



ESTIMATES OF PERSONAL EXPOSURE TO PARTICULATE MATTER, NICKEL AND COBALT IN CYCLE ROUTE ACTIVITIES ON SUNDAY FROM 170th STREET AND 9th STREET TO 116th STREET AND 15th IN THE NORTHERN SECTION OF THE CITY OF BOGOTÁ, COLOMBIA.

ESTIMACIONES DE EXPOSICIÓN PERSONAL A MATERIAL PARTICULADO, NÍQUEL Y COBALTO EN ACTIVIDADES DE CICLORUTA DÍA DOMINGO DESDE LA CALLE 170 CON 9 HASTA LA CALLE 116 CON 15 EN EL TRAMO NORTE DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ, COLOMBIA.

RODRÍGUEZ SOTOMONTE JUAN SEBASTIÁN, SÁNCHEZ ORJUELA ANGIE VANESSA.

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

KEYWORDS

Particulate matter, Nickel, Exposure, Bicycle Lane, Cobalt, Inhalation.

Material particulado, níquel, exposición, ciclovía, cobalto, inhalación

RESUMEN: Este estudio tiene como objetivo determinar el grado de exposición a material particulado y metales pesados en la ciclovía, en el tramo comprendido entre la calle 170 con 9 hasta la 116 con 15, corredor vial que se caracteriza por ser muy transitado en el contexto urbano de la ciudad de Bogotá, Colombia. Lo anterior, debido a la alta presencia de flujo vehicular durante los domingos, puesto que se trata de un espacio utilizado para la recreación y la actividad física de los usuarios de la ciclovía. Para esto, se realizaron mediciones de las concentraciones de material particulado, níquel y cobalto, presente en recorridos de ida y vuelta en bicicleta. El periodo de monitoreo se llevó a cabo durante los domingos comprendidos entre el 27 de febrero al 17 de julio de 2022, en el horario de 9:30 a.m. a 11:30 a.m., empleando equipos como el Airbeam 2 y la bomba personal GilAir 3. Se desarrolló un análisis descriptivo y exploratorio, identificando concentraciones promedio durante dos horas de PM_{10} de $7.73 \mu g/m^3$ y de $6.6 \mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$ lo que arrojó como resultado que no existe una afectación evidente a la salud de la población objeto de análisis, dado que no se encontraron concentraciones de níquel y cobalto en las muestras de PM_{10} en los filtros obtenidos en el muestreo.

ABSTRACT: This study aims to determine the degree of exposure to particulate matter and heavy metals in the bicycle lane, in the section between 170th and 9th Street and 116th and 15th Street, a road corridor that is characterized by being very busy in the urban context of the city of Bogotá, Colombia. The above, due to the high presence of vehicular flow during Sundays, since it is a road corridor used for recreation and physical activity by the users of the bicycle lane. Based on the above, measurements were made of the concentrations of particulate matter, nickel and cobalt, present on outbound and return bicycle routes. The monitoring period was carried out on Sundays from 27 February to 17 July 2022, from 9:30 a.m. to 11:30 a.m. using equipment as the Airbeam 2 and the GilAir 3 personal pump. A descriptive and exploratory analysis was carried out, identifying 2-hour average concentrations of PM_{10} of 7.73 ug/m³ and 6.6 ug/m³ of $PM_{2.5}$, which showed that there was no evident effect on the health of the population under analysis. No concentrations of nickel and cobalt were found in the PM_{10} samples in the filters obtained in the sampling.

1. Introducción

La ciclovía de Bogotá se ha caracterizado, desde el 15 de diciembre de 1974, fecha en que se inauguró, por ser un espacio donde se pueden movilizar aproximadamente un millón y medio de personas de manera segura, además de realizar actividad física al aire libre (Alcaldía de Bogotá, 2019). La ciclovía cuenta con un circuito de 127.69 kilómetros de extensión, y está disponible al público entre las 7:00 a.m. y las 2:00 p.m., restringiendo el flujo vehicular por vías que normalmente son de uso exclusivo de los automotores, con el fin de garantizar la seguridad de los peatones, ciclistas, patinadores, caminantes y demás (Alcaldía de Bogotá, 2022).

Uno de los tramos de la ciclovía, es el que se extiende por la Avenida Carrera Novena, la cual se caracteriza por ser una de las vías más importantes en términos de movilidad en Bogotá, puesto que cuenta con un alto flujo de vehículos de características livianas, transporte público (SITP), camiones y motos, generando altas concentraciones de contaminantes en el aire que pueden afectar la calidad de este, y la salud de las personas que transitan y hacen uso de la ciclovía.

Por lo anterior, se consideró necesario analizar las condiciones en que las personas desarrollan actividades recreativas y deportivas, dado que, según Fajardo y Rojas (2012), el cuerpo humano responde a un aumento de la frecuencia respiratoria cuando se está realizando una actividad física, debido a que se genera mayor consumo de oxígeno en relación con los músculos y órganos que se encuentran activos durante la actividad física, produciendo un mayor flujo de aire y, así mismo, una respuesta de mayor aire inhalado. Como consecuencia de este mayor esfuerzo, el cuerpo adquiere la capacidad de inhalar dosis más altas de contaminante del aire como, por ejemplo, el material particulado, el cual cuenta con una deposición más alta, llegando a presentar un alto nivel de riesgo en la salud (Fajardo y Rojas, 2012).

Teniendo en cuenta el tamaño de las partículas, este se encuentra relacionado de manera directa con la capacidad de generar afectaciones a la salud; todas aquellas partículas menores a 10 micrómetros de diámetro producen un daño elevado, puesto que por su tamaño, tienen más movimiento y

facilidad para ingresar a los pulmones o incluso alcanzar el torrente sanguíneo, dando lugar a una serie de enfermedades cardiorrespiratorias (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA], 2012).

Según la Organización Panamericana de la Salud (OPS, s.f.), en 2016, la mortalidad a causa de la contaminación del aire afectó a 7 millones de personas, mayormente a comunidades de bajos recursos en todo el mundo. Asimismo, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022) estimó que en el año 2016 la mortalidad por enfermedades como las cardiopatías isquémicas y los accidentes cerebrovasculares fue del 58 %, seguida por las enfermedades pulmonares obstructivas crónicas (18 %) y el cáncer de pulmón (6 %), por lo que resulta importante conocer cuáles son las consecuencias de estar expuesto a material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}). A largo plazo, la exposición a material particulado causa enfermedades pulmonares (Fischer, 2020) como, por ejemplo, broncoconstricción, bronquitis, traqueítis, asma, cáncer pulmonar.

El PM_{10} y $PM_{2.5}$ ingresa al organismo del individuo por vía nasal (PM_{10}) hasta los alvéolos ($PM_{2.5}$) (Plan Descontaminación Atmosférica para Osorno [PDAO], s.f.). Del mismo modo, la exposición a metales pesados níquel y cobalto (Ni y Co) causa efectos teratogénicos, cáncer, alteraciones de procesos bioquímicos y fisiológicos (Londoño - Franco, et al., 2016).

Franco et al. (2016) concluyeron que la bicicleta es un medio de transporte sostenible y tiene importantes beneficios para la salud de la población. Sin embargo, los niveles de contaminación indican mala calidad del aire y muestran que los ciclistas están expuestos a concentraciones que superan ampliamente los valores de umbral establecidos como potencialmente peligrosos para la salud humana. De esta manera, fue posible reconocer una clara dicotomía concerniente al hecho de asumir que, ante las altas concentraciones de partículas finas se pueden obtener, en el espacio señalado, beneficios para la salud, especialmente tomando en cuenta que los avances realizados mediante el ejercicio se ven afectados por los niveles de contaminantes. Se reconoce, por tanto, que al rebasar los umbrales establecidos como límites para no afectar la salud humana, a largo plazo, este recorrido no beneficia la salud de quienes practican dicha actividad.

Por otro lado, en lo concerniente a los factores de análisis relacionados con la contaminación del aire y su impacto en el planteamiento de políticas frente a lo urbano y las infraestructuras para el cuidado de este, Hernández et al. (2021), apostaron por el mejoramiento de la “comprensión de los problemas de contaminación relacionados con el tráfico en Bogotá, resaltando que la calidad del aire debe ser considerada al diseñar e implementar el ciclismo y su infraestructura en las ciudades latinoamericanas”.

Por lo anterior, es preciso afirmar que los resultados del trabajo de estos autores son una contribución significativa para la comprensión y el reconocimiento de la actividad física como un ámbito susceptible de ser analizado, estudiado e investigado, destacando algunos de los aspectos que funcionan como objeto de análisis en este caso tal y como la medición en tiempo real de material particulado ($PM_{2.5}$) y el carbono negro (BC) en dos carriles bici diferentes. En consecuencia, y

partiendo de los dos objetos de análisis propuestos, se logró determinar que la exposición de los ciclistas a $PM_{2.5}$ y BC varió de 10.5 a 36.0 $\mu g/m^3$ y 4.5 y 7.9 $\mu g/m^3$, respectivamente.

Por otra parte, según Hernández et al. (2021), los resultados fueron contundentes, puesto que los ciclistas expuestos a altas concentraciones de $PM_{2.5}$ se enfrentan a un gran riesgo en términos de salud. La exposición de ciclistas a $PM_{2.5}$ y BC en los carriles bici estudiados estaba muy ligado al tráfico de vehículos. Se observó, además, mayor exposición en ciclovías sin barreras entre el carril bici y la calzada. Asimismo, se detectaron varios metales en las muestras de $PM_{2.5}$, níquel (Ni), cromo (Cr), arsénico (As) y cadmio (Cd), que tienen fuertes consecuencias para la salud debido a sus efectos cancerígenos (Hernández et al., 2021).

Está claro que el Ni es un metal altamente apeteído en el campo de la tecnología actual, dadas sus características de resistencia, entre otros factores, a la corrosión (Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME], 2009), pues su resistencia a la corrosión, al calor y al frío hacen de este metal un material particularmente adaptable a la tecnología de hoy. Los factores que hacen al Ni y a sus aleaciones comercialmente valorables son su dureza, resistencia a la corrosión, alta ductilidad, buena conductividad térmica, características magnéticas y sus propiedades catalíticas (Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME], 2009, p.24).

Uno de los estudios dedicados a la búsqueda de los efectos nocivos de la fracción másica de las partículas inhaladas que penetran más allá de la laringe y sus efectos cancerígenos en el contexto urbano de Bogotá es el de Ramírez et al. (2019), donde, Cu, Zn, Pb y Ba fueron los metales traza con las concentraciones más altas en la fracción torácica. A partir de este, la mayoría de los metales seleccionados y los metaloides tuvieron niveles más altos en la estación seca (enero a marzo), caracterizada por incendios forestales locales y regionales recurrentes y quema de carbón de barbacoa, especialmente durante la primera quincena de enero. Las concentraciones de Cu y Pb fueron mayores durante los fines de semana que de lunes a viernes, lo que podría deberse a emisiones industriales.

De acuerdo con el hallazgo de este análisis, las concentraciones de metales, tales como cobre (Cu), zinc (Zn), plomo (Pb) y bario (Ba) no fueron significativas y mucho menos poseen una influencia determinante en el desarrollo de cáncer por parte de aquellos individuos que circulan por la denominada megaciudad de Bogotá. Teniendo en cuenta este panorama, el objetivo de la presente investigación fue determinar la concentración de exposición a material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), níquel y cobalto, en el tramo de la Calle 170 con 9 hasta la Calle 116 con 15. Los resultados del presente trabajo ayudarán a generar estrategias para que las instituciones encargadas, puedan emitir normas o medidas que mejoren la calidad del aire de las personas y así poder habitar en un entorno saludable.

2. Materiales y métodos

El presente estudio está enmarcado dentro del proyecto de investigación “Estimación de la exposición personal a material particulado menor de 10 micras (PM₁₀) y metales pesados en tres ciclovías de Bogotá durante 2022”, perteneciente al Semillero de Salud Ambiental de la Facultad de Ingeniería Ambiental, el cual contó con la financiación de la Convocatoria de Estrategia de Formación CTel 2209 de 2022 de la Dirección Nacional de Investigaciones de la Universidad Santo Tomás, sede Bogotá.

El método aplicado en el presente proyecto fue el observacional y experimental, dado que facilita el estudio de comportamientos perceptibles y descompone elementos que van de lo general a lo particular, de forma que se registren y cuantifiquen adecuadamente, permitiendo analizar relaciones de secuencialidad, asociación y covariación e identificando las conductas de las personas de una manera no reactiva y/o en un contexto natural donde los sujetos evaluados se comporten de manera espontánea y en donde el evaluado no intervenga ni modifique ningún aspecto contextual (Sanjuan, 2011).

1. Trayecto Seleccionado

Teniendo en cuenta la cercanía del tramo al lugar de residencia de los investigadores, sumado a que el circuito se ubica en la localidad de Usaquén y considerando que dicha localidad presenta las mejores condiciones de calidad del aire de la ciudad según la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA, 2021): “En relación con los promedios anuales de 2020 son los más altos desde 2016 a excepción de la estación de Usaquén, debido a los cambios en el compartimiento de las fuentes de emisión en comparación con años anteriores”, pero se observa una tendencia notable al aumento con el paso del tiempo.

Por lo anterior, se seleccionó el tramo de la calle 170 con 9 hasta la calle 116 con carrera 15, que corresponde en parte al trayecto norte 4 carrera 9, calle 147 y calle 170 de la ciclovía dominical (Ciclovía Bogotá, 2023). Así, durante 12 domingos, que equivalen a 3 meses, por un periodo de dos horas (9:30 a 11:30 a.m.) se llevó a cabo el recorrido en bicicleta del tramo seleccionado, transitando aproximadamente 13.95 km entre ida y regreso. Dentro del tramo seleccionado se elaboró una bitácora de campo que tuvo en cuenta el flujo vehicular y la presencia de comercio, evidenciando que más del 75 % de la longitud del tramo presenta una misma configuración (ver Foto 1).

Foto 1. Configuración del trayecto calle 170 con novena hasta la calle 116 con carrera quince.



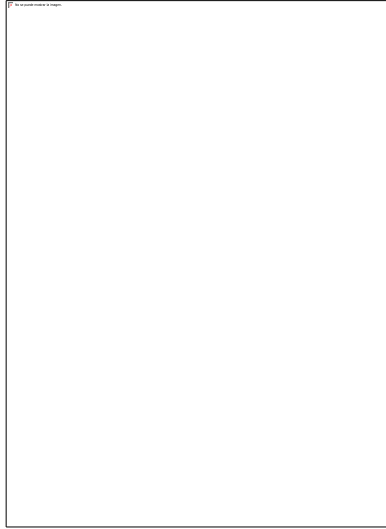
Fuente. Fotografía tomada por los autores.

2. Equipos e insumos

Para realizar la medición de material particulado, níquel y cobalto, se utilizaron los siguientes equipos:

1. Airbeam 2. Sensor de bajo costo que, mediante el método de dispersión de luz, captura las partículas de PM_{10} y $PM_{2.5}$, temperatura y humedad (Environmental Health Centers [USC], s.f.) haciéndolas pasar por una cámara de detección que, por medio de un láser, cuantifica la concentración de partículas por su tamaño en la corriente de aire (ver figura 1). El sensor toma mediciones en tiempo real por segundo, las cuales se transmiten a un teléfono móvil a través de la aplicación Android AirCasting, mediante conexión Bluetooth para, posteriormente, descargarlas y analizarlas (Chaeha, 2018).

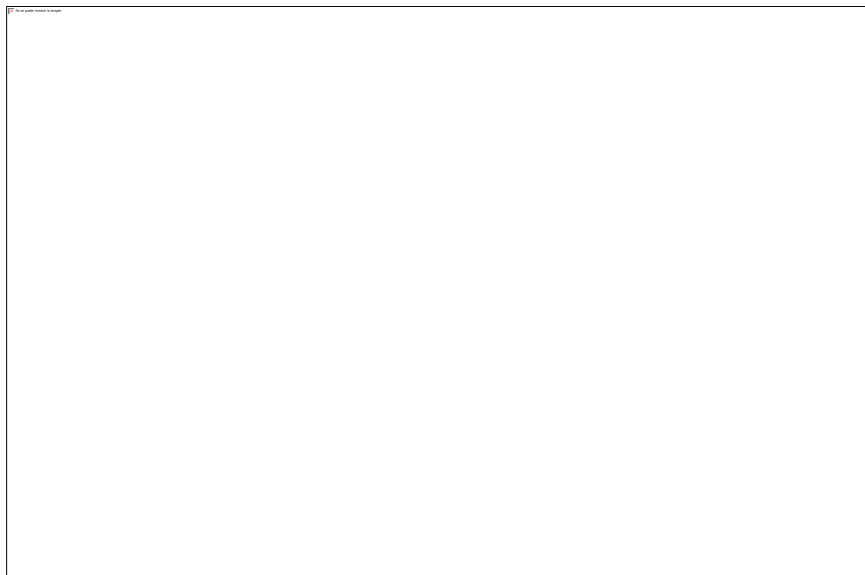
Figura 1. Componentes del Airbeam 2



Fuente. Tomado de AirBeam 2 Technical Specifications, Operation & Performance, por C. Chaeha, 2018 (<https://www.habitatmap.org/blog/airbeam2-technical-specifications-operation-performance>)

2. Bomba personal GilAir 3. Para obtener las concentraciones de PM_{10} , $PM_{2.5}$, níquel y cobalto, se empleó la bomba marca GilAir 3, la cual funciona bajo el método gravimétrico, permitiendo estimar la concentración de material particulado ante la que se expone una persona (ver figura 2). La bomba funciona a un caudal entre los 1 a 4 litros por minuto y se conecta mediante una manguera plástica a un ciclón (Figura 3) que separa las partículas suspendidas totales, recolectando la fracción menor a 10 micras en un filtro de 33 mm de diámetro elaborado en fibra de cuarzo (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo [INSST], s.f.).

Figura 2. Bomba personal GilAir 3



Fuente. Tomado de Estudio de material particulado polvo total, por SISOMAC S. A. S., s.f. (<http://sisomac.co/nuestros-servicios/higiene-industrial/estudio-material-particulado-polvo-total/>).

Figura 3. Ciclón y porta filtro utilizado junto a la bomba GilAir 3



Fuente. Tomado de Cyclone LC Programmers User Manual, por P&E Microcomputer Systems, Inc, 2019 (<https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/CYCLONE-User-Manual.pdf>)

Para obtener los pesos de los filtros utilizados en la bomba GilAir 3, estos fueron acondicionados con el fin de eliminar la humedad presente en ellos, tanto antes como después del monitoreo. Para lograrlo, se empleó un desecador (Romero, 2009) con sílica gel, durante un periodo de 24 horas, posteriormente los filtros se llevaron a una balanza analítica, donde se obtuvo el peso de los filtros.

1. Metales seleccionados.

Los metales seleccionados para el análisis hacen parte del grupo de metales tóxicos con efectos graves (níquel) y metales esenciales con capacidad tóxica (cobalto) (Klaassen y Watking, 2005). Anteriormente, estos fueron identificados en estudios realizados en el Jardín Botánico de Bogotá (Ramírez et al, 2019) y en la Universidad EAN de la localidad de Chapinero (Hernández et al, 2021), marco de referencia para el presente estudio. Para la determinación de níquel y cobalto, se utilizaron los filtros de la bomba GilAir-3 dentro de los que se analizaron 12 filtros. Estos se llevaron al Laboratorio de instrumentación de Alta Complejidad (LIAC) de la Universidad de la Salle para su identificación mediante el método de espectroscopia de plasma acoplado inductivamente (ICP), que también se puede encontrar en la literatura como ICP- AES (espectrometría de emisión atómica) o ICP-OES (espectrometría de emisión óptica). Este análisis se realizó porque es el método

consistentemente utilizado para analizar niveles bajos de metales pesados (entre 1 y 10 ppb) (Carburos Metálicos, 2022).

2. Análisis estadísticos

1. Promedio

AirCasting cuyos datos miden PM_{10} , $PM_{2.5}$, humedad relativa y temperatura, también contiene dichos elementos en formato ZIP, por lo que fue necesario descomprimir los datos para exportarlos al programa Excel. Lo anterior permitió hacer el análisis estadístico del error en la medición a través de la evidencia de espacios vacíos o valores de 0, y una vez depurada la base de datos, se calculó el valor medio de contaminantes medidos por segundo (PM_{10} y $PM_{2.5}$) de manera estadística junto con la temperatura y la humedad relativa; esto último mediante la función de Excel de la media geométrica, la cual se recomienda para datos de series geométricas y proporciones medias.

1. Estadística

Para el análisis estadístico se empleó el programa estadístico Stata/IC 11.0. En el programa Excel se realizó la división de los tramos ida y regreso para el PM_{10} y $PM_{2.5}$, para luego copiarlos en el programa Stata/IC 11.0. Dentro del programa se manejó la programación de sum variable det con las variables de los contaminantes a analizar por tramo ida y regreso, junto con la totalidad del tramo, de tal manera que se pudiera tener el total de los datos, los percentiles, el dato mínimo, máximo y media por cada uno de los contaminantes a analizar.

1. Determinación de concentraciones

Para el análisis estadístico de la determinación de las concentraciones de los filtros, se diferenciaron los pesos iniciales de los finales para cada uno de los doce filtros, teniendo en cuenta que este peso se encontró en gramos (gr). Pero para poder comparar con la Resolución 2254 de 2017 fue necesario pasar este peso a microgramos (μg). Posteriormente, con el caudal ajustado de la bomba GilAir-3 de 4 L/min y el total de tiempo recorrido en minutos que fue de 120 minutos, se procedió a hallar el volumen en L, para luego pasarlo a metros cúbicos (m^3). Una vez conseguidos los valores, se determinaron las concentraciones a partir de la ecuación 1:

Ecuación 1. Determinación de Concentración

$$\text{Concentración} = \frac{\text{Diferencia de Pesos } (\mu\text{g})}{\text{Volumen } (\text{m}^3)}$$

Para conocer cómo se particionan las variables de manera estadística, se utilizaron gráficas de distribución con la herramienta Shapiro Wilk; si la partición no es aplicable, se utilizó la prueba de hipótesis no paramétrica y se realizó la correlación de rangos de Spearman Rank, a partir de la cual se obtuvo la correlación percentil entre fracciones de un mismo contaminante.

1. Cálculo de la dosis inhalada

A partir del Manual de factores de exposición de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (*Exposure Factors Handbook* - Google Libros, 1989), junto con el trabajo de Fajardo y Rojas (2012), se calculó la dosis promedio inhalada (DI) de las personas que usan la bicicleta para realizar actividad deportiva el domingo, con una duración promedio de 120 minutos (ver mapa 1). La DI se define a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Dosis Inhalada Promedio

$$DI = \frac{C * IR * ED}{BW}$$

Fuente. Adaptado de “Particulate matter exposure of bicycle path users in a high-altitude city”, por O. Fajardo y N. Rojas, 2012, *Atmospheric Environment*, 46.

Donde C es la concentración de PM_{10} y $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$); IR: es la tasa de incorporación (m^3/d) ED es la duración de la exposición durante un periodo de dos horas y BW es el peso corporal (kg) del ciclista. La IR se manejó con la velocidad del recorrido promedio durante cada uno de los recorridos del monitoreo, basándose en los datos de la tasa de inhalación dados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). Se tiene estipulado que, para hombres la IR es de $1,5 m^3/d$, y para las mujeres es de $1,25 m^3/d$ siendo este un esfuerzo ligero. Sin embargo, para los casos en los que se realiza un esfuerzo moderado o fuerte, la IR es de $3 m^3/d$ para el género masculino, y de $2,7 m^3/d$ para el género femenino (Fajardo y Rojas, 2012).

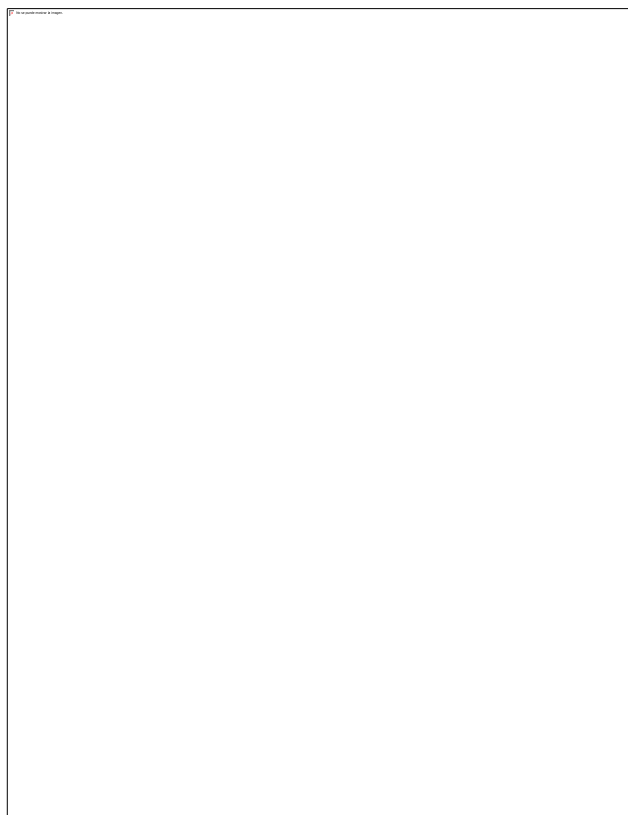
La DI es una medida importante para poder comprender la cantidad real de contaminantes que llega a los tejidos de la persona expuesta, por lo que realizar monitoreo de calidad del aire es de vital importancia, pero no suficiente para estudiar la amenaza potencial que puede tener la contaminación sobre los usuarios activos como lo son los ciclistas (The Health Effects Institute, 1988).

2. Resultados

1. Resultados del equipo de bajo costo (Airbeam)

Con las mediciones obtenidas a partir del equipo de bajo costo a tiempo real, se identificó el comportamiento del PM_{10} y $PM_{2.5}$ por segundo en cada uno de los trayectos, llevando a cabo una depuración de los datos para, posteriormente, analizar y graficar. En el Mapa 1, se observa el recorrido realizado en el tramo seleccionado.

Mapa.1 Recorrido Tramo Calle 170 con Novena hasta la Calle 116 con Carrera 15.



Fuente. Elaboración propia mediante el programa ArcMap.

Durante 12 días se completaron 24 horas de trayectos completos de medición (ida y regreso). Las fechas de las mediciones se escogieron de acuerdo con dos criterios: 1) días que tuvieran condiciones meteorológicas secas; 2) días que fueran solo domingo, puesto que este es el día en que los usuarios practican diferentes actividades deportivas en la ciclovía.

En la Tabla 1 se observan los valores promedio de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en las horas medidas durante los domingos de monitoreo.

Tabla 1. Parámetros de medición día domingo

Domingo / Parámetro	Media ($\mu g/m^3$)		D.E. ($\mu g/m^3$)		Min ($\mu g/m^3$)		P25 ($\mu g/m^3$)		P50 ($\mu g/m^3$)		P75 ($\mu g/m^3$)		P90 ($\mu g/m^3$)		P95 ($\mu g/m^3$)		P99 ($\mu g/m^3$)		MAX ($\mu g/m^3$)	
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$
1	6.9	6.7	7.4	7.2	0.2	0.2	4	4	5.6	5.6	7.6	7	11	10	15	13	42	41	110	110
2	8.1	7.3	8.7	7.3	2	2	6	5	7	6	8	7	10	9	12	12	49	44	156	110
3	9.8	7.8	8.9	4.7	3.2	3	7	6	9	7	11	9	13	10	15	11	33	22	219	106
4	19	16	7.2	2.1	3.6	10	16	15	20	16	23	17	25	19	27	20	31	21	219	33
5	2	2.1	3	3	0.2	0.2	0.6	0.6	1	1	2	3.2	4.6	5	6.4	6.6	13	17	26	19
6	4.3	4	4	3	0.2	0.2	2	2	4	3.4	6	5.4	8	6.4	10	8	13	10	50	30
7	5	3.3	18	9	0.2	0.2	0.6	0.6	1	1.2	2.4	2	4.4	6	13	10	96	51	214	90
8	3.2	3	7.3	5	0.2	0.2	1	1	1.8	1.8	3	3	4.8	4.8	7.2	7	40	25	82	48
9	7	5	18	11	0.2	0.2	0.8	0.8	1.6	1.6	4.4	4.4	18	15	40	28	79	49	232	128
10	8	6.3	10	6.1	0.2	0.2	2.4	3	6	5.4	10	8	15	12	23	16	57	34	102	62
11	10	6.3	8	6.1	0.2	0.2	7	3	10	5.4	12	8	14	12	19	17	50	34	102	62

12	10	8	9	5	2	3	7	6	9	7	11	9	13	10	14	11	33	22	219	107
----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	---	----	----	----	----	----	----	-----	-----

Fuente. Elaboración propia

De acuerdo con la Tabla 1, se determinó que de los 12 domingos monitoreados, el domingo 7 registró concentraciones por segundo debajo de los 96 ug/m^3 para el PM_{10} y 51 ug/m^3 para el $\text{PM}_{2.5}$, los cuales se ubicaron en el percentil 99 (P99). En otras palabras, se presentan picos por segundo que representan un riesgo para la salud dado que se localizan en el valor máximo de la serie de segundos obtenidos. En el domingo 9, las concentraciones por segundos fueron inferiores a los 79 ug/m^3 para el PM_{10} y 49 ug/m^3 para el $\text{PM}_{2.5}$, nuevamente localizándose en el percentil 99%, mostrando que solo el 1 % de los valores por segundo exhiben concentraciones por segundo máximas de 232 ug/m^3 y 128 ug/m^3 respectivamente.

A partir de las concentraciones obtenidas de PM_{10} , es posible establecer que en los dos domingos mencionados, los usuarios que realizan actividad física en la ciclovía en un periodo de 2 horas se exponen entre el 7 % al 11 % del valor máximo permitido según la Resolución 2254 de 2017 (75 ug/m^3), o del 9 % al 16 % del valor guía diario de la OMS (45 ug/m^3). Respecto al $\text{PM}_{2.5}$ se evidenció que, en las 2 horas, un usuario se expuso entre el 9 % y el 22 % del valor diario dado por la Normatividad Nacional (37 ug/m^3), y del 14 % al 33 % del valor guía de la OMS (15 ug/m^3), lo cual se puede observar en la Tabla 2.

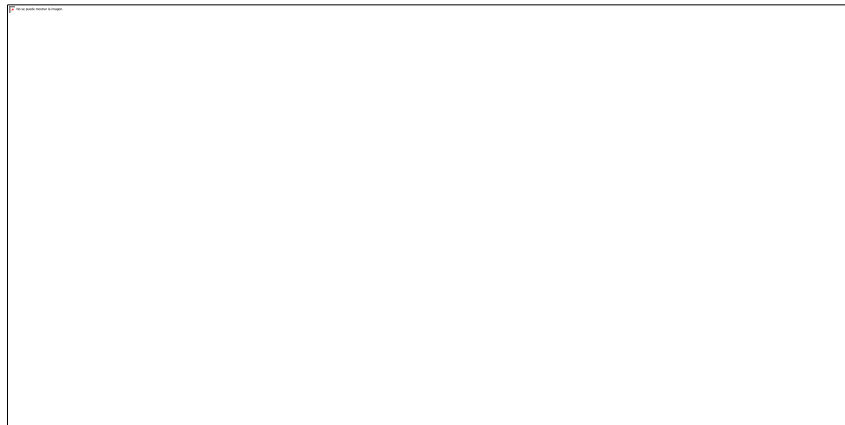
Tabla 2. Concentraciones promedio de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ durante 2 horas domingo 7 y 9. Comparados con valores máximos de la Resolución 2254 de 2017 y guía la OMS (Valores diarios).

Domingo	Normatividad	PM_{10} (ug/m^3)	Exposición con respecto al valor diario (%)	$\text{PM}_{2.5}$ (ug/m^3)	Exposición con respecto al valor diario (%)
7	Resolución 2254 de 2017	5	7	3,3	9
	OMS		11		22
9	Resolución 2254 de 2017	7	9	5	14
	OMS		16		33

Fuente. Elaboración propia

En la Gráfica 1 se observan las más altas concentraciones por segundo de PM_{10} tanto en el tramo de ida como de regreso del domingo 7, que corresponde al percentil 99 de la Tabla 1. Esto puede justificarse por la alta presencia de puestos de mazorca que se comportan como fuentes fijas dispersas, las cuales se ubican a lo largo de la acera del tramo de ruta de ciclovía. Durante el recorrido, el contaminante se mantuvo en una concentración de $214 \mu g/m^3$. El domingo 9 se observaron concentraciones elevadas por segundo ubicadas en el P99 y P95 máximo, tanto de ida como de regreso (ver Tabla 1) que están representadas por puestos de mazorca que se localizan en el recorrido.

Gráfica 1. Comportamiento por segundo de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el domingo 7 y 9 comparados con valores máximos de la Resolución 2254 de 2017 y guía de la OMS (Valores diarios).

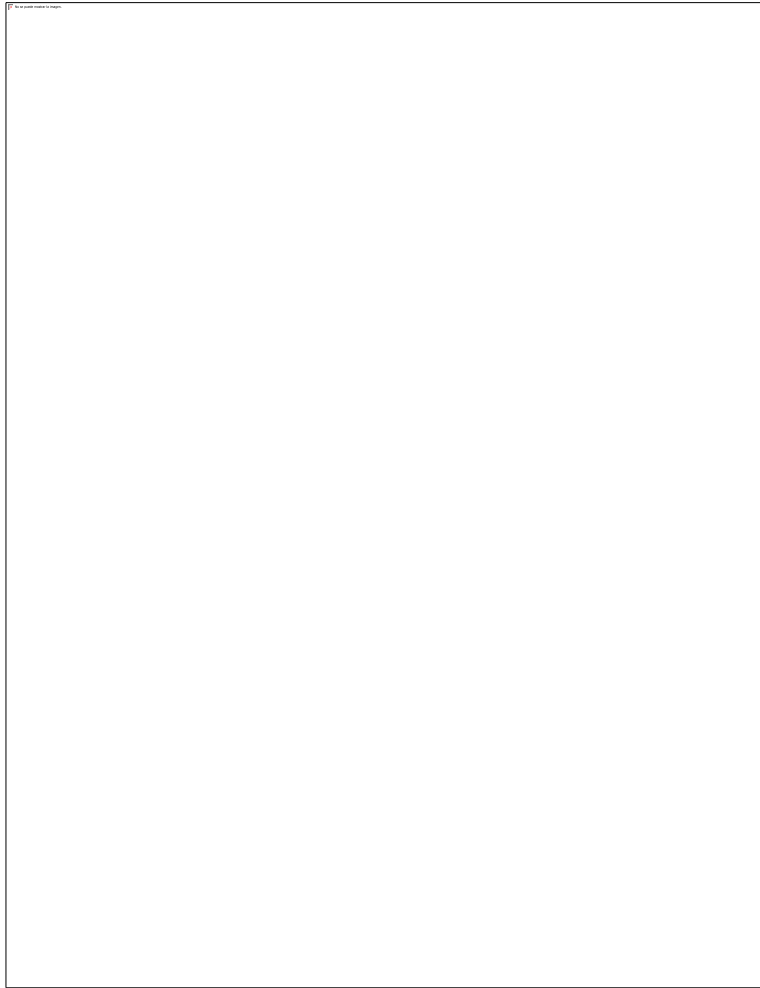


Fuente. Elaboración propia

Con el fin de identificar el comportamiento normal o anormal de los datos obtenidos en cada uno de los domingos, se empleó la prueba de Shapiro-Wilk, la cual identificó que las series de datos no se ajustaban a una distribución normal. Con el propósito de evaluar la existencia de una correlación de los dos contaminantes en los recorridos de ida y regreso de cada domingo, se aplicó la correlación de Spearman, encontrando una correlación inversa estadísticamente significativa ($p=0.0076$) del 4 % para PM_{10} ; mientras para el $PM_{2.5}$ la correlación fue inversa estadísticamente significativa ($p=0.000$) del 6 al 7 %. No obstante, en cuanto a la correlación entre el PM_{10} y $PM_{2.5}$ en todos los trayectos, esta fue del 99 %, siendo estadísticamente significativa ($p=0.00$).

Finalmente, en el Mapa 2, se observan las concentraciones por segundo registradas durante el domingo 7, que fue el domingo con mayores picos de concentración para PM_{10}

Mapa 2. Concentraciones de PM_{10} por segundo durante el domingo 7 .



Fuente. Elaboración propia

Los domingos 7 y 9, mostraron un comportamiento similar respecto a temperatura y humedad, obteniendo valores promedio de 2 horas de 23 °C para temperatura y 64 % a 67 % para humedad (ver Tabla 3). Se observó, además, que las concentraciones están directamente relacionadas con la temperatura, puesto que en el tramo de los domingos 7 y 9 se presentó el valor máximo de la temperatura, lo cual hace que existan picos por segundo de concentración de los dos contaminantes durante todo el recorrido (Torres, n.d.). Respecto a la humedad, se evidenció que la concentración está inversamente relacionada con la humedad, dado que, en el tramo de ida de los domingos 7 y 9, se presentaron altos valores de humedad, mientras que las concentraciones de estos dos contaminantes fueron bajas. Y en el tramo de regreso se obtuvo valores de alta humedad, pero las concentraciones de estos dos contaminantes solo registraron picos durante pocos segundos (Araújo, 2019).

Tabla 3. Parámetros de temperatura y humedad, medición domingo

Domingo/	Media	D.E.	Min	P50	Max
----------	-------	------	-----	-----	-----

Parámetro	T°C	H%	T°C	H%	T°C	H%	T°C	H%	T°C	H%
1	24	65	0,6	2,3	22	59	24	66	26	77
2	26	57	3	4	19	48	26	57	29	85
3	26	52	1	3,5	22	48	27	52	29	72
4	24	62	2	8,2	22	48	23	67	29	75
5	28	53	2,1	3,3	23	51	29	51	29	65
6	25	64	0,8	2,5	20	50	25	64	26	84
7	23	64	1,2	2,3	21	56	23	64	28	71
8	22	70	1,3	4	19	61	22	70	25	81
9	23	67	2,2	5	21	58	23	65	26	80
10	22	67	1,3	4,1	19	56	22	67	27	79
11	24	61	3	10	19	48	23	66	29	79
12	27	54	1,2	4	22	48	27	53	29	72

Fuente. Elaboración propia

Durante el resto de los domingos monitoreados, se registró un bajo comportamiento en las concentraciones por minuto de material particulado, obteniendo valores de 2 horas de PM_{10} en promedio entre 13 a 57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo los domingos 5 y 6 los que presentan las más bajas concentraciones de PM_{10} ; mientras, para $PM_{2.5}$, los valores estuvieron entre 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, tal como se puede observar en la Tabla 1.

De acuerdo con la Tabla 1, el 99 % de los segundos monitoreados en el resto de los domingos, registraron concentraciones por debajo de los 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y los 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $PM_{2.5}$, lo cual se corrobora en los valores del percentil 99 y 95, respectivamente. A partir de esto, y debido a que solo se presentaron algunos picos por segundo, es preciso afirmar que ello no representa un riesgo para la salud, dado que se localizaron en el valor máximo de la serie de segundos obtenidos.

A partir de las concentraciones obtenidas durante estos días, se estableció que los usuarios que realizan actividad física durante un periodo de 2 horas se exponen al 11 % del valor máximo diario permitido según la Resolución 2254 de 2017 (75 ug/m³), o al 18 % del valor guía de la OMS (45 ug/m³). Y respecto al PM_{2.5}, se constató que, en las dos horas, un usuario se expone al 17 % del valor diario dado por la normatividad nacional (37 ug/m³), y al 42 % del valor guía de la OMS (15 ug/m³) (ver Tabla 4).

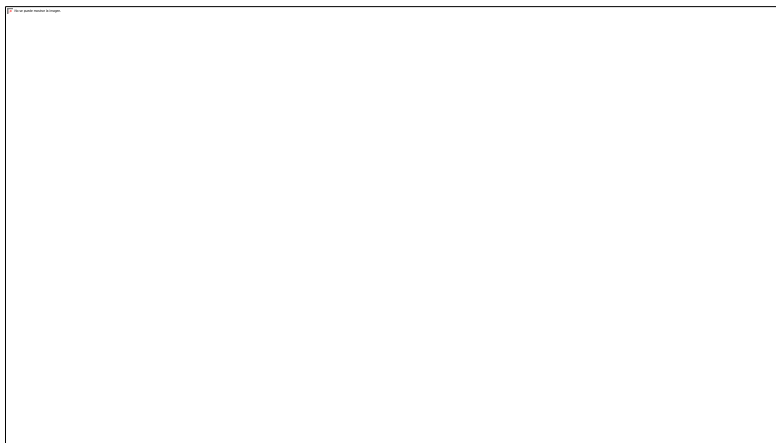
Tabla 4. Concentraciones de material particulado por un periodo de 2 horas en el resto de los domingos.

Trayecto	Normatividad	PM_{10} (ug/m ³)	Exposición con respecto al valor diario (%)	$PM_{2.5}$ (ug/ m ³)	Exposición con respecto al valor diario (%)
Resto de domingo	Resolución 2254 de 2017	8	11	6,3	17
	OMS		18		42

Fuente. Elaboración propia

En la Gráfica 2 se observa que, en el tramo de ida de los domingos restantes, se dieron las más altas concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5}, que corresponde al P99 de la Tabla 1. Esto puede justificarse por la presencia de puestos de mazorcas que se comportan como fuentes fijas dispersas, ubicadas en la calle 145 con carrera 9 (parque Cedritos). En el resto del recorrido, el contaminante se mantuvo en una concentración de 15 ug/m³ con algunos picos en el tramo de regreso que excedieron los 45 ug/m³. Las fuentes de emisión en el recorrido se identificaron como puntos de intersecciones de alta afluencia vehicular en las calles y nuevamente la presencia de puestos de mazorca.

Gráfica 2. Comportamiento por segundo de PM₁₀ y PM_{2.5} ug/m³ resto de domingos, comparados con valores máximos de la Resolución 2254 de 2017 y guía de la OMS (Valores diarios).



Fuente. Elaboración propia

Los datos de los domingos restantes no se ajustaron a una distribución normal, por lo que se aplicó la correlación de Spearman, encontrando una correlación inversa estadísticamente significativa ($p=0.035$) del 1 % para PM_{10} ; mientras que, para el $PM_{2.5}$, la correlación fue inversa estadísticamente significativa ($p=0.000$) del 7 al 8 %. En cuanto a la correlación entre el PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el resto de los domingos, esta fue del 84 % siendo estadísticamente significativa ($p= 0.00$).

Finalmente, en el Mapa 3, se observan las concentraciones de PM_{10} registradas por segundo durante los domingos restantes.

Mapa 3. Concentraciones de PM_{10} registradas por segundo durante los domingos restantes

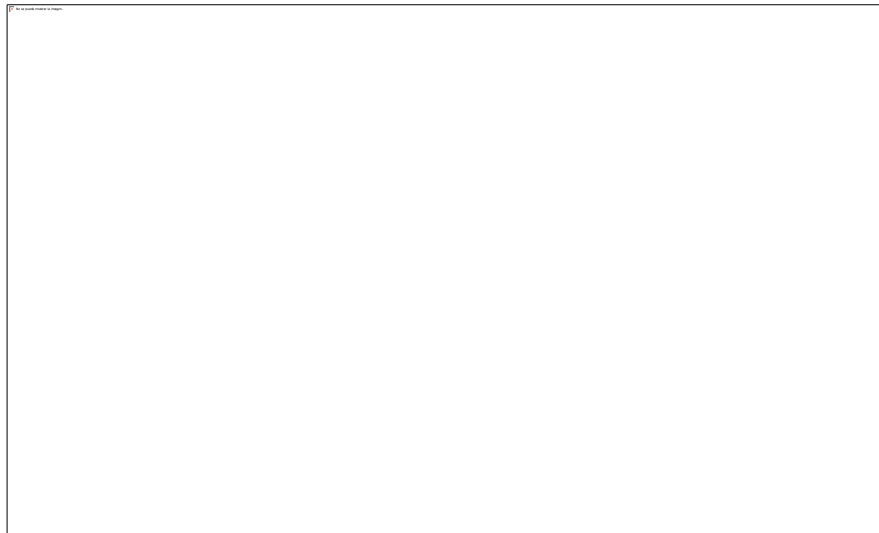


Fuente. Elaboración propia

En lo que concierne a temperatura y humedad, se obtuvo un valor promedio de 2 horas de 28 °C para temperatura y 70 % para humedad en los domingos restantes (ver Tabla 3). Teniendo en cuenta lo anterior, en la Gráfica 3 se evidencia que la concentración está directamente relacionada con la temperatura, puesto que en el tramo de ida y regreso, durante el resto de los domingos, se presentó un máximo valor de esta (Torres, n.d.). En cuanto a la humedad, la Gráfica 3 revela que la concentración está inversamente relacionada con la humedad, dado que durante el resto de los domingos, en el tramo de ida, se presentaron valores de humedad altos y las concentraciones de estos dos contaminantes fueron bajas; y en el tramo de regreso se registraron valores de humedad alta, pero las concentraciones de estos dos contaminantes solo presentaron picos durante algunos segundos (Araújo, 2019).

2. Concentraciones de PM_{10} obtenidas con la bomba personal GilAir 3

Gráfica 3. Comportamiento de la concentración de PM_{10} muestreado con la bomba personal GilAir 3.

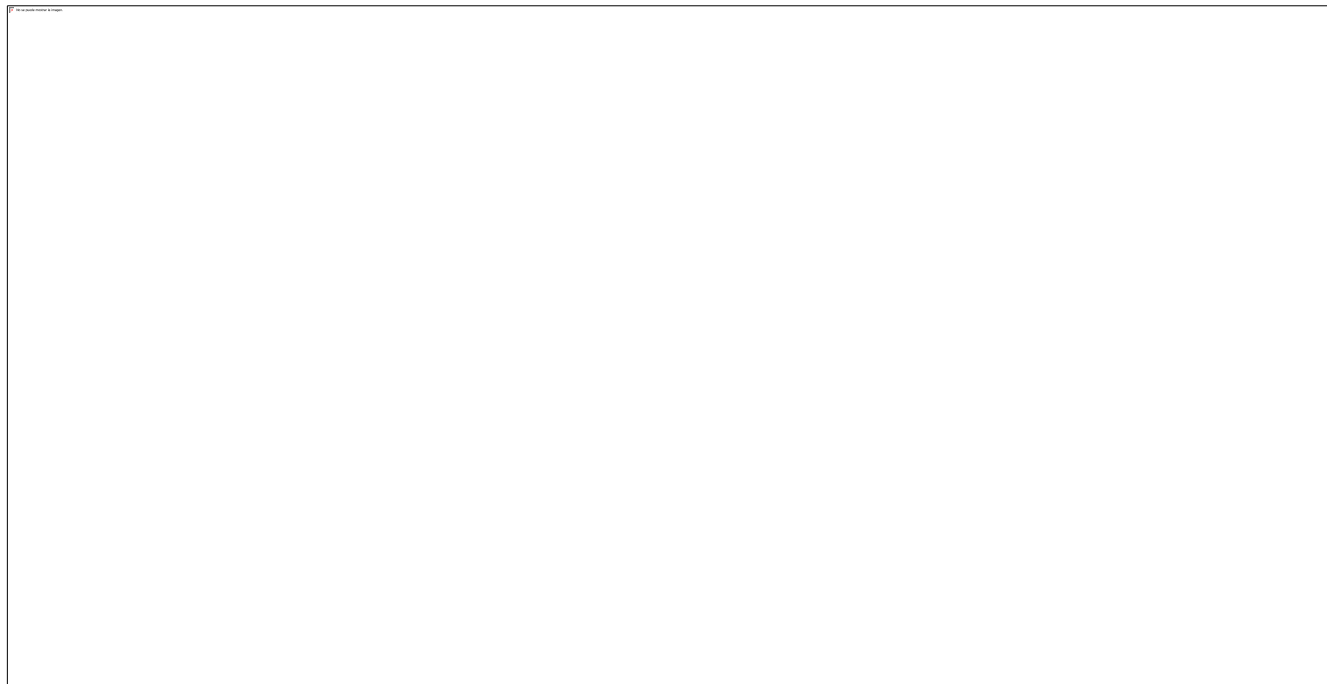


Fuente. Elaboración propia

Asimismo, en la Gráfica 3 se detalla el comportamiento de la concentración de PM_{10} muestreado por la bomba personal GilAir 3. La mayor concentración se observó en el domingo 4 ($321,29 \mu g/m^3$). Teniendo en cuenta las observaciones suministradas en campo durante el periodo de muestreo, se registraron puntos de intersecciones de alta afluencia vehicular en las calles y la presencia de puestos de mazorca, junto con material particulado resuspendido, donde las condiciones meteorológicas fueron de día seco. Por lo que se refiere a la menor concentración de PM_{10} , esta fue registrada el domingo 7 ($66 \mu g/m^3$), y está asociada a periodos de lluvia leves, atribuyendo que el arrastre de las partículas a causa de las gotas de lluvia genera la disminución de la concentración de material particulado.

En la Gráfica 4 se exponen las concentraciones de PM_{10} obtenidas para el periodo de monitoreo de 12 domingos. Teniendo en cuenta las concentraciones observadas, se logró identificar que todos los domingos sobrepasaron el valor máximo permisible según la OMS, siendo este valor de $45 \mu g/m^3$ con una exposición de 24 horas. Igualmente, hubo 10 domingos que sobrepasan el rango de $75 \mu g/m^3$ con una exposición de 24 horas, reglamentada por la Resolución 2254 de 2017.

Gráfica 4. Tendencia de las concentraciones de PM_{10} , comparados con valores máximos de la Resolución 2254 de 2017 y guía de la OMS (Valores diarios).



Fuente. Elaboración propia

3. Determinación de las concentraciones de níquel y cobalto

De acuerdo con los resultados obtenidos por el Laboratorio de la Universidad de la Salle sobre el estudio de los metales pesados: níquel y cobalto, no se encontraron metales pesados en todos los domingos. Las probables causas de la existencia o no de estos contaminantes en la zona, en el momento en el que se hizo el recorrido, se debe a la alta presencia de fuentes fijas dispersas (puesto de arepa y mazorca) que utilizan la quema de carbón, los cuales se ubican principalmente entre la calle 145 con 9 hasta la calle 116 con 15. En este caso, no hubo presencia de comercio e industria, lo cual corrobora la inexistencia de metales pesados a lo largo del recorrido. Cabe mencionar que esto se debe a que el caudal de monitoreo fue bajo, debido a que el equipo no contó con la suficiente capacidad de captar presencia de metales pesados. Además, el tiempo de monitoreo o exposición pudo haber sido bajo.

4. Dosis Inhalada Promedio de Material Particulado

Empleando el Manual de factores de exposición de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (1989) y el estudio realizado por Fajardo y Rojas (2012), a partir de las concentraciones de PM_{10} obtenidas de la bomba personal GilAir 3, se calculó la DI, utilizando el tiempo medio de exposición y el nivel de esfuerzo realizado por los usuarios de la ciclovía dominical durante el recorrido. Los datos empleados para la estimación y el valor de la DI se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Dosis inhalada de PM_{10} en el Tramo de la calle 170 con Carrera 9 hasta la calle 116 con Carrera 15

PM_{10}							
Mujeres			Hombres			Vanessa	Sebastián
C	203,4	ug/m^3	C	203,4	ug/m^3	203,4	203,4
IR	1,25	m^3/d	IR	1,5	m^3/d	1,25	1,5
ED	2		ED	2		2	2
BW	60	kg	BW	67	kg	57	64
DI	8,5	$\frac{ug}{kg * d}$	DI	9,11	$\frac{ug}{kg * d}$	9	9,53

Fuente. Elaboración propia

De acuerdo con la DI, la inhalación de PM_{10} en mujeres y hombres, no cambió significativamente en términos de ruta y tiempo. Por lo tanto, la exposición a altos niveles de material particulado no representa ningún riesgo (se debe considerar el corto tiempo de exposición).

Lo anterior permitió conocer la salud y el bienestar de los usuarios de la ciclovía dominical y consecuentemente, determinar los posibles efectos que tienen al exponerse durante un periodo de 2 horas. El hecho de que las partículas contienen una mayor concentración (PM_{10}), se convirtió en un tema importante y discutido para las estructuras responsables y otras investigaciones relacionadas.

Sin embargo, está claro que el $PM_{2.5}$ presenta un bajo riesgo para la salud de las personas que practican deporte en esta zona. No obstante, según otros estudios internacionales, los usuarios suelen estar expuestos a contaminantes atmosféricos (Hernández et al., 2021).

3. Discusión

Los usuarios de la ciclovía dominical, desde la calle 170 con 9 hasta la calle 116 con 15, estuvieron expuestos a niveles de concentración de material particulado que no incumplían con la norma de la OMS ni con los estándares nacionales, registrando un promedio de $7,73 \mu g/m^3$, comprendiendo un periodo de 2 horas, para un total de 12 días. Durante el recorrido, la concentración promedio fue relativamente baja, mientras que los resultados del estudio de exposición de ciclistas de Fajardo y Rojas (2012) mostraron un alto nivel de $78 - 108 \mu g/m^3$ en 8 horas. Los autores sugirieron que la exposición a contaminantes del aire en las ciclovías de Bogotá se debe abordar como un problema de salud pública, dado que es necesario contar con medidas para reducir la contaminación del aire (Fajardo y Rojas, 2012).

Por su parte, Samad y Vogt (2021) seleccionaron e instalaron bicicletas con dispositivos de medición para obtener mediciones móviles a lo largo de una ruta en Stuttgart, Alemania. En este estudio, se midieron partículas de material particulado, partículas ultrafinas (UFP), BC, óxidos de nitrógeno (NO_x) y ozono (O_3). Según los resultados de este estudio, la concentración de PM_{10} fue alta, esto es, de 30 a $75 \mu g/m^3$. Y en algunos puntos cercanos a fábricas, restaurantes e industrias y obras de construcción, se presentan concentraciones por encima de los $75 \mu g/m^3$ (Samad y Vogt, 2021). Lo anterior es consistente con este documento, puesto que se observó que, por lo general, los ciclistas pueden tener un mayor riesgo de exposición cerca de fuentes estacionarias difusas como las que pueden ocurrir durante el periodo de monitoreo de 12 domingos (Díaz-Fonseca et al., 2018).

Las concentraciones atmosféricas se compararon con las reportadas previamente por Hofman et al. (2018), quienes evaluaron la exposición personal de los ciclistas a UFP, BC y metales pesados mediante mediciones portátiles, determinando la dosis de contaminación en función de la frecuencia cardiaca en las horas pico (Hofman et al., 2018). Este estudio, realizado en la calle 170 con 9, midió dos metales pesados, dentro de los que no se registraron valores para níquel y cobalto, mientras que Hofman et al. (2018) estudiaron varios de ellos incluido el cromo, evidenciando valores más altos en comparación con los promedios de este trabajo, debido a que los autores ejecutaron en el tráfico durante las horas pico; es decir, generalmente con altas concentraciones atmosféricas.

Los usuarios de la ciclovía dominical, de la calle 170 con 9 hasta la calle 116 con 15, estuvieron expuestos a niveles bajos de PM_{10} y $PM_{2.5}$ con niveles de concentración promedio de $7,73 \mu g/m^3$ y $6,6 \mu g/m^3$ respectivamente, medidos en 2 horas. Esta concentración fue dada por el equipo Airbeam 2 durante un periodo total de 12 domingos. En términos generales, las exposiciones fueron bajas o comparables con las encontradas en otras investigaciones que midieron la exposición de ciclistas, como la realizada por Thai et al. (2008), quienes usaron dos instrumentos en una bicicleta para medir

las concentraciones de material particulado continuamente: en primer lugar, un GRIMM 1.108, el cual es un contador óptico de partículas basado en el principio de dispersión de luz; y, en segundo lugar, un contador de partículas P- TRASK. Dentro de los resultados, Thai et al. (2008) identificaron concentraciones medias de $PM_{2.5}$ y PM_{10} durante 14 días de monitoreo de 7 - 34 ug/m^3 .

De manera similar, Barraza y Sánchez (2019) evaluaron los niveles de PM_{10} mediante la implementación del método gravimétrico con un muestreador de bajo costo, Stacked Filter Unit (SFU), y el equipo partisol, validado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Los resultados de este estudio arrojaron una concentración promedio de PM_{10} de 46,40 ug/m^3 , respetando los estándares de calidad del aire para Colombia. Considerando este estudio, las concentraciones arrojadas por la bomba personal GilAir 3 fueron altas, dado que la media superó los estándares de calidad del aire para Colombia. Esto sugiere que los niveles de exposición a contaminantes del aire en el tramo norte de la ciclovía dominical de Bogotá deben abordarse como un problema de salud pública, y adoptar medidas más efectivas para reducir la contaminación del aire.

Los niveles de exposición expresados como la (DI) dependen, en gran medida, del tiempo de exposición y del nivel de esfuerzo de los ciclistas. En la presente investigación, se registró una DI de 8 - 9,53 $\frac{ug}{Kg*d}$ para los ciclistas que pedalean con un esfuerzo ligero durante un periodo de monitoreo breve, tanto para usuarios femeninos como masculinos. Aunque la representatividad de las medidas en este estudio es limitada, se logró demostrar que los niveles de contaminación a los que están expuestos los usuarios de la ciclovía sitúan su salud en un nivel adicional de riesgo nulo. Sin embargo, teniendo en cuenta los valores de concentración del material particulado PM_{10} , obtenidos a través de la bomba personal GilAir 3, la relación directa entre el esfuerzo físico y la cantidad media de PM_{10} inhalado, sugiere que el pedalear a un ritmo lento durante un corto tiempo y donde se requiera de una respiración oral-nasal seria, permitirá reducir de manera significativa la dosis de contaminantes inhalados (Guevara, n.d.). No obstante, a partir de estudios anteriores, los usuarios suelen dirigirse a sus lugares de trabajo y, en la mayoría de los casos, la presión de los trayectos que realizan les obliga a mantener un ritmo moderado o rápido en largas distancias, lo que genera que los valores de DI puedan elevarse.

La ciudad de Bogotá se mantiene como un modelo de América Latina, habiendo construido la infraestructura de ciclovías más extensa como una decisión innovadora para promover la bicicleta como medio de transporte (Alcaldía de Bogotá, 2015). Sin embargo, construirlo junto a carreteras principales de mucho tráfico pareciera no ser la mejor opción, sino que deberían construirse ya sea a lo largo de carreteras secundarias, donde el flujo de tráfico es bajo, o en una distancia que reduce la exposición y el posterior impacto de contaminantes del aire en la salud.

En conclusión, el potencial riesgo de adquirir cáncer por causa de exposición a metales presentes en el aire en espacios compartidos por automotores y ciclistas representa un desafío en cuanto al planteamiento de métodos efectivos que permitan la coexistencia entre la práctica deportiva y la circulación de automotores en el contexto urbano. Dicho lo anterior, es necesario construir un

acuerdo interdisciplinario de los actores responsables de las políticas orientadas al cuidado del medio ambiente y de quienes se encargan de planear la infraestructura urbana para que, con ello, sea posible construir propuestas enfocadas en salvaguardar la salud de los ciudadanos a corto y mediano plazo.

4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, el 80 % de la concentración de PM_{10} y $PM_{2.5}$ por segundo, hallada con el equipo Airbeam, no supera los $8 \mu g/m^3$. A su vez, el valor promedio del recorrido fue de $203,12 \mu g/m^3$, hallado con la bomba personal GilAir 3. Los picos presentados se limitaron al P99 o a los máximos de cada recorrido, alcanzando un valor de $37,75 \mu g/m^3$ por segundo. Por otro lado, no se encontraron concentraciones de metales pesados como el níquel y cobalto específicamente. Por medio de la metodología establecida para el material particulado y los dos metales pesados (níquel y cobalto), se determinó las causas de la no presencia de estos contaminantes a través de la identificación de la zona cuando se hacía el recorrido, como lo es el bajo flujo vehicular, la baja presencia de comercio e industria a lo largo de la calle 170 con 9 hasta la calle 116 con 15.

Considerando lo señalado por la OMS, y la norma colombiana, los resultados obtenidos para PM_{10} y $PM_{2.5}$ muestran que los tramos en los 12 domingos monitoreados, tanto de ida como regreso, se caracterizaron por presentar comportamientos similares, lo cual puede estar relacionado con las condiciones de bajo flujo vehicular y tráfico de la calle 170 con 9 hasta la calle 116 con 15. De acuerdo con lo anterior, para el PM_{10} y $PM_{2.5}$, en 2 horas, una persona que realiza actividad física durante todo el trayecto se expone a una concentración en promedio de $7,73 \mu g/m^3$ para el PM_{10} , teniendo en cuenta los 12 días; es decir, en 120 minutos recibe el 10 % de concentración diaria establecido en la norma colombiana y el 17 % del valor sugerido por la OMS.

En cuanto al $PM_{2.5}$, en el mismo lapso de tiempo, un individuo se ve expuesto a una concentración promedio de $6,3 \mu g/m^3$, valor que corresponde al 17 % del valor diario reglamentado en la legislación nacional y que obedece al 42 % de la concentración diaria sugerida por la OMS.

En ese orden de ideas, las fuentes principales que producen material particulado durante el trayecto de la calle 170 con 9 hasta la calle 116 con 15 son los puestos de comida (arepa y mazorca), en los cuales se utiliza carbón para la cocción de dichos alimentos.

Finalmente, las mediciones de concentración obtenidas por el Airbeam durante el trayecto fueron mínimas respecto al material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), puesto que, a lo largo del trayecto, se identificaron zonas verdes y vía amplía, las cuales ayudan a minimizar la contaminación a la que están expuestos los usuarios de la ciclovía.

Dado que el tráfico vehicular es el principal contaminador del medio ambiente, se recomienda realizar cierres viales principales para desarrollar ciclovías recreativas, especialmente desde la calle 170 con 9 hasta la calle 116 con 15, dado que ello garantiza a los usuarios seguir reduciendo el material particulado. Asimismo, se recomienda seguir investigando sobre el tema aquí propuesto, y que las

autoridades ambientales y los centros institucionales incluyan estrategias de monitoreo. También se sugiere a las autoridades colombianas implementar estrategias de control para el uso de combustibles menos contaminantes, con el propósito de reducir las emisiones de partículas de fuentes fijas difusas.

5. Bibliografía.

1. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA]. (2012). *Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medio ambiente*. EPA: <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
2. Alcaldía de Bogotá. (2015). *La Ciclovía de Bogotá, un modelo inspirador*. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/turismo/la-ciclovía-de-bogota-un-modelo-inspirador>
3. Alcaldía de Bogotá. (2019). *Trivia: ¿Qué tanto sabes de la historia de la ciclovía de Bogotá? ¡Pruébate!* <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/cultura-recreacion-y-deporte/historia-de-la-ciclovía-de-bogota-trivia>
4. Alcaldía de Bogotá. (2022). *Programa Ciclovía*. <https://bogota.gov.co/servicios/guia-de-tramites-y-servicios/https-www-idrd-gov-co-ciclovía-bogotanaprograma-ciclovía>
5. Araújo, D. J. (2019). *Evaluación de la concentración del material particulado con diámetros aerodinámicos menores a 10 ug (PM10) registrado en el primer año de operación del sistema de vigilancia de calidad del aire de la corporación autónoma regional del atlántico - C.R.A.* Obtenido de Universidad Pontificia Bolivariana: https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/6283/digital_38307.pdf?sequence=1
6. Barraza, C., & Sánchez, L. (2019). *Evaluación de la concentración de material particulado PM10 en la Región Norte – Centro Histórico de la ciudad de Barranquilla*. [Tesis de grado]. Barranquilla: Universidad de la Costa. <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/5548>
7. Carburos Metálicos. (2022). *Plasma acoplado inductivamente (ICP)*. <https://www.carburos.com/applications/inductively-coupled-plasma>
8. Ceupe. (s.f.). *La dispersión de los contaminantes*. Obtenido de Ceupe Magazine: <https://www.ceupe.com/blog/la-dispersion-de-los-contaminantes.html>
9. Chaeha, C. (2018). *AirBeam2 Technical Specifications, Operation & Performance*. Hábitat Map: <https://www.habitatmap.org/blog/airbeam2-technical-specifications-operation-performance>

10. Ciclovía Bogotá. (2023). *Mapas de Ciclovía*. https://ciclovía.idrd.gov.co/conoce_mas/mapa-ciclovía/
11. Companies. Lim, C. C. A. M. H. (2018, 23 marzo). *AirBeam2 Technical Specifications, Operation & Performance*. Habitat Map is an environmental tech org and maker of Airbeam. Recuperado 29 de septiembre de 2022, de <https://www.habitatmap.org/blog/airbeam2-technical-specifications-operation-performance>
12. Díaz-Fonseca, O. D., Rojas-Roa, N. Y., Rodríguez-Pulido, A. I., Díaz-Fonseca, O. D., Rojas-Roa, N. Y., & Rodríguez-Pulido, A. I. (2018). Evaluación de la exposición de ciclistas a la contaminación del aire: una revisión de la literatura. *Revista de Salud Pública*, 20(6), 764–770. <https://doi.org/10.15446/RSAP.V20N6.72744>
13. Environmental Health Centers [USC]. (s.f.). *Participatory Community Air Monitoring*. https://envhealthcenters.usc.edu/wp-content/uploads/2018/08/AirCasting_AirBeams_HowTo_USCEHC.pdf
14. Fajardo, O., & Rojas, N. (2012). Particulate matter exposure of bicycle path users in a high-altitude city. *Atmospheric Environment*, 42, 675-679. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.09.047>
15. Fischer, F. (2020). *Análisis espacial del material particulado en relación con la percepción de la calidad de vida en tres localidades de Bogotá - Colombia*. [Tesis de grado]. Bogotá, D. C.: Universidad El Bosque. https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/5540/Fischer_Garc%C3%ADa_Franz_Leonard_2020.pdf?sequence=2&isAllowed=y
16. Franco, J., Segura, J., & Mura, I. (2016). Air Pollution alongside Bike-Paths in Bogotá-Colombia. *Frontiers in Environmental Science*, 4, 77. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016>.
17. Guevara, J. (n.d.). *Cómo reducir la exposición de los ciclistas a la contaminación del aire*. Obtenido de Pedalia: <https://pedalia.cc/como-reducir-la-exposicion-de-los-ciclistas-a-la-contaminacion-del-aire/>
18. Hernández, M., Ramírez, O., Benavides, J., & Franco, J. (2021). Urban cycling and air quality: characterizing cyclist exposure to particulate-related pollution. *Urban Climate*, 36, 100767. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100767>
19. Hofman, J., Samson, R., Joosen, S., Blust, R., & Lenaerts, S. (2018). Cyclist exposure to black carbon, ultrafine particles and heavy metals: An experimental study along two commuting routes near Antwerp, Belgium. *Environmental Research*, 164, 530–538. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2018.03.004>
20. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo [INSST]. (s.f.). *Determinación de materia particulada (fracciones inhalable, torácica y respirable) en aire - método gravimétrico*.

https://www.insst.es/documents/94886/359043/MA_014_A11.pdf/687c3305-70c6-4f12-9115-4c317d7e819f

21. Klaassen, C., & Watking, J. (2005). *Fundamentos de toxicología de Casarett y Doull*. McGraw-Hill-Interamericana.
22. Londoño-Franco, L., Londoño-Muñoz, P., & Muñoz-García, F. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145-153. <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v14n2/v14n2a17.pdf>
23. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Resolución 2254 del 1 de noviembre de 2017. Diario Oficial No. 50.415 de 12 de noviembre de 2017. [Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones]. Bogotá, D. C., Colombia. https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minambienteds_2254_2017.htm
24. Office of Health and Environmental Assessment, U.S. Environmental Protection Agency. (1989). *Exposure Factors Handbook*. Office of Health and Environmental Assessment, U.S. Environmental Protection Agency.
25. Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2022). Contaminación del aire ambiente (exterior). OMS: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
26. Organización Panamericana de la Salud [OPS]. (s.f.). Calidad del aire, OPS: <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>
27. P&E Microcomputer Systems, Inc. (2019). *Cyclone LC Programmers User Manual*. <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/CYCLONE-User-Manual.pdf>
28. Plan Descontaminación Atmosférica para Osorno [PDAO]. (s.f.). *Efectos del material particulado en el sistema respiratorio*. PDAO: <https://pdao.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/11/Infografia-Efectos-del-material-particulado-en-sistema-respiratorio.pdf>
29. Ramírez, O., Sánchez de la Campa, A., Sánchez-Rodas, D., & de la Rosa, J. (2019). Hazardous trace elements in thoracic fraction of airborne particulate matter: assessment of temporal variations, sources, and health risks in a megacity. *The Science of the Total Environment*, 710, 136344. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136344>
30. Romero, A. (2009). *Material de laboratorio. Reconocimiento y manejo del mismo normas de seguridad algunas operaciones sencillas*. [Tesis de grado]. Catamarca: Universidad Nacional de Catamarca (UNCA). <https://www.yumpu.com/es/document/read/38826187/material-de-laboratorio-reconocimiento-y-manejo-del-mismo>
31. Samad, A., & Vogt, U. (2021). Mobile air quality measurements using bicycle to obtain spatial distribution and high temporal resolution in and around the city center of Stuttgart. *Atmospheric Environment*, 244, 117915. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117915>

32. Sanjuan, L. D. (2011). *La Observación*. Obtenido de Textos de apoyos didacticos: https://www.psicologia.unam.mx/documentos/pdf/publicaciones/La_observacion_Lidia_Diaz_Sanjuan_Texto_Apoyo_Didactico_Metodo_Clinico_3_Sem.pdf
33. Secretaría Distrital de Ambiente [SDA]. (2021). *Informe Anual de Calidad del Aire Año 2020*. Bogotá, D. C.: SDA. https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=18852#:~:text=Resumen%3A,diferentes%20lugares%20de%20la%20ciudad.
34. SISOMAC S. A. S. (2017). *Estudio de material particulado polvo total*. <http://sisomac.co/nuestros-servicios/higiene-industrial/estudio-material-particulado-polvo-total/>
35. Thai, A., McKendry, I., & Brauer, M. (2008). Particulate matter exposure along designated bicycle routes in Vancouver, British Columbia. *Science of The Total Environment*, 405(1–3), 26–35. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2008.06.035>
36. The Health Effects Institute. (1988). *Air Pollution, the Automobile, and Public Health*. National Academies Press.
37. Torres, D. R. (n.d.). Introducción a la meteorología. Obtenido de Tatto: <https://tattoo.ws/ec/p/introduccion-a-la-meteorologia-primera-parte/2487>
38. Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME]. (2009). *El níquel en Colombia*. Bogotá, D. C.: UPME. http://www.upme.gov.co/docs/niquel_colombia.pdf