 008430 del 4 de octubre de 1993 del Ministerio de Salud de Colombia que estableció las normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud; los principios de la Asamblea Médica Mundial expuestos en su Declaración de Helsinki de 1964, última revisión del año 2000; y el código de regulaciones federales, título 45, parte 46, para la protección de los sujetos humanos, del departamento de salud y servicios humanos de los institutos Nacionales de Salud de los Estados Unidos (Junio 18 de 1991).

1. Sus miembros revisaron los siguientes documentos del presente proyecto:

- ✓ Carta de presentación del proyecto generada por la unidad básica o el departamento.
- ✓ Copia de la evaluación de los jurados o pares académicos que evaluaron y aprobaron el trabajo)
- ✓ Copia del proyecto completo de investigación.
- ✓ Dos resúmenes ejecutivos.
- ✓ Dos copias del consentimiento informado (en español y cuando la investigación lo amerite).
- ✓ Hojas de vida resumidas de los investigadores y coinvestigadores del proyecto
- ✓ Consideraciones éticas según resolución 8430 Ministerio de Salud.
- ✓ Resultados de evaluación por otros comités (si aplica)

2. El presente proyecto fue evaluado y aprobado por los siguientes miembros del Comité:

- | | | |
|---|--------------------------------|---|
| 1 | Arteaga Díaz Clara Eugenia | Pensionada Dpto. de Morfología |
| 2 | Camargo Mendoza Maryluz | Departamento de la Comunicación Humana |
| 3 | Díaz Cruz Luz Amparo | Departamento de Obstetricia y Ginecología |
| 4 | Duarte Gutiérrez Liz Marcela | Asesora Jurídica Facultad de Medicina |
| 5 | Dueñas Gómez Zulma Janeth | Departamento de Ciencias Fisiológicas |
| 6 | Guerrero Fonseca Carlos Arturo | Presidente Comité de Ética / Dpto. de Ciencias Fisiológicas |
| 7 | Parra Pineda Mario Orlando | Departamento de Obstetricia y Ginecología |



[Página 1/1]
 Elaboró Jeannette Pineda A.

Carrera 30 N°. 45-03 Patrimonio
 FACULTAD DE MEDICINA, Edificio 471 - 1 piso, Of:136 de todos
 Comutador: (57) (1) 316 5000 ext. 15167 los colombianos
 Bogotá, Colombia
eticasalud_fmboq@unal.edu.co

Comité de Ética
Facultad de
Medicina



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Sede Bogotá

3. El Comité consideró que el presente estudio:

- a. Es válido desde el punto vista ético. La investigación involucra un riesgo igual al promedio para los sujetos que participan en ella. La investigación se ajusta a los estándares de la buena práctica clínica.
- b. El Comité considera que las medidas que están siendo tomadas para proteger a los sujetos humanos son adecuadas.

4. El Comité informará inmediatamente a las directivas institucionales:

- a. Todo desacato de los investigadores a las solicitudes del Comité.
- b. Cualquier suspensión o terminación de la aprobación por parte del Comité.

5. El Comité informará inmediatamente a las directivas, toda información que reciba acerca de:

- a. Lesiones o daños a sujetos humanos con motivo de su participación en la investigación Problemas imprevistos que involucren riesgos para los sujetos u otras personas.
- b. Cualquier cambio o modificación a este proyecto que haya sido revisado y aprobado por este comité

6. Cuando el proyecto sea aprobado, será por un periodo de un (1) año a partir de la fecha de aprobación.

7. El Investigador principal deberá:

- a. Informar de cualquier cambio que se proponga introducir en el proyecto. Estos cambios no podrán ejecutarse sin la aprobación previa del COMITÉ DE ÉTICA DE LA FACULTAD DE MEDICINA excepto cuando sean necesarios para minimizar o suprimir un peligro inminente o un riesgo grave para los sujetos que participan en la investigación.
- b. Avisar de cualquier situación imprevista que se considere implica algún signo de riesgo para los sujetos o la comunidad o el medio en el cual se lleva a cabo el estudio.
- c. Informar de cualquier evento adverso serio de algún paciente, comunicando la situación al secretario y al presidente del Comité de Ética), de acuerdo con la normatividad que el INVIMA ha generado a este respecto.
- d. Poner en conocimiento del comité toda información nueva importante respecto al estudio, que pueda afectar la relación riesgo/beneficio de los sujetos participantes.
- e. Comunicar cualquier decisión tomada por otros comités con respecto a la investigación que se lleva a cabo.
- f. Informar de la terminación prematura o suspensión del proyecto explicando las causas o razones.
- g. Presentar a este comité un informe cuando haya transcurrido un año, contado a partir de la aprobación del proyecto. Los proyectos con duración mayor a un año, serán reevaluados a partir del informe de avance integrado.
- h. Todos los proyectos deben entregar al finalizar un informe final de cierre del estudio, este cierre puede ser el informe final en formato completo o en formato de resumen de cierre de estudio, firmado por el investigador responsable del estudio.

8. Observaciones:

El comité considera que el proyecto de investigación no presenta dilemas éticos por lo tanto emite Concepto Aprobatorio.

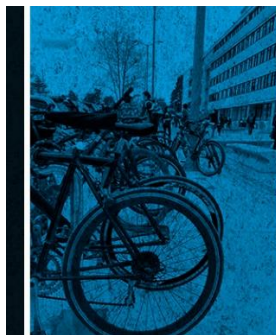
Nombre: CARLOS ARTURO GUERRERO FONSECA
Título: PhD Doctorado en Bioquímica, MSc. en Farmacología y MSc. en Genética Humana
Cargo: Presidente Comité de Ética

[Página 2/2]
Elaboró Jeannette Pineda A.

Carrera 30 N°. 45-03
FACULTAD DE MEDICINA, Edificio 471- 1 piso, Of. 136
Conmutador: (57) (1) 316 5000 ext. 15167
Bogotá, Colombia
eticasalud_fmbog@unal.edu.co

Patrimonio
de todos
los colombianos

ANEXO B: imágenes de divulgación del proyecto en redes sociales y en la página web de la Facultad de Medicina



Convocatoria para participar en investigación

Impacto de la contaminación atmosférica en ciclistas urbanos de la  sede Bogotá.

[Inscríbete aquí](#)



Convocatoria para participar en investigación

Impacto de la contaminación atmosférica en ciclistas urbanos de la  sede Bogotá

[Inscríbete aquí](#)



ANEXO C: encuesta pre-participativa

ITEM
Apellidos
Nombre(s)
Vínculo con la Universidad Nacional de Colombia
Fecha de nacimiento
Edad (al día de hoy)
¿Usted fuma o ha fumado cigarrillo, tabaco o marihuana en el último año?
¿Actualmente sufre de presión arterial alta o baja, diabetes, algún tipo de enfermedad pulmonar, como asma o alguna enfermedad pulmonar obstructiva crónica, cáncer de pulmón, deformación del tórax, o algún tipo de enfermedad cardiovascular?
¿Cuántos semestres ha matriculado a la fecha?
Si respondió la opción "Estudiante" o "Docente" en la pregunta anterior, por favor indique a qué facultad pertenece
¿Cuánto tiempo lleva usando bicicleta como medio de transporte?
¿Cuántos días a la semana utiliza la bicicleta para ir a la universidad?
¿Por qué usa la bicicleta como medio de transporte urbano?
¿Cuánto tiempo dura, aproximadamente, el trayecto desde la universidad hasta su lugar de residencia?
Tomando la universidad como punto de referencia, ¿cuál <i>ciclorruta</i> y sentido usa para desplazarse hacia su lugar de residencia?
¿Usa algún tipo de elemento para protegerse de la contaminación atmosférica?
Según su experiencia, ¿a qué hora del día percibe que el aire está más contaminado?
¿Se ha preguntado cómo podría afectar a su salud la exposición a contaminantes atmosféricos durante cada trayecto?

¿Estaría interesado en participar en un proyecto de investigación que busca medir el impacto agudo de la contaminación atmosférica en biciusuarios de la Universidad Nacional de Colombia?
De haber respondido afirmativamente a la pregunta anterior, por favor escriba un teléfono de contacto
Inquietudes, comentarios y sugerencias
Correo electrónico
De haber respondido afirmativamente, ¿cuál elemento usa?
Si es funcionario de la universidad, en calidad de administrativo o contratista, por favor indique la dependencia a la que pertenece

ANEXO D: consentimiento informado para participar en el estudio

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE MEDICINA – DEPARTAMENTO DE TOXICOLOGÍA
MAESTRÍA EN TOXICOLOGÍA**

CONSENTIMIENTO INFORMADO DE PARTICIPACIÓN EN EL ESTUDIO

Resumen de la metodología

El estudio analizará en biciusuarios de la Universidad Nacional de Colombia, el cambio en los niveles de la Carboxihemoglobina y el flujo espiratorio máximo en dos ambientes de exposición diferentes influenciados por la presencia de contaminantes atmosféricos producto del tráfico vehicular. El primer ambiente será un trayecto llamado “trayecto con exposición directa”, el cual comprende un recorrido ida y vuelta desde y hasta la universidad, que parte de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá saliendo de la Calle 45 con la Carrera 30, por la avenida Norte-Quito-Sur *ciclorruta* carril sur-norte hasta la Calle 94 antes del puente que desemboca en la Autopista Norte, para terminar en la universidad, en una hora de alto tráfico vehicular u hora pico. El segundo recorrido será llamado “trayecto sin exposición directa”, y corresponde al mismo recorrido descrito anteriormente pero realizado en un día festivo.

Yo _____, identificado con la cédula de ciudadanía No. _____, he sido informado(a) que la Maestría en Toxicología de la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia llevará a cabo el proyecto de investigación: “IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN PRODUCTO DEL TRÁFICO VEHICULAR SOBRE LOS NIVELES DE CARBOXIHEMOGLOBINA Y LA RESPUESTA RESPIRATORIA AGUDA EN BICIUSUARIOS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA-SEDE BOGOTÁ”.

Afirmo que he elegido participar libre y voluntariamente en el estudio, entiendo que esto significa realizar 2 recorridos ya establecidos en mi bicicleta y realizar unas pruebas de espirometría, además de la extracción de 10 ml sangre por punción venosa antes y después de cada trayecto, así como responder una entrevista sobre algunos aspectos de mi vida, acerca del uso de la bicicleta como medio de transporte y aspectos relacionados con mis antecedentes de consumo de tabaco y exposición a monóxido de carbono.

De igual forma, llevaré conmigo un equipo de muestreo personal para gases y material particulado durante todo el trayecto. Entiendo que para el desarrollo del proyecto de investigación es necesario realizar una prueba de espirometría y la extracción de sangre por punción venosa. Se me ha informado que se me pueden generar molestias leves asociadas al volumen de aire y de sangre que requieren estas pruebas, las cuales serán minimizadas al ser tomadas por personal altamente capacitado y quienes estarán en disposición de responder cualquier duda o inquietud que podría presentarse.

Entiendo que dentro del estudio no se me realizará ningún tipo de seguimiento laboral o judicial, y dado que mi participación es enteramente libre y voluntaria puedo rehusarme a contestar cualquier pregunta o retirarme voluntariamente en cualquier momento del estudio sin que esto acarree algún tipo de consecuencia.

Comprendo que participar en el estudio conlleva riesgo mínimo, que la información obtenida será tratada de forma confidencial y que no voy a ser identificado personalmente en los resultados del estudio, que no obtendré remuneración económica y el beneficio se recibirá por medio del conocimiento generado en el presente estudio. Si se llegase a presentar algún posible accidente durante los recorridos, dada mi participación libre y voluntaria en el estudio, la atención médica y los gastos derivados de esta eventualidad serán asumidos de la siguiente manera: para los docentes y administrativos voluntarios participantes, por la EPS a la cual me encuentro afiliado/a, el SOAT del vehículo involucrado si es el caso, y si soy estudiante por la POLIZA DE SEGURO DE ACCIDENTES PERSONALES ESCOLAR No. 999202284 de la aseguradora AXA COLPATRIA SEGUROS S.A. contratada por la Universidad Nacional de Colombia.

La presente investigación es conducida por el ingeniero Óscar David Díaz Fonseca, estudiante de la maestría en Toxicología de la Universidad Nacional de Colombia-sede Bogotá. Entiendo que una copia de este consentimiento me será entregada, y que puedo pedir información sobre los resultados de este estudio cuando este haya concluido. Se me ha preguntado si tengo alguna duda acerca del estudio en este momento y si tuviese en el futuro alguna duda del mismo, puedo obtener información en el Departamento de Toxicología, en la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia, o puedo contactar a Oscar Díaz al teléfono XXXXXXXXX.

Yo he leído la información anteriormente proporcionada o me ha sido leída. He tenido la oportunidad de preguntar sobre ella y se me ha contestado satisfactoriamente las preguntas que he realizado. Consiento libre y voluntariamente participar en esta investigación como voluntario y entiendo que tengo el derecho de retirarme de la investigación en cualquier momento sin que me afecte en ninguna manera.

FIRMA DEL PARTICIPANTE: _____

FECHA: _____ (DD/MM/AAAA)

FIRMA DIRECTOR DE LA INVESTIGACIÓN: _____

Desde ya le agradecemos su participación.

ANEXO E: formato de cadena de custodia de las muestras de sangre

	<p>impacto de la contaminación producto del tráfico vehicular sobre los niveles de carboxihemoglobina y la respuesta respiratoria aguda en ciclistas urbanos de la universidad nacional de Colombia-sede Bogotá.</p>						
Numero	CONSECUTIVO	NOMBRE Y APELLIDOS DEL PACIENTE	IDENTIFICACIÓN	FECHA DE TOMA	HORA DE TOMA	OBSERVACIONES	Tomado por
1							
2							
3							
.							
.							
n							

ANEXO F: Formato entrega de resultados a los voluntarios

Voluntario No.	
----------------	--

Nombre	
--------	--

	Alta Exposición	Baja Exposición
% COHb antes		
% COHb despues		

	Alta Exposición	Baja Exposición
Particulas ultrafinas		
Diametro de las particulas		
Area de particulas depositada en pulmon		
Black Carbon/Carbono negro		
Monoxido de Carbono		

Alta Exposición	Baja Exposición
-----------------	-----------------

Espirometrias	CVF	Pre		
		Pos		
	VEF1	Pre		
		Pos		
	FEM	Pre		
		Pos		
		Pre		

Dioxido de Nitrogeno		
Dioxido de Azufre		

	MMEF25- 75	Pos		
--	---------------	-----	--	--

ANEXO G: certificados de calibración de equipos



lab service
ELECTRONICA ESPECIALIZADA LTDA
www.labserviceitda.com



ILAC-MRA



ACREDITADO
ONAC
ORGANISMO NACIONAL DE
CALIBRACION DE COLOMBIA
ISO/IEC 17025:2005
11-LAC-027

Instrumentación Ltda

RBF 154713
Bogotá D.C., 22 de agosto, 2006

Certificado de Calibración

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Certificado No.:	MG-0024050383-OSCT313
Cliente:	SUBRED INTEGRADA DE SERVICIOS DE SALUD SUR OCCIDENTE
Dirección:	Calle 9 No. 39 - 46, Bogotá D.C.
Instrumento:	MONITOR DE GAS
Fabricante:	RAE SYSTEMS
Modelo:	TOXIRAE PRO
Número de serie:	0224050383
Registro único entrada:	RC7313
Fecha de recepción:	2018-10-15
Condición de ingreso:	Sin anomalías visuales.
Fecha de calibración:	2018-10-15
Número de páginas del certificado incluyendo anexos:	2

Este certificado expresa fielmente el resultado de las mediciones realizadas. No podrá ser reproducido, excepto cuando se haya obtenido previamente permiso por escrito del laboratorio que lo emite.

This certificate is an accurate record of the performed measurements results. This certificate must not be reproduced, except with prior written permission of the issuing laboratory.

El usuario es responsable de la calibración de sus instrumentos a intervalos apropiados.
The user is responsible for having his instruments calibrated at appropriate intervals.

Aprobó:
Approved by



ALVARO ANDRÉS HERNÁNDEZ MARTÍNEZ
Director Técnico Laboratorio de calibración

Fecha de emisión:
Issue Date

2018-10-15

Sello:
Seal

Rel: ESP:ROMETRO

Cordial Saludo Doctor Telez:

Adjunto estamos haciendo entrega del equipo que se describe a continuación en calidad de demostración:

Equipo: ESPIROMETRO
Modelo: SPIRO PRO
Marca: Viasys
Serie: 89206315

Incluye:

- Cable AC /
- Cargador para batería
- Batería de 3.6 v. /

Cordialmente,

RAFAEL BAREÑO F.
Dpto. de Almacén

Código de barras:
Este código de barras contiene el número de protocolo de calibración, el número de instrumento, el número de serie y el número de lote de fabricación. Este código de barras es válido para la verificación de la autenticidad del certificado de calibración.

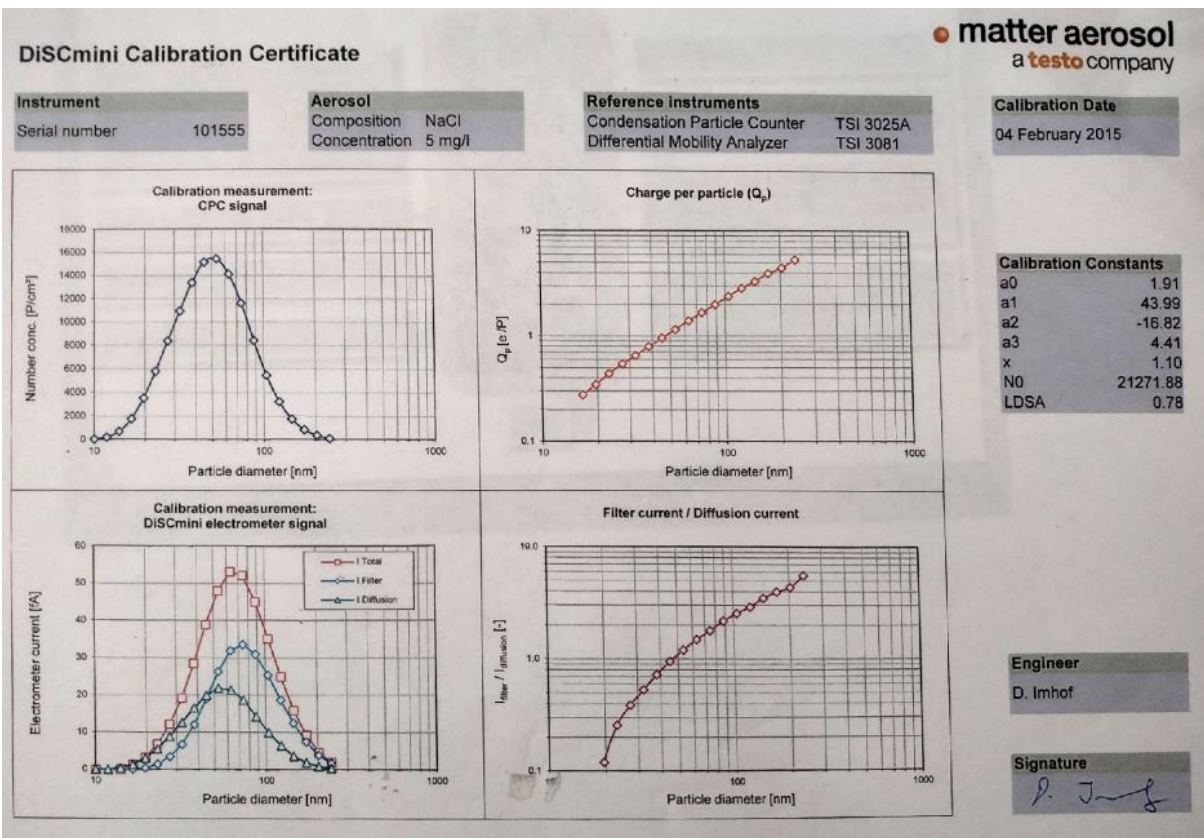
Calle 115 No. 11A - 10 Bogotá, D.C. - Colombia - Corredor: 612 13 13 Fax: 612 08 05 - Tel: 860 001 130-4
E-mail: instrumentacion@instrumentacion.com.co - www.instrumentacion.com.co - Apartado Aéreo 100 803

Instrumentación S.A.
Soluciones que mejoran la vida

ORDEN DE SERVICIO No. 7085

DATOS DEL CLIENTE Cliente: Universidad Nacional de Colombia Contacto: Facultad de Medicina Teléfono: Ciudad: Contrato: Daño fuera de Garantía:		IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO Equipo: Espirómetro Marca: Viasys Pfeiffer Modelo: SPO 100 S/N: 89206454 Ubicación: Placa:	
TIPO DE SERVICIO <input type="checkbox"/> Alastamiento <input type="checkbox"/> Calibración <input checked="" type="checkbox"/> Capacitación <input type="checkbox"/> Correctivo <input type="checkbox"/> Cortesía <input type="checkbox"/> Demostración <input type="checkbox"/> Diagnóstico <input type="checkbox"/> Instalación <input type="checkbox"/> Otro <input type="checkbox"/> Preventivo			
TIPO DE PROBLEMA <input type="checkbox"/> Electrónico <input type="checkbox"/> Neumático <input type="checkbox"/> Producto <input type="checkbox"/> Software <input type="checkbox"/> Otro Cual:			
TIPO DE ELEMENTO			
LÍNEA COMUNICACIONES <input type="checkbox"/> Perfilero <input type="checkbox"/> Reinstalaciones de Firmware <input type="checkbox"/> Reinstalaciones de Software <input type="checkbox"/> Reparación Completa <input type="checkbox"/> Reparación Componentes <input type="checkbox"/> Reparación Estándar <input type="checkbox"/> Tarjeta Principal <input type="checkbox"/> Otro:	LÍNEA ANALÍTICA <input type="checkbox"/> Filtro Emisor/Exhalación <input type="checkbox"/> Filtro de Solución Refrigerante <input type="checkbox"/> Fuente <input type="checkbox"/> Relvo <input type="checkbox"/> Sonda de Bloqueo <input type="checkbox"/> Sonda de Muestra <input type="checkbox"/> Teclado <input type="checkbox"/> Válvula de Una Vía <input type="checkbox"/> Otro:	LÍNEA MÉDICA <input type="checkbox"/> Amplificador <input type="checkbox"/> Batería <input type="checkbox"/> Cable <input type="checkbox"/> Celda O2 <input type="checkbox"/> Compresor <input type="checkbox"/> Control <input type="checkbox"/> CPU <input type="checkbox"/> Cto. Paciente <input type="checkbox"/> Cubierta <input type="checkbox"/> Electrodo <input type="checkbox"/> Filtro <input type="checkbox"/> Flujoómetro <input type="checkbox"/> Fuente <input type="checkbox"/> Impresora <input type="checkbox"/> Indicador <input type="checkbox"/> Instrumental <input type="checkbox"/> Interfase <input type="checkbox"/> Lámpara <input type="checkbox"/> Mangara <input type="checkbox"/> Manómetro <input type="checkbox"/> Mezclador <input type="checkbox"/> Módulo <input type="checkbox"/> Motor <input type="checkbox"/> Operativo <input type="checkbox"/> Pantalla <input type="checkbox"/> Pistón <input type="checkbox"/> Potenciómetro <input type="checkbox"/> Reactivo <input type="checkbox"/> Sensor <input type="checkbox"/> Software <input type="checkbox"/> Tarjeta <input type="checkbox"/> Touchscreen <input type="checkbox"/> Transductor <input type="checkbox"/> Turbina <input type="checkbox"/> Válvula <input type="checkbox"/> Otro:	
PROBLEMA:			
TRABAJOS REALIZADOS Copiaciones en el manejo y la configuración del equipo.			
OBSERVACIONES:			
CLIENTE Nombre: Dora Diaz Fonseca Cargo: Investigadora Toxicología Firma:		DURACIÓN DEL TRABAJO H. Llegada: 10:00 Salida: 13:00	
INSTRUMENTACIÓN S.A. Nombre: Nestor Hernández Cargo: Supervisor Técnico Firma:		REDEMNOTE 6 PRO MI DUAL CÁMERA	

Camera 15A No. 11A - 19 Rev04 N.C. - Colombia - Correo: 447.7835 Fax: 747.7836 Opción 1 - Nit: 860.001.190



ANEXO H: guía de estandarización de la espirometría de acuerdo con las guías de american thoracic society/european respiratory society (ATS/ERS)

La espirometría es una prueba fisiológica que evalúa como un individuo inhala o exhala volúmenes de aire en función del tiempo. La principal medida de la espirometría puede ser el volumen o el flujo.

Es una herramienta importante en el diagnóstico del estado respiratorio de un paciente, sin guiar directamente a al diagnóstico etiológico. Algunas de las indicaciones de la espirometría son diagnósticas, de monitoreo, terapéuticas, evaluación de discapacidad, alteración y salud pública. En el presente proyecto sus indicaciones son:

Diagnósticas

- Para evaluar síntomas, signos o anormalidad en las pruebas de laboratorio.
- Para medir los efectos de la enfermedad en la función pulmonar.
- Para tamizar los individuos con riesgo a desarrollar enfermedad pulmonar.

Monitoreo

- Para monitorizar las personas expuestas a agentes nocivos.

Salud Pública

- Investigación clínica.
- Encuestas epidemiológicas.

Entre los aspectos más importantes son la Capacidad Vital Forzada (CVF), el cual es el volumen liberado durante una espiración forzada y completa posterior a una inspiración plena, y el volumen forzado espiratorio (VEF) en un segundo, el cual es el volumen en el primer segundo de una maniobra de CVF.

Una espirometría puede realizarse con diferentes equipos y requiere cooperación entre el sujeto y el examinador. Los resultados obtenidos pueden depender tanto de factores técnicos como personales. La variabilidad de los resultados pueden ser disminuidos y la precisión de la medida puede mejorarse, si el rango de los valores normales poblacionales es estrecho, permitiendo detectar más fácilmente las anomalías.

En 1979 se realizó el primer comité para estandarización de la espirometría por la Sociedad Americana de Tórax (ATS en inglés). Este ha sido actualizado en 1987 y 1994.

Equipos:

Requerimientos

El espirómetro debe ser capaz de acumular un volumen mayor a 15 segundos y medir volúmenes ≥ 8 L, con una precisión de al menos $\pm 3\%$ por lectura o ± 0.050 L, aunque puede ser mayor con flujos entre 0 y $14 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. La resistencia total al flujo de aire de $14 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ debe ser $< 1.5 \text{ cm H}_2\text{O}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$. La resistencia total debe ser medida teniendo en cuenta tubos, válvulas, prefiltros, etc. Entre el sujeto y el espirómetro.

Validación: se recomienda que los sistemas de espirometría puedan ser evaluados usando una jeringa mecánica guiada por computador o su equivalente, siguiendo el test del rango de exhalaciones, las cuales son similares a las encontradas en las pruebas poblacionales/poblacionales.

Control de calidad

El control de calidad del equipo y la calibración son parte importante de las buenas prácticas del laboratorio. Como mínimo, los requerimientos son los siguientes:

1. Tener una curva de resultados de calibración.
2. Historial de reparaciones u otras modificaciones realizadas al equipo.
3. Actualización de los datos de programación y equipamiento del computador.
4. Si el equipo es movilizad debe calibrarse antes de emplearse.

La calibración es el procedimiento para establecer la relación entre los valores de flujo o volumen determinados por el sensor y el flujo o volumen actual.

El chequeo de la calibración es diferente a la calibración y se usa para validar que el dispositivo está dentro de los límites de calibración. Si un dispositivo falla en el chequeo de calibración, debe realizarse uno nuevo o hacer mantenimiento al equipo. Los chequeos de calibración deben realizarse diariamente, o más frecuentemente, según indicaciones del fabricante.

Control de calidad para las mediciones realizadas a volúmenes

La exactitud del volumen del espirómetro debe ser revisada al menos diariamente, con una simple descarga de una jeringa de calibración de 3 L. El chequeo de la calibración diaria es altamente recomendado ya que puede detectar un problema, y también ayuda a definir la variabilidad del laboratorio día a día. Revisiones más frecuentes deben realizarse en circunstancias especiales: pruebas en industrias u otros estudios a un gran número de sujetos, en este caso debe ser mayor al día. Cuando la temperatura ambiental cambia, la exactitud del volumen debe chequearse con mayor frecuencia y deben aplicarse los factores de corrección respectivos.

El chequeo de la linealidad dada por los fabricantes es equivalente a uno de los siguientes procedimientos, donde se comparan volúmenes observados con las correspondientes mediciones acumuladas de volumen.

Control de la calidad de las mediciones de flujo realizadas

Para valorar la precisión del volumen, los chequeos de calibración deben hacerse al menos a diario, usando una descarga de una jeringa de 3-L al menos 3 veces, con lo que se obtiene un rango de flujos variando entre 0.5 y 12 L*s-1. El volumen de cada flujo podría encontrar la precisión requerida de $\pm 3.5\%$. Para dispositivos que usan sensores de flujo desechables, un nuevo sensor debe ser utilizado para evaluar a los pacientes cada día.

Realización de la Prueba

Hay 3 fases distintas de la maniobra de CVF:

1. Inspiración máxima.
2. Espiración rápida forzada, y

3. Completar la exhalación para terminar la prueba.

El técnico debe demostrar la maniobra apropiada para el seguimiento del procedimiento, descrito a continuación, para registrar una CVF:

- Chequear la calibración del espirómetro.
- Explicar la prueba.
- Preparar el sujeto.
- Interrogar acerca de tabaquismo, enfermedad reciente, uso de medicamentos.
- Medir el peso y la talla sin zapatos.
- Lavarse las manos.

Instruir y demostrar la realización de la prueba al sujeto, esto incluye

- Postura correcta con la cabeza ligeramente elevada.
- Inhalar rápida y completamente.
- Colocar la boquilla (circuito abierto).
- Exhalar con esfuerzo máximo.

Realizar la maniobra (método del circuito cerrado)

- Tener al sujeto en la posición correcta.
- Ocluir con un clip la nariz, colocar la boquilla en la boca y colocar los labios alrededor de esta.
- Inhalar completa y rápidamente, con una pausa de menos de 1 segundo de la CPT.
- Exhalar al máximo hasta que no pueda expeler más aire, manteniendo la postura erecta.
- Repetir instrucciones como sea necesario, dirigir vigorosamente.
- Repetir por un mínimo de 3 maniobras, no se requieren mas de ocho, por lo general.
- Chequear el test de repetibilidad y realizar más maniobras si es necesario

Realización de la maniobra (circuito abierto)

- Adecuar al sujeto en la postura correcta.
- Colocar un clip en la nariz.
- Inhalar completa y rápidamente, con una pausa de menos de 1 s de la CPT
- Posicionar la boquilla en la boca y colocar los labios alrededor de ella.
- Exhalar al máximo hasta que no pueda expeler más aire, manteniendo la postura erecta.
- Chequee la prueba de repetibilidad y realizar más maniobras según sea necesario (161).

El sujeto debe inhalar rápidamente y completar su Capacidad Residual Funcional. El tubo de respiración debe insertarse dentro de la boca del sujeto, hacer un correcto sello con los labios alrededor de la boquilla, sin que la lengua lo ocluya, y entonces la maniobra de CVF debe realizarse sin la más mínima vacilación.

Reducciones del FEM y VEF1 deben ser mostradas cuando la inspiración es lenta y/o cuando hay una pausa de 4-6 s de la capacidad pulmonar total antes de iniciar la exhalación. Es importante que la inspiración sea rápida y sin pausas. La prueba asume una inhalación total antes del inicio de la exhalación forzada, y esta es imperativa/o que el sujeto tome una inhalación completa antes del inicio de la maniobra. El sujeto podría ser estimulado a soplar o no, el aire de sus pulmones, y así exhalar completamente; sin embargo, el que dirige la maniobra debe, de manera entusiasta, apoyar los esfuerzos que realiza el individuo.

Punto de fin de prueba

La curva tiempo-volumen no muestra cambios en volumen (<0.025 L) por > 1 s, y el sujeto tiene que exhalar por lo menos 3 segundos en niños menores de 10 años, y mayor o igual a 6 segundos en sujetos mayores a 10 años de edad.

Adicionales. Tos durante el primer segundo de la maniobra puede afectar la medición del VEF1. Tos en el primer segundo o cualquier otro

síntoma, interfiere con la exactitud de la medición, esto debe ser vigilado por el técnico.

Criterio de Flujo Aceptable

Los criterios de aceptabilidad de inicio y final de la prueba deben cumplirse.

Adicionalmente, el técnico podría observarse que el sujeto entendió las instrucciones y realizó la maniobra con una inspiración máxima, un buen comienzo, una espiración continua pareja y un esfuerzo máximo. Las condiciones de seguimiento deben estar presentes:

1. Sin un inicio insatisfactorio de la espiración, caracterizado por una excesiva vacilación o un volumen extrapolado VE de inicio falso >5% de la CVF o 0.150 L, cualquiera es mayor.
2. Sin tos durante el primer segundo de la maniobra, ya que afecta el valor del VEF1, o algún otra tos que, al juicio del técnico, interfiera con la medición de la exactitud de la prueba.
3. Sin terminación temprana de la espiración.
4. Sin una maniobra de Valsalva (glotis cerrada), o vacilación durante la maniobra que causa un cese del flujo del aire, las cuales evitan la exactitud de la medición del VEF1 o CVF.
5. Sin una abertura.
6. Sin una obstrucción en la boquilla.
7. Sin evidencia de una respiración extra durante la maniobra.

Criterios dentro de la maniobra.

El espirograma individual es aceptable si:

Esta libre de artefactos

- Tos durante el primer segundo de exhalación.
- Cierre de la glotis influencia la medición¹⁶².
- Terminación temprana o punto de corte.
- Esfuerzo realizado no es el máximo.
- Abertura.

- Obstrucción de la boquilla.

Tiene un buen inicio

- Volumen extrapolado <5% de la CVF O 0.15 l, cualquiera mayor a este.
- Exista una exhalación satisfactoria.
- Duración de mayor o igual a 6 s (3 s para niños), o una meseta en la curva tiempo volumen.
- Si el sujeto no puede continuar la exhalación.

Criterios entre maniobras.

Después de que 3 aceptables espirogramas se han obtenido, se aplican las siguientes pruebas:

- Los 2 mayores valores de CVF no debe ser diferentes de 0.150 L uno respecto al otro.
- Los 2 mayores valores del VEF1 deben ser diferentes en 0.150 L entre ellos.

Si alguno de esos criterios se cumple, la sesión de prueba finaliza.

Si alguno de esos criterios no se logra, se prosigue la prueba hasta que:

- Alguno de los criterios se logre con análisis adicional de espirogramas aceptables.
- Un total de 8 pruebas tengan el desempeño (opcional).
- El paciente o sujeto no pueda continuar.

Guardar, como mínimo, 3 maniobras satisfactorias.

Selección de la prueba resultante

CVF y VEF1 podría ser medido de una serie de al menos tres curvas espiratorias forzadas que tienen un inicio aceptable y libre de artefactos, como tos. La mayor CVF y VEF1 podría ser grabado después de examinar los datos de todos los usados en la curva.

Estandarización del VEF1 del volumen espirado, VEF1/CVF y VEF1/CV.

En algunos pacientes, un lento o CV no forzada o Capacidad Vital Inspiratoria puede proveer un mayor o más apropiado denominador para el cálculo del VEF1/CV%. Algunos investigadores han reportado que CV es ligeramente mayor que la CVF en sujetos normales.

FEM es usualmente obtenido de la curva flujo-volumen. Esto es el flujo espiratorio máximo alcanzado por la máxima espiración forzada, iniciando sin vacilación de un punto de máxima inflación pulmonar, expresado en L*s-1. Cuando FEM es un registro usado por un Pico flujo portátil, es frecuentemente expresado en L-min-1.163

Test de reversibilidad

Es una determinación de la reversibilidad de la limitación al flujo aéreo con la administración de una droga. La elección del medicamento, dosis y modo de administración es decisión del clínico.

El objetivo de la prueba es determinar si la función pulmonar mejora con la adición de una terapia en su tratamiento regular, entonces el sujeto puede continuar con su medicación regular antes de la prueba.

Si el clínico quiere determinar si hay alguna evidencia de limitación reversible al flujo, entonces el sujeto podría ser sometido a una prueba de función basal cuando no tome ninguna medicación previa a la prueba. Drogas inhaladas de corta acción podrían no ser usadas dentro 4 horas antes de la prueba. Broncodilatadores de larga acción y terapia oral con aminofilina o liberación lenta deben ser consumidas 12 horas antes de la prueba. Fumar debe restringirse, por lo menos más de 1 hora antes de la prueba y durante la misma.

Método

Los pasos a seguir son:

1. El sujeto tiene 3 pruebas aceptables de VEF1, CVF y FEM grabadas de la forma descrita previamente.

2. Los medicamentos son administrados en la dosis y por el método indicado por la prueba. Por ejemplo, después un generosa y espiración incompleta, una dosis de 100 µg de albuterol/salbutamol es inhalado en una respiración de la CPT desde el dispositivo espaciador; la respiración es retenida 5-10 s antes que el sujeto exhale, 4 dosis separadas (total de 400 µg dosis) son administrados en intervalos de 30 s. Esta dosis incrementa la respuesta para obtener una curva dosis respuesta. Una dosis baja puede ser usada si hay antecedentes de efectos en la frecuencia cardiaca o temblor. Otras drogas pueden ser usadas. Para agentes anticolinérgicos como Bromuro de Ipratropio, la dosis total es 160 µg.

3 pruebas aceptables son registradas ≥ 10 minutos o mayor a 15 minutos después de los agonistas β 2-agonistas, y 30 minutos después de los agentes anticolinérgicos de corta acción.

Comentarios a la dosis y el método de liberación

La estandarización de la dosis de broncodilatador administrada es necesaria en orden de estandarizar la definición de una respuesta significativa al broncodilatador. La rata / ratio de deposición pulmonar de una droga con volumen corriente desde un nebulizador no ventilado, podría depender de la concentración de drogas, así como de la Rata/ Ratio de salida del nebulizador, distribución del tamaño de partículas, y la proporción del tiempo empleado en la inspiración del total del tiempo respiratorio. La fracción del aerosol transportado en partículas con un diámetro de ≤ 5 µm, que se espera se deposite en un pulmón de adulto si es inhalado a través de una boquilla, se define como fracción respirable (FR). La deposición pulmonar de los inhaladores de polvo seco es específica de los dispositivos, y es mayor con nebulizadores no ventilados.

CONSIDERACIONES TÉCNICAS

Recomendaciones mínimas para sistemas de espirometría

La precisión de los resultados requiere un equipo preciso. La precisión de un sistema de espirometría depende de las características de todo el sistema, del volumen o transductor de flujo y el uso de una línea de filtro, un registrador y un procesador.

Cambios en cualquier aspecto del equipo o errores en cualquiera de los pasos del proceso puede afectar la precisión de los resultados.

Corrección BTPS

Todos los valores de espirometría pueden ser reportados por BTPS, y por cualquier método (midiendo la temperatura y presión barométrica) que provea el fabricante. Para los espirómetros de tipo volumen, la temperatura dentro del espirómetro podría ser medida por cada maniobra de respiración.

Independiente de la técnica de corrección BTPS que se use, la temperatura ambiente debe siempre ser registrada con una exactitud de $\pm 1^{\circ}\text{C}$; en situaciones donde la temperatura del aire ambiente cambia rápidamente ($> 3^{\circ}\text{C}$ en < 30 min), correcciones de temperatura continuas pueden ser necesarias. Los usuarios de espirómetros podrían ser prevenidos de los problemas potenciales con pruebas realizadas con temperaturas ambientales bajas, 17°C es el límite inferior para la temperatura ambiente, a menos que el fabricante recomiende que se puede emplear a bajas temperaturas ambientales. Si la presión barométrica no es usada para el cálculo de la corrección BTPS, el rango de las presiones barométricas válidas mayores a la corrección debe ser publicadas por el fabricante.

Contraindicaciones del Uso de la Espirometría.

- Desórdenes agudos que afectan el desarrollo de la prueba (ej. Vómito, náusea, vértigo)
- Hemoptisis de causa desconocida (Maniobra CVF puede agravar la condición)
- Neumotórax
- Cirugía reciente abdominal o torácica.
- Cirugía ocular reciente.
- Infarto de miocardio reciente o angina inestable.
- Aneurisma torácico (riesgo de ruptura por incremento de la presión intratorácica).

ANEXO I: tasa de inhalación reportada en las tablas 6-17 y 6-19 el libro Exposure Factors Handbook 2011 Edition de la United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA)

Exposure Factors Handbook
September 2011
Page 6-39

Table 6-17. Descriptive Statistics for Average Ventilation Rate,* Unadjusted for Body Weight, While Performing Activities Within the Specified Activity Category, for Males by Age Category

Age Group (years)	N	Average Ventilation Rate (m ³ /minute)								Maximum
		Mean	Percentiles						Maximum	
			5 th	10 th	25 th	50 th	75 th	90 th		
Sleep or nap (Activity ID = 14500)										
Birth to <1	419	3.08E-03	1.66E-03	1.91E-03	2.45E-03	3.00E-03	3.68E-03	4.35E-03	4.77E-03	7.19E-03
1	308	4.50E-03	3.11E-03	3.27E-03	3.78E-03	4.35E-03	4.95E-03	5.90E-03	6.44E-03	1.00E-02
2	261	4.61E-03	3.01E-03	3.36E-03	3.94E-03	4.49E-03	5.21E-03	6.05E-03	6.73E-03	8.96E-03
3 to <6	540	4.36E-03	3.06E-03	3.30E-03	3.76E-03	4.29E-03	4.86E-03	5.54E-03	5.92E-03	7.67E-03
6 to <11	940	4.61E-03	3.14E-03	3.39E-03	3.83E-03	4.46E-03	5.21E-03	6.01E-03	6.54E-03	9.94E-03
11 to <16	1,337	5.26E-03	3.53E-03	3.78E-03	4.34E-03	5.06E-03	5.91E-03	6.94E-03	7.81E-03	1.15E-02
16 to <21	1,241	5.31E-03	3.55E-03	3.85E-03	4.35E-03	5.15E-03	6.09E-03	6.92E-03	7.60E-03	1.28E-02
21 to <31	701	4.73E-03	3.16E-03	3.35E-03	3.84E-03	4.56E-03	5.42E-03	6.26E-03	6.91E-03	1.12E-02
31 to <41	728	5.16E-03	3.37E-03	3.62E-03	4.23E-03	5.01E-03	5.84E-03	6.81E-03	7.46E-03	1.09E-02
41 to <51	753	5.65E-03	3.74E-03	4.09E-03	4.73E-03	5.53E-03	6.47E-03	7.41E-03	7.84E-03	1.08E-02
51 to <61	627	5.78E-03	3.96E-03	4.20E-03	4.78E-03	5.57E-03	6.54E-03	7.74E-03	8.26E-03	1.18E-02
61 to <71	678	5.98E-03	4.36E-03	4.57E-03	5.13E-03	5.81E-03	6.68E-03	7.45E-03	7.93E-03	1.23E-02
71 to <81	496	6.07E-03	4.26E-03	4.55E-03	5.17E-03	6.00E-03	6.77E-03	7.65E-03	8.33E-03	1.05E-02
≥81	255	5.97E-03	4.20E-03	4.49E-03	5.23E-03	5.90E-03	6.68E-03	7.36E-03	7.76E-03	1.00E-02
Sedentary and Passive Activities (METS ≤1.5—Includes Sleep or Nap)										
Birth to <1	419	3.18E-03	1.74E-03	1.99E-03	2.50E-03	3.10E-03	3.80E-03	4.40E-03	4.88E-03	7.09E-03
1	308	4.62E-03	3.17E-03	3.50E-03	3.91E-03	4.49E-03	5.03E-03	5.95E-03	6.44E-03	9.91E-03
2	261	4.79E-03	3.25E-03	3.66E-03	4.10E-03	4.69E-03	5.35E-03	6.05E-03	6.71E-03	9.09E-03
3 to <6	540	4.58E-03	3.47E-03	3.63E-03	4.07E-03	4.56E-03	5.03E-03	5.58E-03	5.82E-03	7.60E-03
6 to <11	940	4.87E-03	3.55E-03	3.78E-03	4.18E-03	4.72E-03	5.40E-03	6.03E-03	6.58E-03	9.47E-03
11 to <16	1,337	5.64E-03	4.03E-03	4.30E-03	4.79E-03	5.43E-03	6.26E-03	7.20E-03	7.87E-03	1.11E-02

Exposure Factors Handbook
Chapter 6—Inhalation Rates

Page 6-40
Exposure Factors Handbook
September 2011

Table 6-17. Descriptive Statistics for Average Ventilation Rate,* Unadjusted for Body Weight, While Performing Activities Within the Specified Activity Category, for Males by Age Category (continued)

Age Group (years)	N	Average Ventilation Rate (m ³ /minute)								Maximum
		Mean	Percentiles						Maximum	
			5 th	10 th	25 th	50 th	75 th	90 th		
Light Intensity Activities (1.5 < METS ≤3.0)										
Birth to <1	419	7.94E-03	4.15E-03	5.06E-03	6.16E-03	7.95E-03	9.57E-03	1.08E-02	1.19E-02	1.55E-02
1	308	1.16E-02	8.66E-03	8.99E-03	9.89E-03	1.14E-02	1.29E-02	1.44E-02	1.58E-02	2.11E-02
2	261	1.17E-02	8.52E-03	9.14E-03	9.96E-03	1.14E-02	1.30E-02	1.47E-02	1.53E-02	1.90E-02
3 to <6	540	1.14E-02	9.20E-03	9.55E-03	1.02E-02	1.11E-02	1.23E-02	1.34E-02	1.40E-02	1.97E-02
6 to <11	940	1.16E-02	8.95E-03	9.33E-03	1.02E-02	1.13E-02	1.28E-02	1.46E-02	1.56E-02	2.18E-02
11 to <16	1,337	1.32E-02	9.78E-03	1.03E-02	1.13E-02	1.28E-02	1.47E-02	1.64E-02	1.87E-02	2.69E-02
16 to <21	1,241	1.34E-02	1.00E-02	1.05E-02	1.15E-02	1.30E-02	1.50E-02	1.70E-02	1.80E-02	2.91E-02
21 to <31	701	1.30E-02	9.68E-03	1.02E-02	1.13E-02	1.24E-02	1.40E-02	1.65E-02	1.77E-02	2.72E-02
31 to <41	728	1.36E-02	1.06E-02	1.11E-02	1.20E-02	1.33E-02	1.48E-02	1.65E-02	1.81E-02	2.55E-02
41 to <51	753	1.44E-02	1.12E-02	1.18E-02	1.30E-02	1.41E-02	1.56E-02	1.74E-02	1.83E-02	2.30E-02
51 to <61	627	1.46E-02	1.11E-02	1.16E-02	1.30E-02	1.44E-02	1.59E-02	1.80E-02	1.94E-02	2.55E-02
61 to <71	678	1.41E-02	1.11E-02	1.17E-02	1.27E-02	1.39E-02	1.54E-02	1.69E-02	1.80E-02	2.05E-02
71 to <81	496	1.39E-02	1.12E-02	1.17E-02	1.27E-02	1.37E-02	1.50E-02	1.62E-02	1.69E-02	2.00E-02
≥81	255	1.38E-02	1.10E-02	1.17E-02	1.26E-02	1.38E-02	1.47E-02	1.60E-02	1.67E-02	2.07E-02

Exposure Factors Handbook
Chapter 6—Inhalation Rates

Table 6-17. Descriptive Statistics for Average Ventilation Rate,^a Unadjusted for Body Weight, While Performing Activities Within the Specified Activity Category, for Males by Age Category (continued)

Age Group (years)	N	Mean	Average Ventilation Rate (m ³ /minute)							Maximum
			Percentiles							
			5 th	10 th	25 th	50 th	75 th	90 th	95 th	
Moderate Intensity Activities (3.0 < METS ≤ 6.0)										
Birth to <1	419	1.45E-02	7.41E-03	8.81E-03	1.15E-02	1.44E-02	1.70E-02	2.01E-02	2.25E-02	3.05E-02
1	308	2.14E-02	1.45E-02	1.59E-02	1.80E-02	2.06E-02	2.41E-02	2.69E-02	2.89E-02	3.99E-02
2	261	2.15E-02	1.54E-02	1.67E-02	1.84E-02	2.08E-02	2.41E-02	2.69E-02	2.97E-02	5.09E-02
3 to <6	540	2.10E-02	1.63E-02	1.72E-02	1.87E-02	2.06E-02	2.29E-02	2.56E-02	2.71E-02	3.49E-02
6 to <11	940	2.23E-02	1.64E-02	1.72E-02	1.93E-02	2.16E-02	2.50E-02	2.76E-02	2.95E-02	4.34E-02
11 to <16	1,337	2.64E-02	1.93E-02	2.05E-02	2.26E-02	2.54E-02	2.92E-02	3.38E-02	3.69E-02	5.50E-02
16 to <21	1,241	2.90E-02	2.03E-02	2.17E-02	2.45E-02	2.80E-02	3.17E-02	3.82E-02	4.21E-02	6.74E-02
21 to <31	701	2.92E-02	1.97E-02	2.10E-02	2.42E-02	2.79E-02	3.30E-02	3.88E-02	4.31E-02	7.17E-02
31 to <41	728	3.03E-02	2.14E-02	2.27E-02	2.51E-02	2.91E-02	3.41E-02	3.96E-02	4.35E-02	5.77E-02
41 to <51	753	3.16E-02	2.26E-02	2.44E-02	2.72E-02	3.04E-02	3.51E-02	4.03E-02	4.50E-02	6.34E-02
51 to <61	627	3.27E-02	2.24E-02	2.40E-02	2.80E-02	3.14E-02	3.70E-02	4.17E-02	4.58E-02	7.05E-02
61 to <71	678	2.98E-02	2.25E-02	2.40E-02	2.61E-02	2.92E-02	3.23E-02	3.69E-02	4.00E-02	5.23E-02
71 to <81	496	2.93E-02	2.28E-02	2.39E-02	2.61E-02	2.88E-02	3.20E-02	3.57E-02	3.73E-02	4.49E-02
≥81	255	2.85E-02	2.25E-02	2.34E-02	2.55E-02	2.82E-02	3.10E-02	3.34E-02	3.55E-02	4.11E-02

Table 6-17. Descriptive Statistics for Average Ventilation Rate,^a Unadjusted for Body Weight, While Performing Activities Within the Specified Activity Category, for Males by Age Category (continued)

Age Group (years)	N	Mean	Average Ventilation Rate (m ³ /minute)							Maximum
			Percentiles							
			5 th	10 th	25 th	50 th	75 th	90 th	95 th	
High Intensity (METS >6.0)										
Birth to <1	183	2.75E-02	1.51E-02	1.73E-02	2.06E-02	2.78E-02	3.25E-02	3.84E-02	4.22E-02	5.79E-02
1	164	4.03E-02	2.83E-02	3.17E-02	3.47E-02	3.98E-02	4.43E-02	5.16E-02	5.59E-02	6.07E-02
2	162	4.05E-02	2.82E-02	2.97E-02	3.45E-02	4.06E-02	4.62E-02	5.19E-02	5.51E-02	9.20E-02
3 to <6	263	3.90E-02	2.95E-02	3.14E-02	3.40E-02	3.78E-02	4.32E-02	4.89E-02	5.22E-02	6.62E-02
6 to <11	637	4.36E-02	3.07E-02	3.28E-02	3.58E-02	4.19E-02	4.95E-02	5.66E-02	6.24E-02	8.99E-02
11 to <16	1,111	5.08E-02	3.43E-02	3.68E-02	4.15E-02	4.91E-02	5.74E-02	6.63E-02	7.29E-02	1.23E-01
16 to <21	968	5.32E-02	3.60E-02	3.83E-02	4.35E-02	5.05E-02	5.93E-02	7.15E-02	8.30E-02	1.30E-01
21 to <31	546	5.39E-02	3.36E-02	3.80E-02	4.48E-02	5.15E-02	6.16E-02	7.24E-02	8.21E-02	1.12E-01
31 to <41	567	5.43E-02	3.78E-02	4.04E-02	4.54E-02	5.21E-02	6.12E-02	7.14E-02	7.74E-02	1.04E-01
41 to <51	487	5.73E-02	3.83E-02	4.25E-02	4.83E-02	5.52E-02	6.45E-02	7.56E-02	8.44E-02	1.10E-01
51 to <61	452	5.84E-02	3.90E-02	4.16E-02	4.87E-02	5.59E-02	6.60E-02	7.86E-02	8.65E-02	1.41E-01
61 to <71	490	5.41E-02	3.63E-02	3.95E-02	4.52E-02	5.24E-02	6.08E-02	7.20E-02	7.52E-02	1.02E-01
71 to <81	343	5.25E-02	3.70E-02	3.95E-02	4.41E-02	5.00E-02	5.90E-02	6.76E-02	7.65E-02	9.73E-02
≥81	168	5.33E-02	3.54E-02	3.92E-02	4.55E-02	5.09E-02	6.12E-02	6.96E-02	7.71E-02	9.68E-02

^a An individual's ventilation rate for the given activity category equals the weighted average of the individual's activity-specific ventilation rates for activities falling within the category, estimated using a multiple linear regression model, with weights corresponding to the number of minutes spent performing the activity. Numbers in these two columns represent averages, calculated across individuals in the specified age category, of these weighted averages. These are weighted averages, with the weights corresponding to the 4-year sampling weights assigned within NHANES 1999–2002.

N = Number of individuals.
MET = Metabolic equivalent.

Source: U.S. EPA (2009a).

Age Group (years)	N	Mean	Average Ventilation Rate (m ³ /minute)							Maximum
			Percentiles							
			5 th	10 th	25 th	50 th	75 th	90 th	95 th	
Sleep or nap (Activity ID = 14500)										
Birth to <1	415	2.92E-03	1.54E-03	1.72E-03	2.27E-03	2.88E-03	3.50E-03	4.04E-03	4.40E-03	8.69E-03
1	245	4.59E-03	3.02E-03	3.28E-03	3.76E-03	4.56E-03	5.32E-03	5.96E-03	6.37E-03	9.59E-03
2	255	4.56E-03	3.00E-03	3.30E-03	3.97E-03	4.52E-03	5.21E-03	5.76E-03	6.15E-03	9.48E-03
3 to <6	543	4.18E-03	2.90E-03	3.20E-03	3.62E-03	4.10E-03	4.71E-03	5.22E-03	5.73E-03	7.38E-03
6 to <11	894	4.36E-03	2.97E-03	3.17E-03	3.69E-03	4.24E-03	4.93E-03	5.67E-03	6.08E-03	8.42E-03
11 to <16	1,451	4.81E-03	3.34E-03	3.57E-03	3.99E-03	4.66E-03	5.39E-03	6.39E-03	6.99E-03	9.39E-03
16 to <21	1,182	4.40E-03	2.78E-03	2.96E-03	3.58E-03	4.26E-03	5.05E-03	5.89E-03	6.63E-03	1.23E-02
21 to <31	1,023	3.89E-03	2.54E-03	2.74E-03	3.13E-03	3.68E-03	4.44E-03	5.36E-03	6.01E-03	9.58E-03
31 to <41	869	4.00E-03	2.66E-03	2.86E-03	3.31E-03	3.89E-03	4.54E-03	5.28E-03	5.77E-03	8.10E-03
41 to <51	763	4.40E-03	3.00E-03	3.23E-03	3.69E-03	4.25E-03	4.95E-03	5.66E-03	6.25E-03	8.97E-03
51 to <61	622	4.56E-03	3.12E-03	3.30E-03	3.72E-03	4.41E-03	5.19E-03	6.07E-03	6.63E-03	8.86E-03
61 to <71	700	4.47E-03	3.22E-03	3.35E-03	3.78E-03	4.38E-03	4.99E-03	5.72E-03	6.37E-03	9.57E-03
71 to <81	470	4.52E-03	3.31E-03	3.47E-03	3.89E-03	4.40E-03	5.11E-03	5.67E-03	6.06E-03	7.35E-03
≥81	306	4.49E-03	3.17E-03	3.49E-03	3.82E-03	4.39E-03	4.91E-03	5.61E-03	6.16E-03	8.27E-03
Sedentary and Passive Activities (METs ≤1.5—Includes Sleep or Nap)										
Birth to <1	415	3.00E-03	1.60E-03	1.80E-03	2.32E-03	2.97E-03	3.58E-03	4.11E-03	4.44E-03	9.59E-03
1	245	4.71E-03	3.26E-03	3.44E-03	3.98E-03	4.73E-03	5.30E-03	5.95E-03	6.63E-03	9.50E-03
2	255	4.73E-03	3.34E-03	3.53E-03	4.19E-03	4.67E-03	5.25E-03	5.75E-03	6.22E-03	9.42E-03
3 to <6	543	4.40E-03	3.31E-03	3.49E-03	3.95E-03	4.34E-03	4.84E-03	5.29E-03	5.73E-03	7.08E-03
6 to <11	894	4.64E-03	3.41E-03	3.67E-03	4.04E-03	4.51E-03	5.06E-03	5.88E-03	6.28E-03	8.31E-03
11 to <16	1,451	5.21E-03	3.90E-03	4.16E-03	4.53E-03	5.09E-03	5.68E-03	6.53E-03	7.06E-03	9.07E-03

Age Group (years)	N	Mean	Average Ventilation Rate (m ³ /minute)							Maximum
			Percentiles							
			5 th	10 th	25 th	50 th	75 th	90 th	95 th	
16 to <21	1,182	4.76E-03	3.26E-03	3.56E-03	4.03E-03	4.69E-03	5.32E-03	6.05E-03	6.60E-03	1.18E-02
21 to <31	1,023	4.19E-03	3.04E-03	3.19E-03	3.55E-03	4.00E-03	4.63E-03	5.38E-03	6.02E-03	9.22E-03
31 to <41	869	4.33E-03	3.22E-03	3.45E-03	3.77E-03	4.24E-03	4.80E-03	5.33E-03	5.79E-03	7.70E-03
41 to <51	763	4.75E-03	3.60E-03	3.82E-03	4.18E-03	4.65E-03	5.19E-03	5.74E-03	6.26E-03	8.70E-03
51 to <61	622	4.96E-03	3.78E-03	4.00E-03	4.36E-03	4.87E-03	5.44E-03	6.06E-03	6.44E-03	8.30E-03
61 to <71	700	4.89E-03	3.81E-03	4.02E-03	4.34E-03	4.81E-03	5.30E-03	5.86E-03	6.29E-03	8.18E-03
71 to <81	470	4.95E-03	4.07E-03	4.13E-03	4.41E-03	4.89E-03	5.42E-03	5.89E-03	6.15E-03	7.59E-03
≥81	306	4.89E-03	3.93E-03	4.10E-03	4.39E-03	4.79E-03	5.25E-03	5.71E-03	6.12E-03	7.46E-03
Light Intensity Activities (1.5 < METs ≤3.0)										
Birth to <1	415	7.32E-03	3.79E-03	4.63E-03	5.73E-03	7.19E-03	8.73E-03	9.82E-03	1.08E-02	1.70E-02
1	245	1.16E-02	8.59E-03	8.80E-03	1.00E-02	1.12E-02	1.29E-02	1.52E-02	1.58E-02	2.02E-02
2	255	1.20E-02	8.74E-03	9.40E-03	1.03E-02	1.17E-02	1.32E-02	1.56E-02	1.63E-02	2.36E-02
3 to <6	543	1.09E-02	8.83E-03	9.04E-03	9.87E-03	1.07E-02	1.17E-02	1.29E-02	1.38E-02	1.64E-02
6 to <11	894	1.11E-02	8.51E-03	9.02E-03	9.79E-03	1.08E-02	1.20E-02	1.35E-02	1.47E-02	2.22E-02
11 to <16	1,451	1.20E-02	9.40E-03	9.73E-03	1.06E-02	1.18E-02	1.31E-02	1.47E-02	1.58E-02	2.21E-02
16 to >21	1,182	1.11E-02	8.31E-03	8.73E-03	9.64E-03	1.08E-02	1.23E-02	1.38E-02	1.49E-02	2.14E-02
21 to <31	1,023	1.06E-02	7.75E-03	8.24E-03	9.05E-03	1.02E-02	1.17E-02	1.34E-02	1.43E-02	2.15E-02
31 to <41	869	1.11E-02	8.84E-03	9.30E-03	9.96E-03	1.09E-02	1.19E-02	1.31E-02	1.39E-02	1.74E-02
41 to <51	763	1.18E-02	9.64E-03	1.00E-02	1.07E-02	1.16E-02	1.27E-02	1.39E-02	1.45E-02	1.77E-02
51 to <61	622	1.20E-02	9.76E-03	1.02E-02	1.09E-02	1.18E-02	1.30E-02	1.42E-02	1.49E-02	1.79E-02
61 to <71	700	1.08E-02	8.87E-03	9.28E-03	9.85E-03	1.06E-02	1.17E-02	1.26E-02	1.32E-02	1.74E-02
71 to >81	470	1.08E-02	8.84E-03	9.23E-03	9.94E-03	1.07E-02	1.17E-02	1.25E-02	1.30E-02	1.76E-02

Table 6-19. Descriptive Statistics for Average Ventilation Rate,^a Unadjusted for Body Weight, While Performing Activities Within the Specified Activity Category, for Females by Age Category (continued)

Age Group (years)	N	Average Ventilation Rate (m ³ /minute)								
		Mean	Percentiles							Maximum
			5 th	10 th	25 th	50 th	75 th	90 th	95 th	
≥81	306	1.04E-02	8.69E-03	8.84E-03	9.36E-03	1.03E-02	1.14E-02	1.21E-02	1.26E-02	1.61E-02
Moderate Intensity Activities (3.0 < METS ≤ 6.0)										
Birth to <1	415	1.40E-02	7.91E-03	9.00E-03	1.12E-02	1.35E-02	1.63E-02	1.94E-02	2.23E-02	4.09E-02
1	245	2.10E-02	1.56E-02	1.63E-02	1.79E-02	2.01E-02	2.35E-02	2.71E-02	2.93E-02	3.45E-02
2	255	2.13E-02	1.42E-02	1.56E-02	1.82E-02	2.15E-02	2.39E-02	2.76E-02	2.88E-02	3.76E-02
3 to <6	543	2.00E-02	1.53E-02	1.63E-02	1.78E-02	1.98E-02	2.16E-02	2.38E-02	2.59E-02	3.29E-02
6 to <11	894	2.10E-02	1.60E-02	1.68E-02	1.85E-02	2.04E-02	2.30E-02	2.61E-02	2.81E-02	4.31E-02
11 to <16	1,451	2.36E-02	1.82E-02	1.95E-02	2.08E-02	2.30E-02	2.54E-02	2.84E-02	3.14E-02	4.24E-02
16 to <21	1,182	2.32E-02	1.66E-02	1.76E-02	1.96E-02	2.24E-02	2.61E-02	3.03E-02	3.20E-02	5.25E-02
21 to <31	1,023	2.29E-02	1.56E-02	1.67E-02	1.90E-02	2.19E-02	2.60E-02	3.00E-02	3.28E-02	5.42E-02
31 to <41	869	2.27E-02	1.69E-02	1.76E-02	1.95E-02	2.20E-02	2.48E-02	2.89E-02	3.11E-02	4.73E-02
41 to <51	763	2.45E-02	1.76E-02	1.89E-02	2.08E-02	2.39E-02	2.74E-02	3.08E-02	3.36E-02	5.07E-02
51 to <61	622	2.52E-02	1.88E-02	1.98E-02	2.18E-02	2.43E-02	2.81E-02	3.19E-02	3.50E-02	4.62E-02
61 to <71	700	2.14E-02	1.69E-02	1.77E-02	1.92E-02	2.09E-02	2.32E-02	2.57E-02	2.73E-02	3.55E-02
71 to <81	470	2.11E-02	1.69E-02	1.76E-02	1.89E-02	2.07E-02	2.29E-02	2.49E-02	2.64E-02	3.44E-02
≥81	306	2.09E-02	1.65E-02	1.75E-02	1.91E-02	2.06E-02	2.25E-02	2.46E-02	2.60E-02	2.93E-02

Table 6-19. Descriptive Statistics for Average Ventilation Rate,^a Unadjusted for Body Weight, While Performing Activities Within the Specified Activity Category, for Females by Age Category (continued)

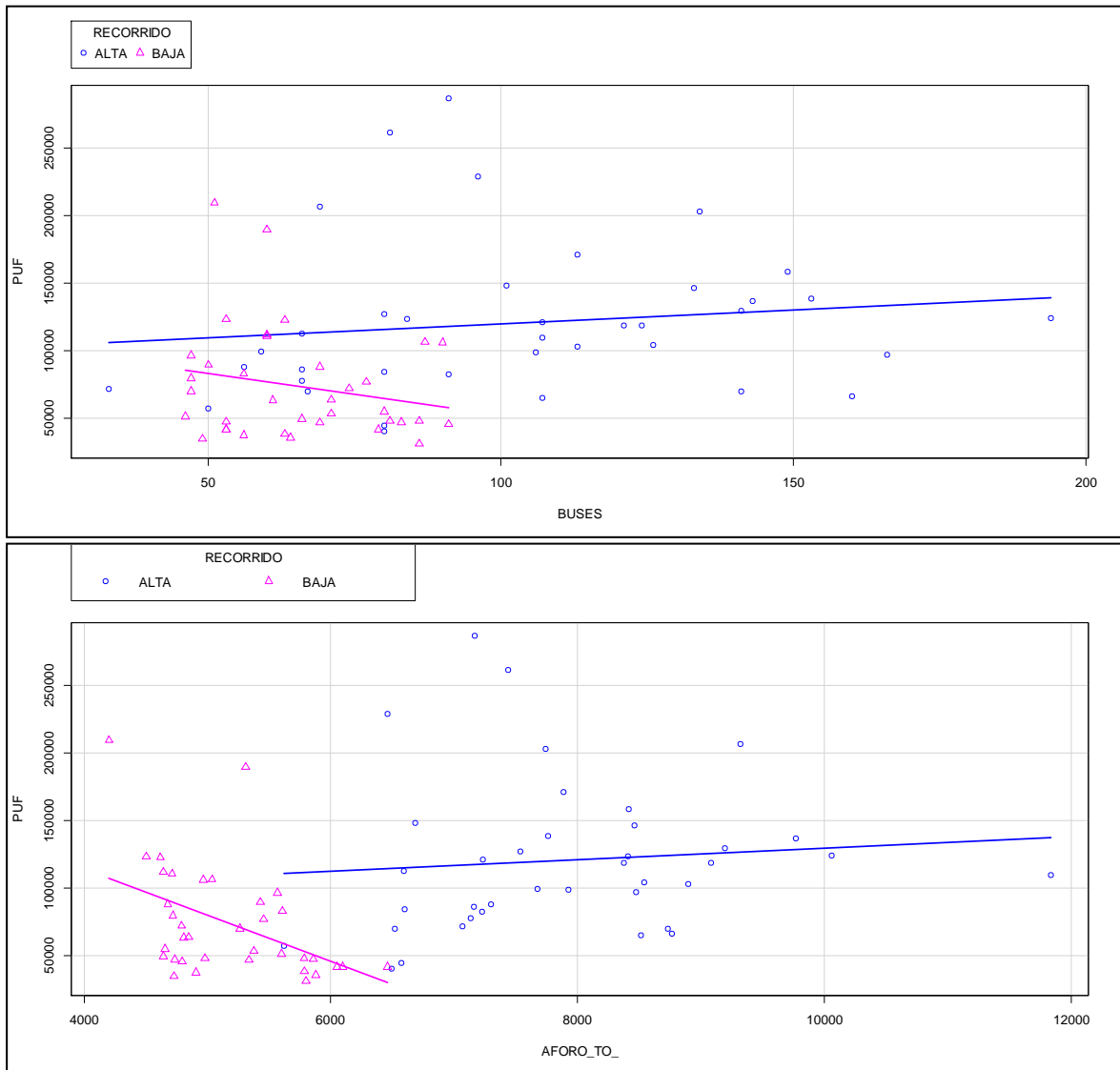
Age Group (years)	N	Average Ventilation Rate (m ³ /minute)								
		Mean	Percentiles							Maximum
			5 th	10 th	25 th	50 th	75 th	90 th	95 th	
High Intensity (METS > 6.0)										
Birth to <1	79	2.42E-02	1.24E-02	1.33E-02	1.72E-02	2.25E-02	2.93E-02	3.56E-02	4.07E-02	7.46E-02
1	55	3.65E-02	2.59E-02	2.62E-02	3.04E-02	3.61E-02	4.20E-02	4.73E-02	4.86E-02	7.70E-02
2	130	3.76E-02	2.90E-02	3.05E-02	3.23E-02	3.64E-02	4.08E-02	4.81E-02	5.14E-02	7.30E-02
3 to <6	347	3.45E-02	2.70E-02	2.82E-02	3.00E-02	3.33E-02	3.76E-02	4.32E-02	4.47E-02	5.66E-02
6 to <11	707	3.94E-02	2.86E-02	3.01E-02	3.37E-02	3.80E-02	4.41E-02	5.05E-02	5.46E-02	8.29E-02
11 to <16	1,170	4.66E-02	3.11E-02	3.38E-02	3.88E-02	4.53E-02	5.29E-02	6.08E-02	6.63E-02	1.02E-01
16 to <21	887	4.41E-02	2.87E-02	3.06E-02	3.65E-02	4.27E-02	5.02E-02	5.82E-02	6.34E-02	1.09E-01
21 to <31	796	4.57E-02	2.88E-02	3.12E-02	3.67E-02	4.31E-02	5.22E-02	6.19E-02	6.89E-02	1.08E-01
31 to <41	687	4.44E-02	3.03E-02	3.29E-02	3.70E-02	4.22E-02	5.05E-02	5.95E-02	6.53E-02	8.95E-02
41 to <51	515	4.70E-02	3.10E-02	3.40E-02	3.84E-02	4.56E-02	5.41E-02	6.15E-02	6.74E-02	8.87E-02
51 to <61	424	4.74E-02	3.15E-02	3.48E-02	3.94E-02	4.57E-02	5.41E-02	6.23E-02	6.88E-02	8.44E-02
61 to <71	465	4.00E-02	2.76E-02	3.06E-02	3.46E-02	3.87E-02	4.53E-02	5.08E-02	5.64E-02	7.13E-02
71 to <81	304	4.06E-02	2.85E-02	3.01E-02	3.43E-02	3.96E-02	4.70E-02	5.20E-02	5.41E-02	7.53E-02
≥81	188	4.19E-02	2.85E-02	3.09E-03	3.44E-02	4.14E-02	4.76E-02	5.56E-02	5.83E-02	7.21E-02

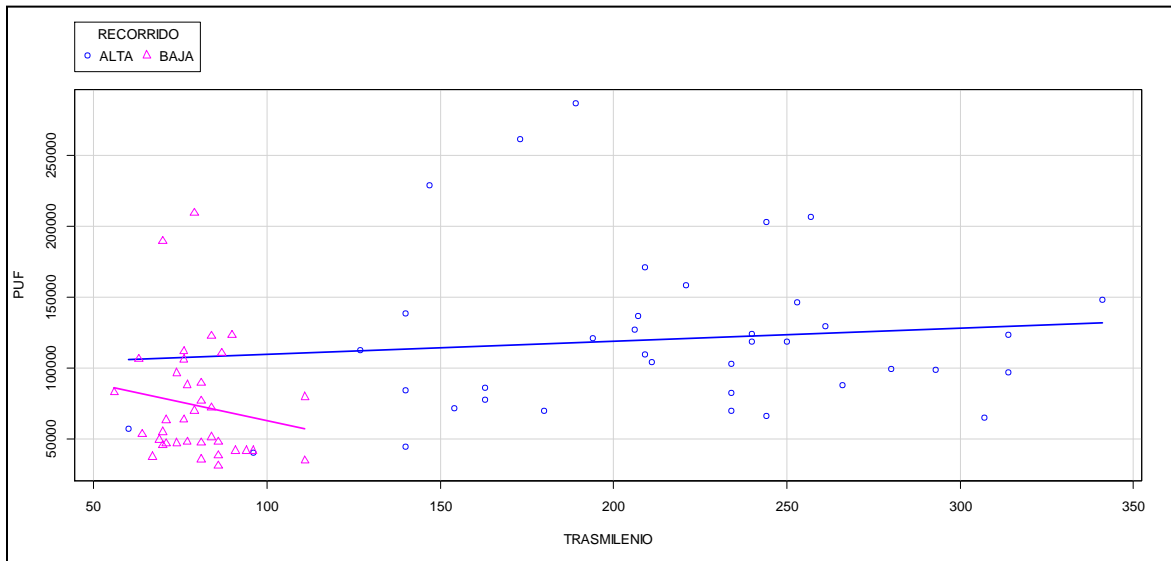
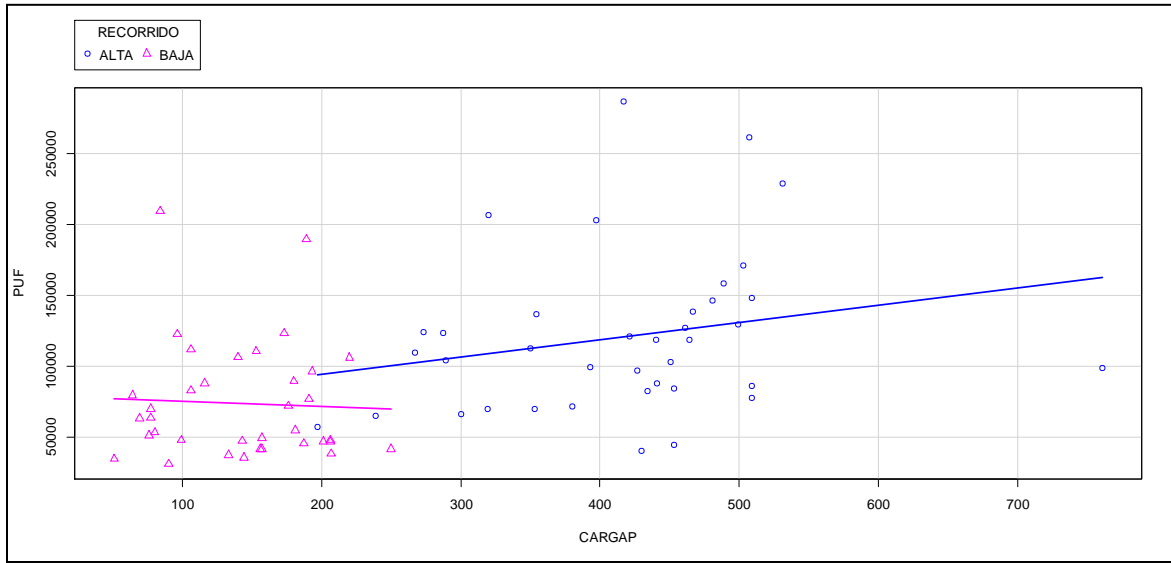
^a An individual's ventilation rate for the given activity category equals the weighted average of the individual's activity-specific ventilation rates for activities falling within the category, estimated using a multiple linear regression model, with weights corresponding to the number of minutes spent performing the activity. Numbers in these two columns represent averages, calculated across individuals in the specified age category, of these weighted averages. These are weighted averages, with the weights corresponding to the 4-year sampling weights assigned within NHANES 1999–2002.

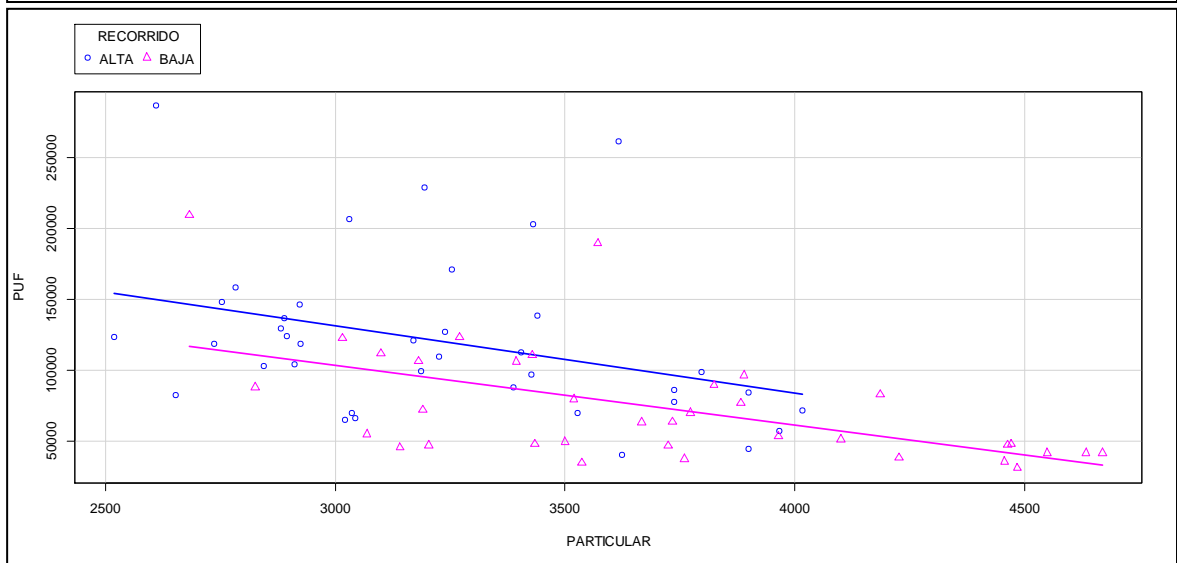
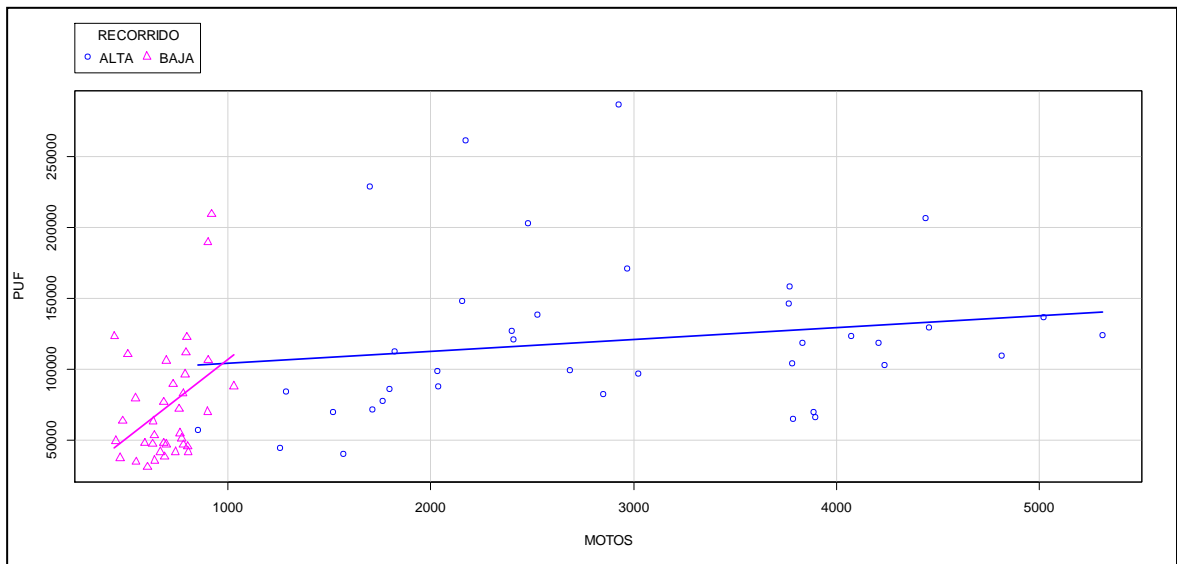
N = Number of individuals.
MET = Metabolic equivalent.

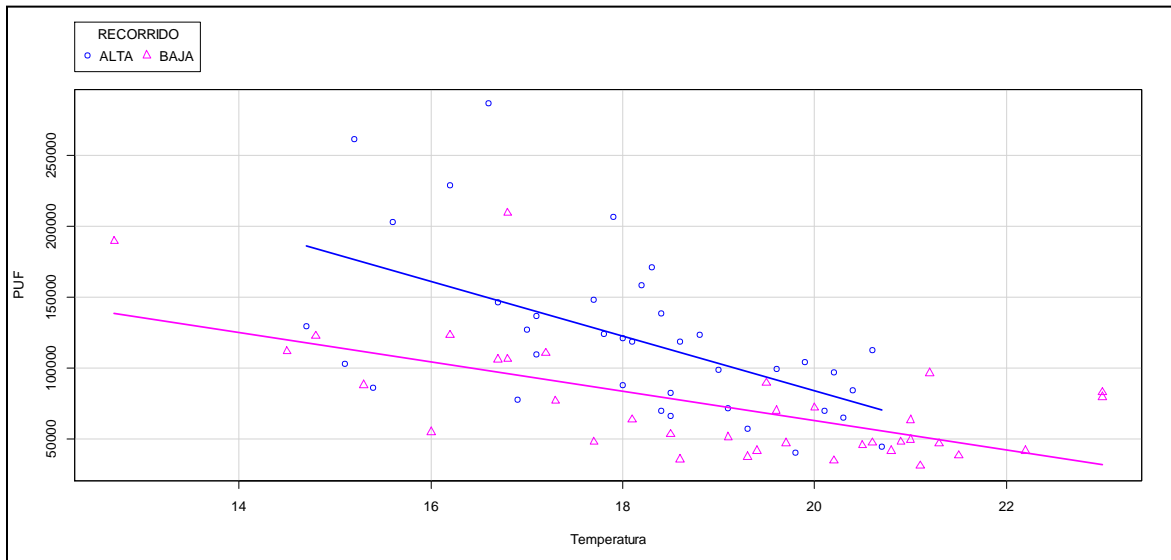
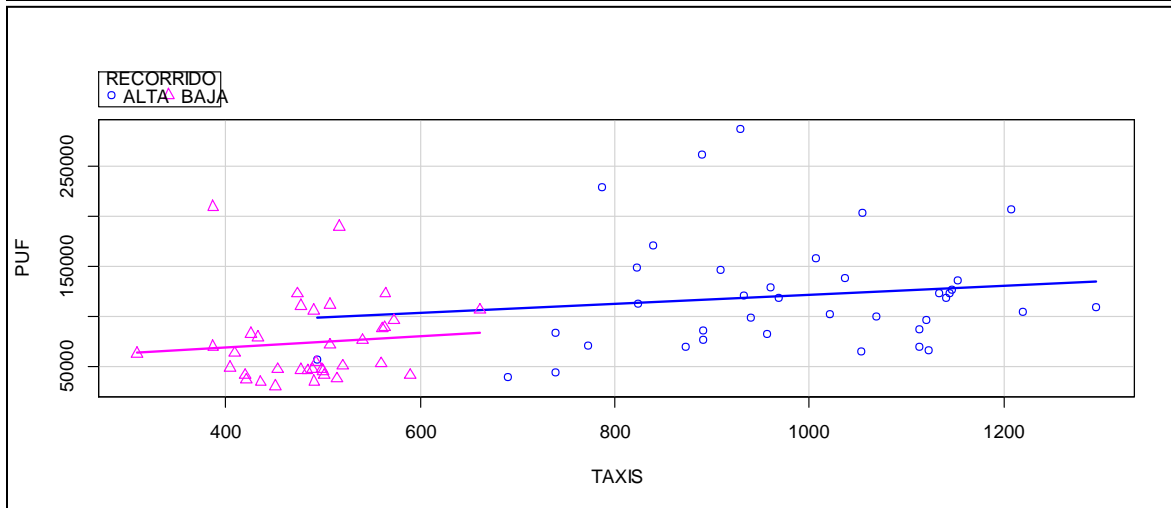
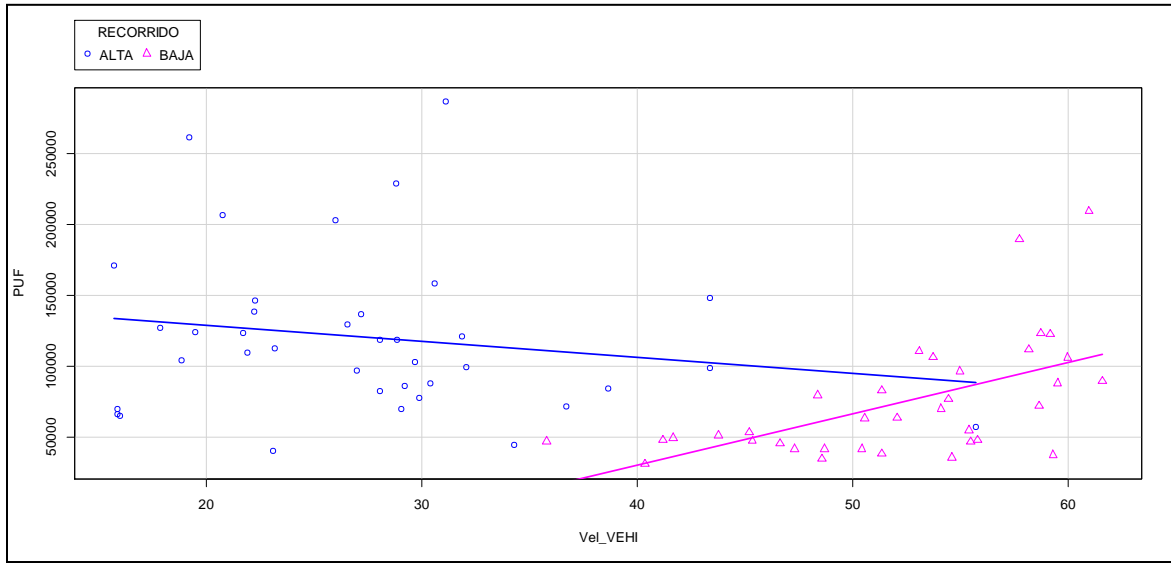
Source: U.S. EPA (2009a).

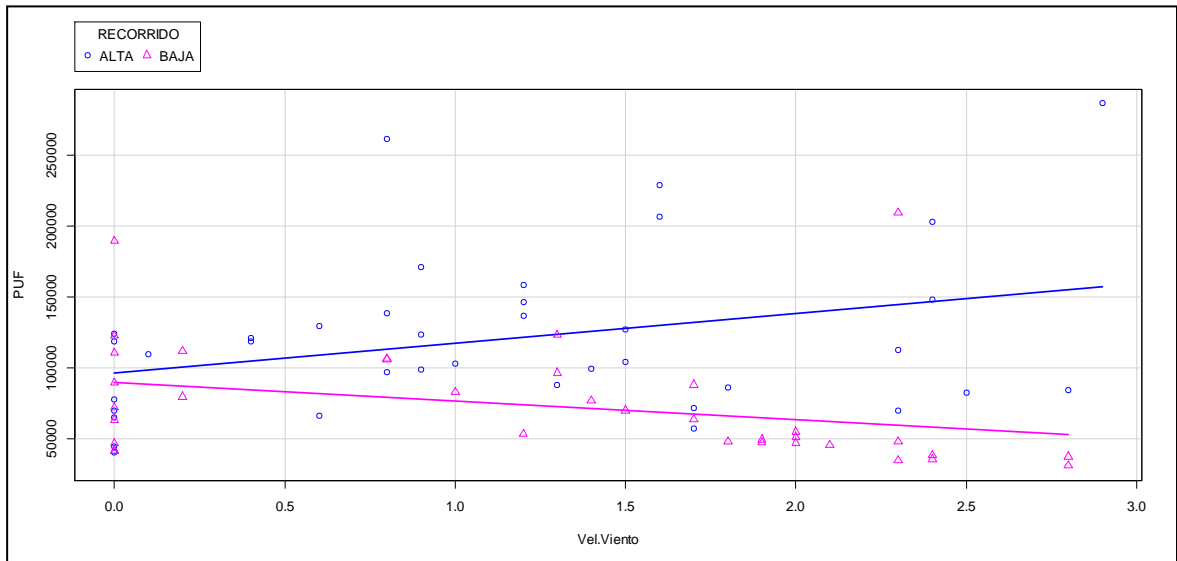
ANEXO j: Diagramas de dispersión entre las variables de aforo y la concentración de PUF en el Aire











Bibliografía

1. Descubre las ciudades más preparadas para la bicicleta en Europa [Internet]. [cited 2021 May 20]. Available from: <http://www.e-park.es/es/blog/las-ciudades-con-mas-bicicletas-en-europa>
2. La bicicleta se impone como mejor opción de transporte en más de 100 ciudades [Internet]. [cited 2020 Nov 28]. Available from: <https://www.larepublica.co/ocio/la-bicicleta-se-impone-como-mejor-opcion-de-transporte-en-mas-de-100-ciudades-2997736>
3. Administración Distrital revela resultados de la Encuesta de Movilidad 2019 para Bogotá y 18 municipios vecinos | Secretaría Distrital de Movilidad [Internet]. [cited 2021 Jun 8]. Available from: https://www.movilidadbogota.gov.co/web/Noticia/administracion_distrital_revela_resultados_de_la_encuesta_de_movilidad_2019_para_bogota_y_18
4. El protagonismo de la bicicleta - Bogotá Cómo Vamos [Internet]. [cited 2021 May 31]. Available from: <https://bogotacomovamos.org/el-protagonismo-de-la-bicicleta/>
5. Muévete en Bici por Bogotá | Secretaría Distrital de Movilidad [Internet]. [cited 2021 Jun 8]. Available from: <https://www.movilidadbogota.gov.co/web/muevete-en-bici-por-bogota>
6. World Air Quality Index (AQI) Ranking | AirVisual [Internet]. [cited 2021 Jun 8]. Available from: <https://www.iqair.com/world-air-quality-ranking>
7. Giraldo LA, Behrentz E. Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variables pertinentes. 2005;(1):1–16.
8. Rojas NY. Material particulado atmosférico y salud. Bogotá: Ediciones Uniandes, Facultad de Ingeniería.; 2005.
9. Nicholson JP, Case DB. Carboxyhemoglobin Levels in New York City Runners. *Phys Sportsmed*. 1983;11:3(August):134–8.
10. 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>
11. McCafferty WB. *Air Pollution and Athletic Performance*. 1981.
 12. Rubio Barbón S, García Fernández ML. Intoxicación por monóxido de carbono. *Med Clin (Barc)*. 1997;108(20):776–8.
 13. Dinero. Bogotá, ejemplo mundial de las dos ruedas [Internet]. 2015 [cited 2017 Nov 16]. Available from: <http://www.dinero.com/pais/articulo/uso-bicicletas-colombia/208797>
 14. Palacios Rozo M, de Greiff A, Antorveza Triana A, Rodríguez A, Pérez-Almonacid R. Vida universitaria y bienestar. *Estudios y reflexiones*. 2005;139.
 15. Planeación O de. Estadísticas e indicadores de la Universidad Nacional de Colombia. *Rev la Of Nac Planeación* [Internet]. 2013;19:147. Available from: http://www.onp.unal.edu.co/ADMON_ONP/ADJUNTOS/20141211_112012_2013 Revista Indicadores y estadísticas 2014dic11.pdf
 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. 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>
 18. Monóxido de carbono. Cuidado con el asesino silencioso | Centro Nacional de Prevención de Desastres | Gobierno | gob.mx [Internet]. [cited 2021 May 21]. Available from: <https://www.gob.mx/cenapred/es/articulos/monoxido-de-carbono-cuidado-con-el-asesino-silencioso?idiom=es>
 19. 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. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2014.05.006>
20. Park HY, Gilbreath S, Barakatt E. Respiratory outcomes of ultrafine particulate matter (UFPM) 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>
 21. 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://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231017301309>
 22. Carlisle AJ, Sharp NCC. Exercise and outdoor ambient air pollution. 2001;214–22.
 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. Terashima P, Andrés R, Jaimes P, Rocío L, Yupanqui R, Antonio M, et al. Variación del nivel de carboxihemoglobina en corredores aficionados en ambientes con tránsito de vehículos motorizados en el distrito de San. *Ann Intern Med*. 2005;16(4):266–72.
 25. Wu S, Deng F, Hao Y, Shima M, Wang X, Zheng C, et al. Chemical constituents of fine particulate air pollution and pulmonary function in healthy adults: The Healthy Volunteer Natural Relocation study. *J Hazard Mater* [Internet]. 2013;260:183–91. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.05.018>
 26. 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>
27. Rundell KW, Slee JB, Caviston R, Hollenbach AM. Decreased lung function after inhalation of ultrafine and fine particulate matter during exercise is related to decreased total nitrate in exhaled breath condensate. *Inhal Toxicol*. 2008;20(1):1–9.
 28. 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.
 29. Fajardo OA, Rojas NY. Particulate matter exposure of bicycle path users in a high-altitude city. *Atmos Environ*. 2012;46:675–9.
 30. Franco JF, Segura JF, Mura I. Air Pollution alongside Bike-Paths in Bogotá-Colombia. *Front Environ Sci* [Internet]. 2016;4(November):1–10. Available from: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fenvs.2016.00077/full>
 31. Carnicer J. Contaminación Atmosférica. *Contam Atmosférica* [Internet]. 2007;1:320. Available from: http://books.google.com/books?id=86oL_Ybnwn8C&pgis=1
 32. Monóxido de Carbono. [cited 2017 Nov 11]; Available from: <http://www.siafa.com.ar/notisiafa/13/monoxidodecarbono.pdf>
 33. US EPA O. Basic Information about Carbon Monoxide (CO) Outdoor Air Pollution. [cited 2017 Nov 11]; Available from: [https://www.epa.gov/co-pollution/basic-information-about-carbon-monoxide-co-outdoor-air-pollution#What is CO](https://www.epa.gov/co-pollution/basic-information-about-carbon-monoxide-co-outdoor-air-pollution#What%20is%20CO)
 34. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). ATSDR - Public Health Statement: Carbon Monoxide [Internet]. [cited 2021 Jan 10]. Available from: <https://www.atsdr.cdc.gov/phs/phs.asp?id=1146&tid=253>
 35. (CDC) C for DC and P. CDC - NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards - Carbon monoxide [Internet]. [cited 2021 Jan 10]. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0105.html>
 36. Rodríguez NYRJAEGCCDAIR. EVALUACIÓN TOXICOLÓGICA

- OCUPACIONAL DE LA EXPOSICIÓN A CONTAMINANTES DEL AIRE.
Centro Edi. 2018. 77–87 p.
37. AMDUR M.O., DOULL J. KC. Casarett & Doull's Toxicology. 1992. 523, 530, 857–859 p.
 38. Guzman JA. Carbon Monoxide Poisoning. Crit Care Clin [Internet]. 2012;28(4):537–48. Available from:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ccc.2012.07.007>
 39. Arango S e. Biomarcadores para la evaluación de riesgo en la salud humana. Rev Fac Nac Salud Pública. 2012;30:75–82.
 40. Martín-Olmedo P, Carroquino Saltó M, Ordóñez Iriarte J, Moya J. La Evaluación de riesgos en salud. Guía metodológica. Aplicaciones prácticas de la metodología de Evaluación de riesgos en salud por exposición a químicos. [Internet]. Sociedad Española de sanidad ambiental; 2016. 250 p. Available from:
https://www.diba.cat/documents/467843/96195101/Evaluacion_riesgos_salud_Guia_metodologica.pdf/37481f80-8641-4a42-a647-eb7f24808d33
 41. Diaz DSR. Validación Del Método Para Determinación De Carboxihemoglobina En Sangre Total Por Técnica Espectrofotométrica Con Reducción Con Ditionito De Sodio. 2011;63.
 42. OMS. Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. 2016.
 43. 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>
 44. Pant P, Harrison RM. Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: A review. Atmos Environ [Internet]. 2013;77:78–97. Available from:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.028>
 45. Rückerl R, Hampel R, Breitner S, Cyrys 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. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2014.05.013>
46. 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://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1728869X17302459>
 47. Jeong CH, Traub A, Evans GJ. Exposure to ultrafine particles and black carbon in diesel-powered commuter trains. *Atmos Environ* [Internet]. 2017 [cited 2021 Jan 10];155:46–52. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.02.015>
 48. Ma N, Birmili W. Estimating the contribution of photochemical particle formation to ultrafine particle number averages in an urban atmosphere. *Sci Total Environ* [Internet]. 2015 Apr 5 [cited 2021 Jan 10];512–513:154–66. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.009>
 49. Kumar P, Morawska L, Birmili W, Paasonen P, Hu M, Kulmala M, et al. Ultrafine particles in cities [Internet]. Vol. 66, *Environment International*. Elsevier Ltd; 2014 [cited 2021 Jan 10]. p. 1–10. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2014.01.013>
 50. DiSC M. Instruction Manual Rev 1.1, July 15, 2010. 2010 [cited 2018 Apr 4]; Available from: http://fierz.ch/minidisc/pdf/miniDiSC_manual.pdf
 51. Peixoto MS, de Oliveira Galvão MF, Batistuzzo de Medeiros SR. Cell death pathways of particulate matter toxicity. *Chemosphere*. 2017;188:32–48.
 52. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Óxidos de nitrógeno (monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, etc.) (Nitrogen Oxides) | ToxFAQ | ATSDR [Internet]. 2016 [cited 2020 Oct 27]. Available from: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts175.html
 53. ICSC 0930 - DIÓXIDO DE NITRÓGENO [Internet]. [cited 2021 Jan 10]. Available from: https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=0930&p_version=2

54. Valladolid R de C de la CA del A de. Óxidos de Nitrógeno NO/NO₂ | Portal Web del Ayuntamiento de Valladolid [Internet]. [cited 2021 Jan 10]. Available from: <https://www.valladolid.es/es/rccava/contaminantes/oxidos-nitrogeno-no2>
55. Rom W. Medicina ambiental y ocupacional. 2nd ed. Boston, MA: Little B and C, editor. 1992. 504 p.
56. Scientifique II national de la recherche. Oxydes d'azote (FT 133). Pathologie - Toxicologie - Fiche toxicologique - INRS [Internet]. [cited 2020 Nov 12]. Available from: https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_133§ion=pathologieToxicologie#tab_toxiHomme
57. Lewis Goldfrank. Toxicologic Emergencies Goldfrank's. 8th ed. McGraw-Hill Professional; 2002.
58. Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. Documentación toxicológica para el Establecimiento del Límite de Exposición Profesional del Dióxido de Azufre. Doc límites Expo Prof [Internet]. 2014;1–5. Available from: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/LEP_VALORES LIMITE/Doc_Toxicologica/Capitulos 83_90/Ficheros 2014/DLEP 86 DIOXIDO DE AZUFRE.pdf
59. PRTR-España. SO_x (Óxidos de azufre) | PRTR España [Internet]. [cited 2021 Jan 10]. Available from: <http://www.prtr-es.es/SOx-oxidos-de-azufre,15598,11,2007.html>
60. ICSC 0074 - DIÓXIDO DE AZUFRE [Internet]. [cited 2021 Jan 10]. Available from: https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=74&p_version=1&p_lang=es
61. LAUWERYS R. Gaz et vapeurs irritants et asphyxiants. Toxicologie indus-trielle et intoxications professionnelles. 1990. 388-391. p.
62. Organización Mundial de la Salud (OMS). Oxydes de soufre et particules en suspension. Critères d'hygiène de l'envi-ronnement n° 8. Genève. 1979. 123 p.

63. Lyon C international de recherche sur le cancer. IARC Monographs on the evaluation of the carcinogenic risks of chemi-cals to humans - Sulfur dioxide and some sulfites, bisulfites and metabi-sulfites. 1992. 131–188 p.
64. INRS: Institut national de la recherche scientifique. Dioxyde de soufre (FT 41). Pathologie - Toxicologie - Fiche toxicologique - INRS [Internet]. [cited 2020 Nov 11]. Available from:
https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_41§ion=pathologieToxicologie
65. JAPPINEN P. TS. Cardiovascular mortality among pulp mill workers. *Br J Ind Med*. 1990;47:259–62.
66. Solaun K, Sopelana A, Arraibi E, Pérez M. Series CO2: Black Carbon y sus efectos en el clima. *Factor CO2* [Internet]. 2014;52. Available from:
https://www.factorco2.com/comun/docs/131-Series_CO2_Black_Carbon_Factor_CO2_20140613.pdf
67. Smart Freight Centre. BLACK CARBON METHODOLOGY FOR THE LOGISTICS SECTOR [Internet]. 2017 [cited 2021 Jan 10]. Available from:
www.smartfreightcentre.org
68. En M, Abraham Ortínez C. Diseño y operación de la Red Nacional de Carbono Negro [Internet]. Ciudad de Mexico; 2015 [cited 2021 Jan 10]. Available from:
http://aire.nl.gob.mx/docs/reportes/seminario/04_Carbono_Negro-Abraham_Ortinez.pdf
69. Dalin J, Kouteli E WR. *Espirometrie en Matriser les épreuves fonctionnelles respiratoires. De la théorie à la clinique*. Elsevier M. 2007.
70. Crapo RO, Hankinson JL, Irvin C, MacIntyre NR, Voter KZ, Wise RA, et al. Standardization of spirometry: 1994 Update. *Am J Respir Crit Care Med*. 1995;152(3):1107–36.
71. Centers for Disease Control and Prevention. Unidad 5: Cálculos Espirométricos Básicos. 2004; Available from:
https://www.cdc.gov/spanish/niosh/docs/2004-154c_sp/pdfs/2004-154c-

- ch5.pdf
72. Agustin F L V. Pico flujo espiratorio maximo. Soc Española Alergol e Inmunol Clin. 2013;17.
 73. Ignacio Carvajal. Esprometria forzada. 2005;201–16. Available from: www.aepap.org
 74. Tobi A, Carracedo-martí E, Taracido M. Diseño de casos cruzados Fundamentos y aplicaciones del disen y Adolfo Figueiras. 2009;23(2):161–5.
 75. García-García JA, Reding-Bernal A, López-Alvarenga JC. Cálculo del tamaño de la muestra en investigación en educación médica. Investig en Educ Médica [Internet]. 2013;2(8):217–24. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2007505713727157>
 76. microAeth® / AE51 | AethLabs [Internet]. [cited 2020 Nov 3]. Available from: <https://aethlabs.com/microaeth/ae51/tech-specs>
 77. Hagler GSW, Yelverton TLB, Vedantham R, Hansen ADA, Turner JR. Post-processing Method to Reduce Noise while Preserving High Time Resolution in Aethalometer Real-time Black Carbon Data. 2011;539–46.
 78. ACTUALIZACIÓN ATS/ERS 2019 DE LA ESTANDARIZACIÓN DE LA ESPIROMETRÍA – SENP – Sociedad Española de Neumología Pediátrica [Internet]. [cited 2021 Jan 29]. Available from: <https://neumoped.org/actualizacion-ats-ers-2019-de-la-estandarizacion-de-la-espirometria/>
 79. Polar H10 | Banda pectoral pulsómetro | Polar Colombia [Internet]. [cited 2020 Oct 30]. Available from: https://www.polar.com/co-es/productos/accesorios/sensor_de_frecuencia_cardiaca_h10
 80. Coelho-ravagnani CDF. ESTIMATION OF THE METABOLIC EQUIVALENT (MET) OF AN EXERCISE PROTOCOL BASED ON. 2013;19(1975):1–5.
 81. U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). Exposure Factors Handbook : 2011 Edition. 2011;(September).
 82. IVEM. Field Data Collection Activities.
 83. 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.
84. Kaur S, Nieuwenhuijsen M, Colville R. Personal exposure of street canyon intersection users to PM_{2.5}, ultrafine particle counts and carbon monoxide in Central London, UK. *Atmos Environ.* 2005;39(20):3629–41.
85. Carlos Orduz García. Pruebas de Función Pulmonar. En *Asma Ocupacional*. Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Medicina. Medicina. 2000.
86. Gidney JT, Twigg M V., Kittelson DB. Effect of organometallic fuel additives on nanoparticle emissions from a gasoline passenger car. *Environ Sci Technol.* 2010;44(7):2562–9.
87. da Silva Junior CR, Lemos BRL, Pinto JP, Amador IR, Solci MC. Black carbon associated to PM_{1.0} and PM_{2.5}: Mass variation due to combustion of biodiesel/diesel blends (B5, B6, B7 and B8). *J Braz Chem Soc.* 2019;30(4):786–92.
88. Matt F, Cole-Hunter T, Donaire-Gonzalez D, Kubesch N, Martínez 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>
89. 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.
90. Cole CA, Carlsten C, Koehle M, Brauer M. Particulate matter exposure and health impacts of urban cyclists: A randomized crossover study. *Environ Heal A Glob Access Sci Source.* 2018;17(1):1–14.
91. Aronow WS, Cassidy J. Effect of carbon monoxide on maximal treadmill exercise. A study in normal persons. *Ann Intern Med* [Internet]. 1975 Oct [cited 2017 Nov 10];83(4):496–9. Available from:

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1101762>