

Identificación de la exposición personal de material particulado, plomo y cromo en los usuarios de la ciclovía dominical, desde la avenida Boyacá con 53, hasta la primera de mayo con Boyacá en Bogotá.

Castro Rueda María Paula, Soto Sastoque Stephanie Alexandra.

Álvarez Berrio Johan Alexander

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ingeniería Ambiental

2024.

Resumen.

Este estudio analizo las posibles exposiciones de la calidad del aire en el tramo desde la calle 53 con Boyacá, hasta la primera de mayo, ya que esta se caracteriza por tener un alto flujo vehicular en los días de la ciclovía dominical, para esto se realizaron mediciones de material particulado PM10, cromo y plomo en 11 días dominicales los cuales tuvieron una duración de 3 horas entre ida y vuelta, empleando equipos como el Airbeam y una Bomba GilAir-3. Por medio de un análisis exploratorio y estadístico se determinó mediante el Airbeam que solo un trayecto de los once estudiados tiene una concentración máxima de $51.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el mínimo fue de $17.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado PM10, de igual forma se realizó el cálculo de la concentración de inhalación de la misma y se pudo concluir que la exposición diaria fue de $2.20 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{día}$. Finalmente en cuanto al cromo y el plomo no se encontraron concentraciones en las muestras de PM10 en los filtros obtenidos del muestreo.

Palabras clave: Material particulado, ciclovía, plomo, cromo, exposición, actividad física.

Abstract

This study analyzed the possible exposures of air quality in the section from 53rd Street to Boyacá, until the first of May, since this is characterized by having a high vehicular flow on the days of the Sunday cycle path, for this purpose measurements of particulate matter PM10, chromium and lead on 11 Sunday days which lasted 3 hours round trip, using equipment such as the Airbeam and a GilAir-3 Pump. Through an exploratory and statistical analysis, it was

determined using the Airbeam that only one route of the eleven studied has a maximum concentration of $51.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and the minimum was $17.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ of PM10 particulate matter, in the same way the calculation of its inhalation concentration and it was concluded that the daily exposure was $2.20 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{day}$. Finally, regarding chromium and lead, no concentrations were found in the PM10 samples in the filters obtained from sampling.

Keywords: Particulate matter, bicycle path, lead, chromium, exposure, physical activity.

1.Introducción

En Bogotá uno de los corredores viales de transporte primario más significativo es la Avenida Boyacá. Tiene una longitud aproximada de 30 km, esta avenida atraviesa de Norte a Sur, abarcando localidades y sectores, que conectan, áreas residenciales, comerciales e industriales. (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2024) Además de ser una ruta esencial para el desplazamiento interno de los ciudadanos, esta Avenida es clave para el transporte de mercancías que ingresan a la ciudad (Troncoso Rivera , 2011).

Dada a su importancia en el sistema de transporte de Bogotá, la Avenida Boyacá experimenta habitualmente un elevado volumen de tráfico vehicular. Las estadísticas del año 2014; reflejan que la malla vial ha crecido en los últimos años en 0.4% promedio anual, mientras que el crecimiento del parque automotor ha sido en promedio un 11,43% (Cardenas Rico & Cespedes Segura, 2017).Este flujo incluye una amplia variedad de medios de transporte, como automóviles particulares, vehículos de transporte público, autobuses interurbanos, camiones de carga, entre otros (Velandia Medina , 2020) esta diversidad de vehículos contribuye a la generación de desafíos significativos que presenta la Ciudad diariamente, en términos de congestión vehicular y emisiones atmosféricas que pueden representar una alteración en la calidad del aire de Bogotá. En virtud de lo anterior la secretaria de Movilidad implementó el programa “Pico y Placa”, esta medida opera de lunes a viernes (Secretaria de Movilidad , 2024)

y pretende controlar la congestión vehicular y reducir las emisiones contaminantes, que pueden afectar directamente la calidad del aire y por ende en la salud de la población.

En este contexto, la Organización Panamericana de la Salud (OPS) caracteriza Bogotá por ser el tercer centro urbano con altos niveles de contaminación, que normalmente no cumple

con la norma establecida (Goncalves, y otros, 2005) , además se enfrenta a la degradación de la calidad del aire por la congestión vehicular e industrias (Ramírez et al., 2017) , las emisiones por las fuentes móviles indican que aproximadamente el 70% del Material Particulado proviene de los vehículos diésel a pesar de ser menos del 5% del parque automotor total (Observatorio Ambiental de Bogota , 2024).

En respuesta a esta problemática el Instituto Distrital de Recreación y Deporte (IDRD) y la Secretaría Distrital de Salud han implementado una de las iniciativas más reconocidas y exitosas en cuanto a movilidad sostenible en la ciudad con una de las infraestructuras para bicicletas más grandes de toda América latina, esta consta con más de 530 km en la ciudad. (Pardo & lleras , 2015) Esta iniciativa implica el cierre temporal de varias vías principales para vehículos motorizados los domingos y festivos, desde las 7 am hasta la 2 pm. Durante este período, aproximadamente 1.500.000 y 2.000.000 personas de todas las edades tienen la oportunidad de disfrutar de espacios exclusivos para actividades recreativas y de movilidad activa que van por toda la ciudad y son aproximadamente 127.69 km que se encuentran en corredores principales. (Alcaldia Mayor de Bogota D.C., 2024)

Aunque realizar actividad física conlleva beneficios para la salud, diversos estudios indican que realizar estas actividades al aire libre en Bogotá puede ser un riesgo para la salud respiratoria de las personas, (Hernández et al., 2021), se consideró fundamental analizar las condiciones en las que las personas realizan sus actividades deportivas por el grave riesgo que puede ocasionar el consumo de contaminantes debido al aumento de la tasa de ventilación (Zuurbier et al., 2010) y altos niveles de actividad física (Bigazzi & Figliozzi, 2014).

No obstante, los carriles exclusivos de la ciclovía se encuentran adyacentes al tráfico vehicular y las fábricas aledañas, es importante recalcar que se pueden estar generando emisiones de compuestos orgánicos volátiles, material particulado, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y monóxido de carbono (Ingle et al., 2005). Estas partículas presentes en el ambiente han demostrado influir en la función pulmonar, estableciendo una conexión entre la exposición de contaminantes ambientales y la posibilidad de desencadenar una enfermedad respiratoria (OMS, 2022)

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la exposición a los contaminantes presentes en el aire, son la causa de aproximadamente 4,2 millones de muertes prematuras en todo el mundo (OMS, 2022). Estar en una alta exposición a partículas en suspensión se puede asociar con problemas respiratorios, cardiovasculares (Song et al., 2014), también se pueden presentar problemas de morbilidad, accidentes cerebrovasculares (Krall et al., 2018), asma, resultados adversos al parto (Arroyo et al., 2016) efectos cognitivos y demencia (Chen et al., 2017)

En consecuencia, a lo anterior este estudio evaluaría el riesgo al que están expuestos los usuarios, se ha considerado la norma 2254 de 2017 y la Organización Mundial de la salud (OMS), teniendo en cuenta los límites permisibles. El objetivo es identificar la exposición personal de material particulado, plomo y cromo en los usuarios de la ciclovía dominical, desde la avenida Boyacá con 53, hasta la primera de mayo con Boyacá, además este análisis se realiza para verificar el cumplimiento de las normas, mediante monitoreos realizados durante 11 días dominicales del año 2023, es importante recalcar que los resultados obtenidos serán fundamentales para generar estrategias que contribuyan a mejorar la calidad del aire en esta área específica.

2. Metodología

La metodología que se optó para llevar a cabo el desarrollo de esta investigación fue un estudio de naturaleza exploratoria, siguiendo las pautas establecidas por la Resolución 2254 de 2017. (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible , 2017)

Inicialmente se realizó una etapa diagnóstica en la que se ejecutó un estudio primario, el cual permitiría identificar las características de la zona a muestrear, acorde a esto se seleccionó donde iniciaría el tramo, donde finalizaría y los horarios de medición ya que el recorrido se manejaría a pie; Seguido se solicitó a la Secretaría Distrital de Ambiente el inventario de fuentes fijas y móviles, que se encontraran catalogadas como focos de contaminación en la zona de influencia con el fin de poder establecer cuáles de estas fuentes emitían al aire compuestos químicos que contengan plomo, cromo y material particulado, luego se realizó el monitoreo y se analizaron los resultados obtenidos por los equipos, para determinar el

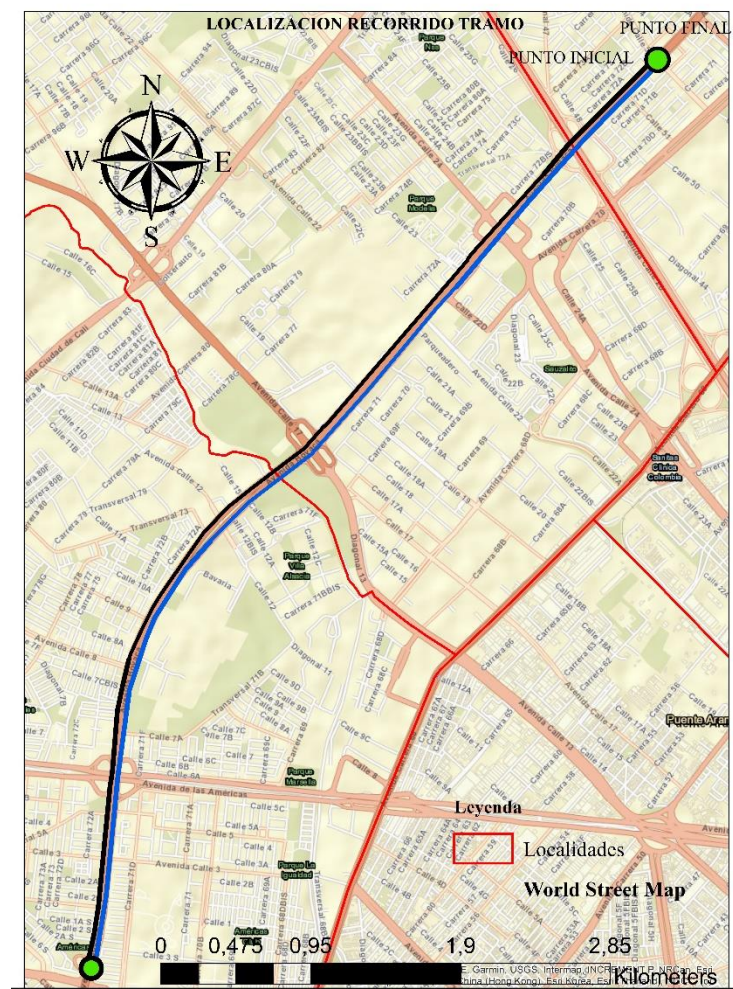
grado de concentración de los contaminantes en la ciclovía dominical del tramo seleccionado..

2.1 Descripción del tramo muestreado.

Para llevar a cabo el monitoreo correspondiente, se eligió el corredor vial más extenso de la Ciudad de Bogotá, siendo este la Avenida Boyacá. Esta elección se basa en su notable flujo vehicular, convirtiéndose en un enlace estratégico entre varios corredores logísticos, tales como la calle 26, la avenida Esperanza, la calle 13, Avenida Américas y la Primera de Mayo, donde culmina el recorrido. Asimismo, es relevante destacar que esta Avenida experimenta una alta demanda vehicular, también alberga numerosas industrias, restaurantes y comercios en sus cercanías.

Por ende, se selecciona el corredor C1: Centro 1 Boyacá sur, el cual corresponde a la ciclovía dominical, con un recorrido de 8,9 km, extendiéndose desde la calle 53, Av Boyacá # 72-49 hasta la Av Primera de Mayo con Boyacá (Alcaldía Mayor de Bogotá , 2023). Este recorrido se ha fragmentado en dos tramos, ida y vuelta con inicio a las 8:30 am y finalización a las 11:30 am, desarrollado a lo largo de 11 domingos, equivalentes a un periodo de tres meses calendario.

Imagen 1: Recorrido del tramo.



Fuente: Autores

2.2 Tipo de emisiones.

Para determinar las fuentes fijas y móviles que podrían llegar a tener influencia en el tramo seleccionado se considerarán los límites de las diferentes localidades y Unidades de Planeamiento Zonal (UPZ). En este trayecto específico se identificó que la ciclovía atraviesa por tres localidades: Engativá, Fontibón y Kennedy. En estas las UPZ que ejercen influencia son Santa Cecilia, Modelia, Castilla, Bavaria y Américas.

Por lo tanto, mediante la Secretaria Distrital de Ambiente y el sistema de correspondencia FOREST se obtuvo el inventario de fuentes fijas que se encuentran actualmente monitoreadas y vigiladas.

Tabla1: Fuentes fijas de emisión por UPZ

LOCALIDAD	UPZ	TOTAL
Engativá	31 Santa Cecilia	16
Kennedy	13 Bavaria	9
	44 Américas	24
	43 Castilla	34
Fontibón	110 ciudad Salitre	2
	112 Granjas de techo	30
	114 Modelia	3
TOTAL		118

Fuente: Secretaria Distrital de Ambiente- Base de datos de información SCAAV.

La información que se obtuvo por medio de esta entidad incluye información de fuentes fijas de emisiones a la atmosfera, combustión externa, proceso de producción y establecimientos comerciales, como lo son industrias, metalúrgicas, textiles, vidrierías, soldaduras y corte (Oxicorte), productos químicos, latonería y pintura, estas industrias son clasificadas por la actividad industrial que puede generar emisiones de material particulado, cromo y plomo. Por otro lado, en materia de fuentes móviles de emisión en el trayecto predominan zonas residenciales, comerciales e industriales, por ello los medios de transporte que transitan en esta area o en el territorio nacional deben seguir los parámetros básicos de la resolución 5443 de 2009. (Ministerio de transporte, 2009)

En referencia a lo anterior una de las principales tipologías vehiculares que se encuentran en la zona son vehículos que en su funcionamiento destinan los principales emisores de contaminantes como lo son combustibles fósiles (gasolina y diésel), Óxidos de nitrógeno (NOx), Material Particulado (MP), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), Monóxido de carbono (CO) y Dióxido de azufre (SO₂) (IDEAM, 2013) , siendo estos los posibles causantes de la contaminación en el tramo seleccionado.

2.3 Materiales y Métodos.

Para iniciar el proceso de monitoreo, se optó por seleccionar la ciclovía dominical, la cual se encuentra dividida en dos tramos; la ida, que comienza a las 8:30 am en el punto de la Boyacá y la vuelta que concluye a las 11:30 am en el punto de la primera de mayo. Es importante considerar que cada tramo debería tomar aproximadamente una hora y treinta minutos, dado que el recorrido se hizo a pie.

Posteriormente los filtros de membrana de teflón se pesaron en una balanza analítica donde se obtuvo su pesaje inicial, cada muestra con mayor número de incertidumbres de medición, exactamente de 3 mediciones realizadas para así hallar un promedio y obtener un peso más exacto, una vez obtenido este dato se dispuso cada filtro al desecador por 24 horas, consecutivamente estos se deshidrataron y se les retiró la humedad por medio de la densidad de las partículas, seguido a este paso se vuelve a realizar el pesaje con el fin de obtener el peso final de los filtros.

Para obtener las concentraciones de material particulado, plomo y cromo se empleó la bomba personal marca GilAir3, para esta medición en los primeros 6 filtros se usó un caudal de 2.5L/m y para los otros 5 filtros se usó de 4L/m, cabe resaltar que esta bomba va conectada a una manguera que lleva el aire hasta un ciclón, el cual recolecta las partículas menores a 10 micras en los filtros, que simultáneamente se desecaron y pesaron.

Consecuentemente al proceso se utilizó el Airbeam 2, el cual por el método físico clásico de análisis gravimétrico cuantificó las partículas (Rojas, 2004) que por medio de un sensor tomó mediciones en tiempo real por segundo.

Al haber obtenido la información de los 11 domingos monitoreados, se dispusieron los filtros nuevamente a un pesaje y una desecación, en el cual se estimó el pesaje final de los filtros.

3. Análisis estadístico Airbeam 2 y bomba personal GilAir3

3.1 Promedio y estadística del Airbeam2

Para llevar a cabo el análisis estadístico del Airbeam2, se extrajo la información recopilada durante los monitoreos dominicales. Estos datos fueron registrados a través de la aplicación Aircasting mediante la conexión bluetooth. La información se presenta en formato ZIP, por lo que es necesario descomprimir los archivos para organizarlos. Durante este proceso, se realizó la depuración y filtración, abordando cualquier casilla en blanco que pueda surgir. Cabe destacar que esta aplicación mide PM10, humedad relativa y temperatura en el tramo seleccionado para el monitoreo.

Por consiguiente, se recopilaron 11 grupos de datos, los cuales se integraron en una base de datos, las cuales tenían información de ida y regreso del tramo seleccionado. Una vez arreglada cada base, cada una con 3 categorías divididas entre hora del tramo, ida, regreso y total se procede a realizar el promedio por segundo de material particulado, temperatura y humedad relativa, por medio de la función de media geométrica y por último se realizan las gráficas correspondientes.

Sucesivo a esto, para cada una de estas bases se realizaron los siguientes pasos:

- 1) Con el comando “sum Pm10t” donde Pm10t es el material particulado total, el programa arroja una tabla que contiene los segundos, la media, la desviación estándar, el valor mínimo, valor máximo y los percentiles 25, 75, 90, 95 y 99 de cada uno de los parámetros (PM10, temperatura y humedad relativa).
- 2) Después de esto se dispuso a identificar si las series de datos de PM10 son pruebas paramétricas o NO paramétricas mediante el uso de la prueba “Shapiro-Wilk” con el comando swilk para PmI y PmR, donde si Z es menor a 0.05 NO es una prueba paramétrica por ende no tiene una distribución normal, pero si es mayor a dicho valor, es una prueba paramétrica y tiene una distribución normal.
- 3) Para los 11 días los resultados estadísticos arrojaron que las pruebas son No paramétricas, es por este motivo que se debe aplicar una prueba de “Sperman” con el fin de identificar si existe o NO una correlación entre los dos trayectos, su distribución establece que si la probabilidad de $|t| <$ es menor a 0.05, existe una correlación entre los dos trayectos, pero si es mayor a dicho valor no existe una correlación entre ellos.
- 4) Sin embargo, como la distribución de Spearman solamente permite establecer si las variables poseen o no una correlación entre los trayectos, Se debe complementar las

pruebas estadísticas para así darle mayor validez y entender los análisis de bitácora; para esto se empleó la prueba de Wilcoxon, la cual consta en evaluar la diferencia de medianas, por medio del parámetro $H_0: P_{mI} = P_{mR}$ si la probabilidad de $Z < 0$ es menor a 0.05 indica que los datos son diferentes.

- 5) Una vez las tablas realizadas, se dio lugar a identificar los días en que las mediciones rebasaban los valores máximos diarios permisibles establecidos por la OMS y la Res. 2254/17 para posteriormente darle relevancia al análisis de los días que sobrepasaron la normativa o presentaron picos muy altos.

3.2 Determinación de concentraciones con la bomba personal GilAir 3

En relación con el análisis estadístico para determinar la concentración de metales pesados (plomo y cromo) en los filtros, el primer paso consiste en pesar los filtros utilizando la balanza analítica con el fin de determinar el peso inicial. Al finalizar el monitoreo, se repite el pesaje para obtener el pesaje final, para comparar y analizar posibles diferencias de peso entre los 11 filtros (Alvarez Berrío, 2016).

$$CPST = \frac{10^6(W_f - W_i)}{V_{std}} \quad (1)$$

Donde:

CPST: Conteo por minuto de partículas.

W_f : Flujo de partículas que entran al dispositivo durante el periodo de medición

W_i : Flujo de partículas inicial

V_{std} : Volumen estándar

Es importante considerar varios aspectos para el análisis de los filtros. En primer lugar, se utilizó un caudal de 4 L/min en los primeros 6 monitoreos y de 2,5 L/min para los filtros

restantes. En segundo lugar, el tiempo empleado por recorrido fue de 180 minutos. Finalmente, se procedió a calcular el volumen en litros y posteriormente se convirtió en metros cúbicos (m³), al obtener estos datos se procede a reemplazar en la siguiente ecuación

$$V_{std} = Q_{std} * t \quad (2)$$

Donde:

VStd: Volumen estándar

Qstd: Caudal estándar

T: Tiempo.

Posteriormente se usa la siguiente fórmula para ajustar el caudal estándar a las condiciones reales de presión y temperatura

$$Q_{std} = \frac{Q_a}{\left(\frac{P_a}{P_{std}}\right)} (p_{std}) \frac{(T_{std})}{(T_a)} \quad (3)$$

Donde:

Qstd: Caudal estándar

Qa: Causal actual

$\frac{P_a}{P_{std}}$: Factor ajuste de presión

$\frac{T_{std}}{T_a}$: Factor de ajuste de temperatura.

Para hallar la concentración de plomo y cromo se tiene en cuenta la siguiente ecuación, la cual se define como el producto de la concentración de metales pesados (Alvarez Berrío , 2016) en la cual se tiene en cuenta el volumen estándar de la ecuación 2

$$\text{Concentración de metal: } \frac{\left(\left(\frac{\mu g \text{ metal}}{ML} \right) \cdot \text{Volumen digestion} \cdot 9 - Fm \right)}{V_{std}} \quad (4)$$

Donde:

$\frac{ug\ metal}{ML}$: Concentración

Volumen Digestión: Volumen usado en mililitros (ml).

Fm: Constante

Vstd: Volumen estándar

Posteriormente, los filtros fueron trasladados al laboratorio de alta complejidad Laboratorio instrumental de alta complejidad (LIAC) de la Universidad de la Salle, donde se llevó a cabo el análisis correspondiente de los metales pesados (plomo y cromo). Este análisis se realizó mediante la técnica de espectroscopía de plasma de acoplamiento inductivo (IPC), también conocida como ICP-OES (espectrometría de emisión óptica). La elección de este método se basa en su alta eficacia para analizar de manera concurrente múltiples elementos, incluso a niveles tan reducidos como 1-10 partes por billón (PPB) (Jimenez, Grijalva, & Ponce, 2020)

3.3 Dosis inhalada

La dosis inhalada promedio de material particulado, plomo y cromo, se refiere a la cantidad promedio de partículas sólidas que se encuentran en el aire y una persona puede inhalar durante un periodo específico. Estos son contaminantes comunes que se encuentran en el aire y pueden presentar riesgo en la salud (APCNEAN, 2007) por lo tanto, se usa la siguiente ecuación.

$$DI = \frac{C \cdot IR \cdot ED}{BW} \quad (5)$$

Donde:

C= Concentración de MP

IR= Tasa de incorporación (m3/d)

ED: Duración de la exposición

BW: Peso corporal (kg)

La tasa de incorporación (m3/d) se asocia con la velocidad de viaje promedio por monitoreo, teniendo en cuenta los Valores de la tasa de inhalación recomendados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICPR), Para un esfuerzo ligero el IR es:

IR Hombre: 1.5 m3/d

IR Mujeres: 1.25 m3/d

Y para los casos de esfuerzo moderado o fuerte es:

IR Hombre: 3 m3/d

IR Mujer: 2.7 m3/d (Fajardo & Rojas, 2012)

4.Resultados y análisis

4.1 Fuentes fijas

En base a los resultados finales obtenidos de la evaluación de industrias clasificadas como potenciales fuentes de emisión de metales pesados, como cromo y plomo, en las localidades de Engativá, Fontibón y Kennedy, se llevó a cabo una depuración de la lista. En este proceso, se excluyeron aquellas industrias que ya no están en funcionamiento o no presentan actividad actual. La depuración pretende actualizar la lista, concentrándose únicamente en las industrias operativas con impactos ambientales relevantes en cuanto a emisiones de metales pesados y material particulado.

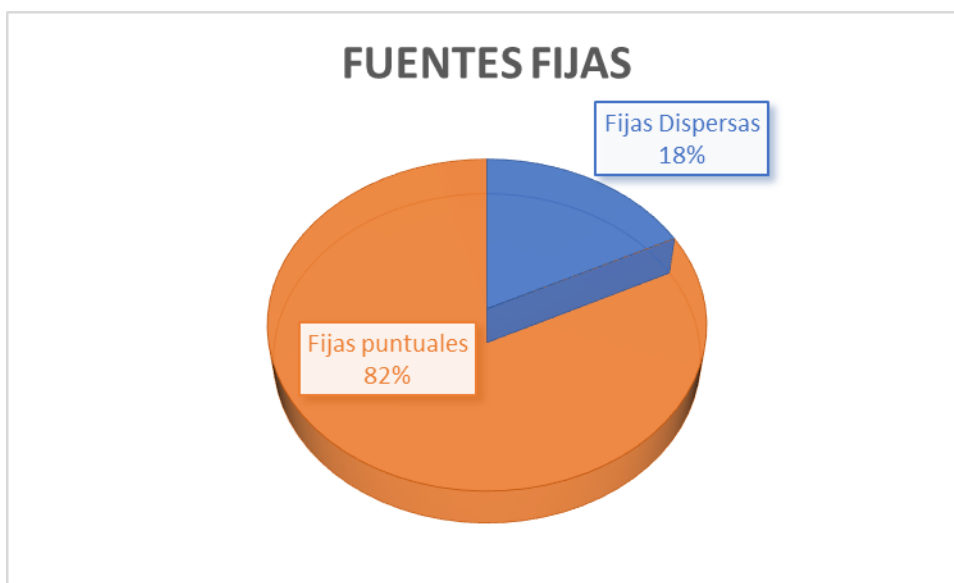
Tabla 2: Inventario de industrias que emiten, cromo, plomo y material particulado en las localidades.

Tipo de Fuentes	Tipo Actividad Industrial	Total, Industrias
Fijas dispersas	Taller de soldadura	1
	Cocina integral	1
	Compañía de Cargue y Descargue	1
	Constructora	2
	latonería y Pintura	1

Fijas puntuales	Instalación Gas Natural Vehicular	2
	Textilería	5
	Distribuidor y cambio de llantas Michelin	2
	fabricaciones duchas eléctricas	1
	fabricación de Medicamentos	3
	fabricación de artículos de madera	2
	fabricación de Cables	1
	fabricación de Jabones y detergentes	1
	Rectificadora de motores	1
	Venta y cambio de baterías Vehiculares	1
	fabricación de Caucho	1
	Maquinaria y equipo de transporte	1
	fabricación de Aceites de Corte, Solubles Hidráulicos, Engranajes, Grasas Industriales y Especiales	1
	fabricación de plástico	2
	vidriería	1
	Fabrica comida Congelada	1
	Metal químico	1
	Repuesto de automóviles	1
	Total, Fuentes	34

El resultado de la depuración muestra un total de 32 industrias que generan en su proceso productivo emisiones de los metales y material particulado, cabe resaltar que de las industrias en estudio el 18% corresponde a las fuentes dispersas y el 82 % a las fuentes puntuales, como podemos observar en el siguiente grafico:

Figura 1: Distribución de las fuentes de emisión clasificadas por su tipo.



4.2 Determinación de Plomo y Cromo

El tramo seleccionado se encuentra en las proximidades de grandes industrias, comercios y un parque automotriz, lo que lo convierte en una zona con una alta influencia de plomo y cromo, estos metales pueden afectar a la población que realiza actividades físicas.

Mediante los resultados proporcionados por la LIAC para el análisis de metales pesados, Se pudo evidenciar que no se encontraron trazas de estos metales en la zona estudiada. Las posibles razones por las cuales no se detectaron estos metales podrían ser que en el momento en el que se realizó el muestreo, las industrias no estaban operando a plena capacidad debido a que era un día dominical. Además, es posible que el tiempo de muestreo no haya sido suficiente para captar la presencia de estos metales pesados, ya que su dispersión en el aire puede ser variable y depende de otros factores.

4.3 Concentración de Material particulado (PM10)

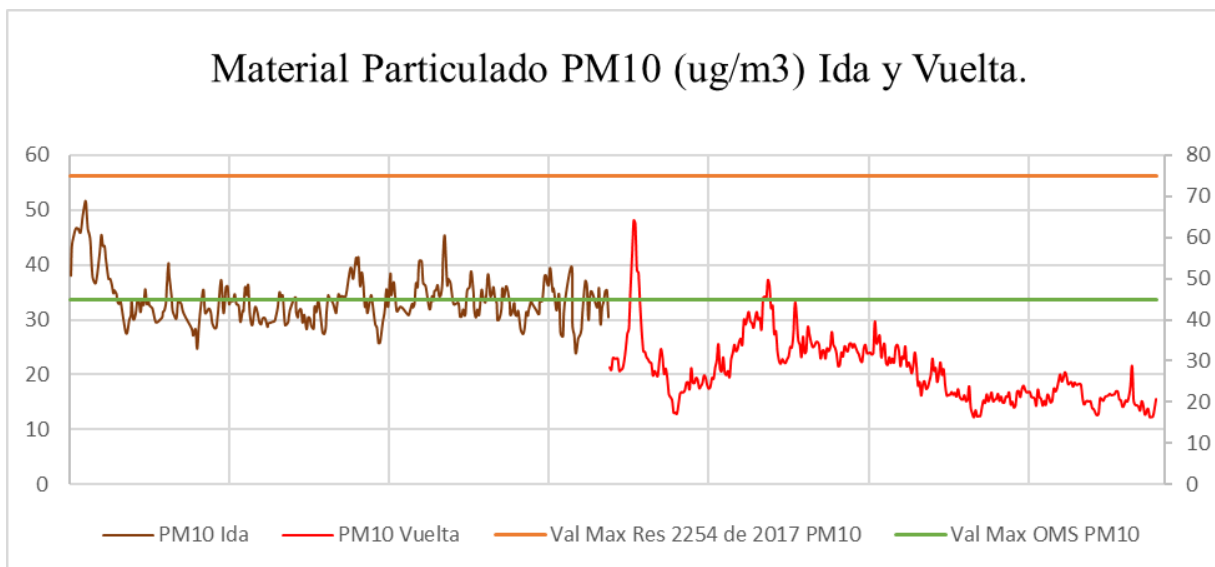
Durante los 11 domingos, se realizaron las respectivas mediciones para analizar el comportamiento del material particulado PM10 en la ciclovía. Estas mediciones se realizaron para verificar si la concentración de PM10 en el tramo seleccionado cumple con los

estándares establecidos. Según la Resolución 2254 de 2017, el límite permisible es de 75 ug/m³ (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible , 2017) mientras para la OMS el valor máximo permisible es de 45ug/m³ (OMS, 2022). Estos datos nos permitieron evaluar si el cumplimiento de las regulaciones ambientales y protegiendo la salud publica en la zona de la ciclovía, el trayecto que supero los limites permisibles establecidos por la OMS fue el dia 26 de marzo, no obstante, este no supera los límites permisibles de la resolución 2254 de 2017.

4.3.1Trayecto2

El trayecto 2 se realizó el 26 de marzo de 2023, se identificó que este fue el día en el cual se registró un pico de material particulado PM10 que supero los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). El valor máximo alcanzado fue de 51.2 y el mínimo fue de 17.4, esta variación se debe a que ese día puntualmente había un alto flujo vehicular por toda la avenida Boyacá, esta situación fue ocasionada por las nuevas obras que se están realizando, las cuales reducen los carriles donde se transportan los vehículos, además el cierre de unos de los carriles para la ciclovía provoco un estancamiento en toda la zona.

Figura 2: Comportamiento de concentraciones de Material Particulado PM10- 26 marzo



Fuente: Autores

Como se puede evidenciar en la tabla 3 para el trayecto 2 el 50% de los datos dan por encima de $30.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$; interpretando un aumento significativo en el regreso del tramo alcanzando los $63,37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como se puede apreciar en la figura 4 en consecuencia excedió el límite permisible establecido por la OMS a pesar de ello, la resolución colombiana no la sobrepasó; no representan ningún tipo de peligro aparente a la exposición por contaminante de material particulado PM10, como se mencionó anteriormente este pico se le atribuye a la gran cantidad de flujo vehicular que se encontraba inmóvil debido a las distintas obras que se realizaban este día al final del tramo en toda la primera de mayo con Boyacá, de igual modo el P99% evidencia que el noventa y nueve por ciento de los datos están por debajo de $51.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla 3: Parámetros de medición de PM 10

PARAMETROS DE MEDICION										
Domingo	Parámetro	Media	Min	P25%	P50%	P75%	P90%	P95%	P99%	Max
19 marzo	PM10 (ug/m3)	15.63	1	13.72	15.42	17.02	19.81	21.1	23.6	29.8
26 marzo	PM10 (ug/m3)	29.6	4	23.4	30.6	34	37.5	41.7	51.4	97
2 abril	PM10 (ug/m3)	28.4	17.5	26.27	28.4	30.2	32.31	34	35.4	39.5
9 abril	PM10 (ug/m3)	9.11	2.8	6.6	8.6	11	14	15.6	19	25.4
16 abril	PM10 (ug/m3)	2.92	1	2	2	3	5	6	15	29
23 abril	PM10 (ug/m3)	17.11	6	13	16	21	24	25	31	39
30 abril	PM10 (ug/m3)	9.4	1	4	8	14	17	20	29	43

Wilcoxon	No Cumple	Wilcoxon	Menor a -0.05, indica que las concentraciones son diferentes.
Shapiro	Cumple	Shapiro	Si la probabilidad de z es menor a 0.05 significa que la variable no tiene un comportamiento normal.

Fuente: Autores

4.4 Variables Climatológicas

4.4.1. Temperatura y humedad relativa

La temperatura promedio registrada durante los 11 domingos monitoreados fue de 24.2 °C, además para la humedad relativa la media fue de 40%, es posible que las concentraciones de material particulado puedan ser moderadas a altas por las condiciones climáticas que se presentaron a lo cual un aumento significativo de la temperatura y humedad relativa implicaría entrapamiento del material particulado por la presión atmosférica que inhibe el flujo de aire frío y aire caliente logrando retener las partículas en las zonas donde se encuentran menos zonas verdes y mayor retención del flujo vehicular como el pavimento en la avenidas.

4.5 Dosis inhalada promedio de Material Particulado PM10

Para calcular el promedio de la dosis inhalada, se utilizaron los valores de la tasa de incorporación, que representa la cantidad de contaminante inhalado por unidad de tiempo. Se estima que la tasa de incorporación es de 1,5 m³ /d para hombres y 1,25 m³ /d para mujeres, el tiempo de exposición de 3 horas, además se tiene en cuenta el peso corporal, en Colombia el promedio de las mujeres y hombres colombianos es de 61 kg y 67 Kg (Fajardo & Rojas, 2012) no obstante también se tuvo en cuenta el peso de las escritoras del documento, siendo para Stephanie de 68 y para María Paula de 52.

Tabla5: Calculo Dosis de Inhalación PM10

DOSIS DE INHALACION TOTAL PM10 (ug/m3)							
	Mujeres		Hombres		Stephanie		María Paula

C	30.56	µg/m3	30.56	µg/m3	30.56	µg/m3	30.56	µg/m3
IR	1.25	m3/d	1.5	m3/d	1.25	m3/d	1.25	m3/d
ED	3	H	3	H	3	H	3	H
BW	60	Kg	67	Kg	68	kg	52	kg
DI	1.91	µg/kg*d	2.29	µg/kg*d	1.68	µg/kg*d	2.20	µg/kg*d

Fuente: Autores

De acuerdo con la dosis de inhalación de material particulado PM10, se puede identificar que varía significativamente la concentración en hombre y mujeres, los hombres tienden a estar más expuestos por dos factores, uno es el índice de masa corporal y el otro es el tiempo de recorrido que se empleó para hacer actividad física que en este caso fue de 3 horas.; sin embargo, para una de las autoras en este caso María Paula con un peso de 52 kg, tuvo una dosis de inhalación mayor, con respecto a la dosis de Stephanie. Cabe recalcar que la exposición a estos de niveles de concentraciones de material particulado, no representan un riesgo para la población.

5. Discusión

En esta investigación se recopiló material particulado PM10, utilizando el dispositivo Airbeam. con el objetivo de analizar la exposición de los usuarios de la ciclovía dominical que abarca desde la avenida Boyacá con 53 hasta la primera de mayo con Boyacá en Bogotá. Estos usuarios estuvieron expuestos a niveles de concentración de material particulado que no incumplían con la norma nacional o los límites permisibles de la OMS, la concentración promedio de los domingos fue de 29.6 con valor mínimo 17.24 y valor máximo 51.2 comprendido en un horario de 3 horas por un total de 11 domingos, sin embargo, uno de los domingos (26 de marzo) alcanzo un resultado atípico sobrepasando los límites permisibles de la OMS, este resultado se fue causado por una alta congestión vehicular sobre la avenida Boyacá. No obstante, durante el recorrido se pudo observar que la concentración promedio fue 29.6 mientras que los resultados del estudio de (Lucila & Velosa, n.d.), un 75% de las concentraciones superan los 7 µg/m3 teniendo un valor máximo de 30.145 µg/m3, considerado como límite de exposición correspondiente a 5 µg/m3 de partículas para exposiciones máximas de 8 horas (Lucila & Velosa, n.d.)

Por otro lado, para el año 2019 se realizó la evaluación de concentración de PM10 en dos puntos de alta circulación, como lo son la zona centro y la zona occidental (jardín botánico), este muestreo es de tipo gravimétrico el cual registra valores promedio de PM10 21,43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 33,58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que infiere a que en el muestreo no se encuentran valores que superen los límites permisibles de resolución 2254 de 2017 o los valores impuestos por la OMS, por ende las concentraciones obtenidas en el muestreo de la zona centro fueron menores y siguieron la tendencia que fue reportada por la estación de monitoreo de calidad del aire, Esto sugiere que las concentraciones del contaminante tienen influencia por fuentes móviles y no por fuentes fijas (Castro, y otros, 2020)

Según otros artículos, durante el año 2020, la ciudad de Bogotá no superó los límites permitidos para el material particulado PM10, establecidos por la resolución 2254 el cual el valor máximo permisible es 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para los promedios diarios de concentraciones en un periodo de 24 horas. Se observó que, en la materia de las estaciones de monitoreo de aire, predominaban las categorías “favorable” y “moderado”. Sin embargo, en la estación Carvajal- Sevillana se registró una condición “moderada” durante el 34% del mes, mientras que en las demás estaciones esta condición se presentó en un 5% del mes. (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2020)

En este escenario se puede asociar el comportamiento de la ciudad de Bogotá con episodios de altas concentraciones de PM10 según (Ramírez et al., 2017b) la tendencia de la exposición al material particulado se atribuye al tráfico vehicular y al polvo generado por las vías, resultado de las emisiones de vehículos particulares, camiones, autobuses y otros vehículos. Esta fuente representa aproximadamente el 50% de la exposición al material particulado, el cual se inhala instantáneamente durante la actividad física, como el recorrido en bicicleta por la ciclovía. En Bogotá, alrededor del 90% de las ciclorrutas están ubicadas de manera paralela al eje vial, lo que aumenta la exposición al material particulado generado por el tráfico vehicular (Martínez-Ángel, 2018). Por lo tanto, es crucial considerar en futuros proyectos de infraestructura la reubicación de las ciclorrutas para evitar que estén junto a los ejes viales principales de la ciudad. Esta medida contribuiría significativamente a mejorar la salud de la población al reducir la exposición.

6. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, la ciclovía desde el tramo de la avenida Boyacá con 53, hasta la primera de mayo con Boyacá, presenta una buena calidad del aire. Los datos recopilados a través de los monitoreos indican que los niveles de material particulado PM10 se encuentran dentro de los límites permitidos de la resolución 2254 de 2017. Sin embargo, algunos de los registros muestran que los picos de material particulado se acercan o intentan superar los límites establecidos por la Organización mundial de la salud (OMS), que son más estrictos para garantizar una óptima calidad del aire y proteger la salud de la población.

Además, se pudo observar que en algunas áreas específicas del tramo seleccionado se registraron niveles elevados de exposición, principalmente debido al tráfico vehicular. Este factor fue el más significativo en los monitoreos, ya que las concentraciones de vehículos que utilizan combustibles derivados del petróleo generan niveles elevados de emisiones. Este fenómeno fue especialmente notable en varios semáforos del área y en las paradas del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP), donde la frecuencia e intensidad de las emisiones son elevadas. Estos hallazgos resaltan la correlación entre la congestión vehicular y el aumento de la contaminación de material particulado PM10. Por lo tanto, es fundamental priorizar este tipo de zonas para mitigar los riesgos para la salud de los usuarios de la ciclovía dominical.

En última instancia se puede razonar que a partir de los datos obtenidos con la ayuda de la bitácora en campo y el software estadístico STATA; Esta última que le da un valor agregado a la fundamentación de cada fenómeno encontrado en la parte experimental (bitácora) por medio de las pruebas No paramétricas y sus correlaciones cada una con su respectiva estadística, se recomienda una serie de parámetros para la mejora de la calidad del aire en días dominicales y a su vez optimización del espacio seguro y recreo-deportivo para la ciclovía, tales como otorgar pico y placa para días dominicales y así disminuir en gran medida la acumulación de tráfico vehicular que traen como consecuencia grandes concentraciones de PM10. Por añadidura solicitar a la alcaldía reubicar o dejar distancias prudentes de puestos de comida o locales que generan quemas sin ningún tipo de ductos y son consideradas fuentes fijas fugitivas.

En concreto estas recomendaciones se pueden dar en función de lo concluido y analizado, de la investigación realizada todo con el fin de una mejora en la calidad del aire o un plan de manejo más estructurado a futuro.

7. Bibliografía

Alcaldía Mayor de Bogota. (01 de 01 de 2024). Ciclovía Bogotana . Obtenido de Ciclovía Bogotana 2: <https://www.idrd.gov.co/recreacion/ciclovía-bogotana>

Alcaldía Mayor de Bogota . (2020). Reporte Técnico de indicadores de espacio público . Bogota D.C.: Creative Commons.

Alcaldía Mayor de Bogota . (20 de 11 de 2023). Mapa de la ciclovía . Obtenido de IDRD: <https://www.idrd.gov.co/recreacion/ciclovía-bogotana/mapa-de-la-ciclovía>

Alcaldía Mayor de Bogota D.C. (05 de 02 de 2024). Ciclovía Bogotana. Obtenido de Ciclovía Bogotana: <https://www.idrd.gov.co/recreacion/ciclovía-bogotana/guardianes-de-la-ciclovía>

Alvarez Berrío , J. A. (2016). Modelo para la evaluación de la concentración de plomo, cadmio y cromo contenidos en material particulado respirable en la localidad los mártires, Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia.

APCNEAN. (2007). Las recomendaciones 2007 de la comisión internacional de protección radiológica. Madrid: Sociedad Española de protección radiológica.

Arroyo, V., Díaz, J., Carmona, R., Ortiz, C., & Linares, C. (2016). Impact of air pollution and temperature on adverse birth outcomes: Madrid, 2001e2009 *. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.069>

Bigazzi, A. Y., & Figliozzi, M. A. (2014). Review of Urban Bicyclists' Intake and Uptake of Traffic-Related Air Pollution. *Transport Reviews*, 34(2), 221–245. <https://doi.org/10.1080/01441647.2014.897772>

Cardenas Rico, A., & Cespedes Segura, A. (2017). Funcionamiento de las intersecciones Avenida Boyaca con americas y Avenida Boyaca con primera de mayo enfocado en la seguridad y congestión vial . Universidad Católica de Colombia , 16,18-149.

Castro, C., Cuitiva, A. I., Maecha, A., Garcia, J. D., Altamar, A., Fajardo, O., & Mejia, S. (2020). Evaluación de la concentración de PM10 y sus posibles implicaciones a nivel salud en dos puntos de Bogotá D.C. Assessment of PM10 Concentration and possible Health Implications at two Locations in Bogotá D.C. Ingenierías USB med.

Chen, H., Kwong, J. C., Copes, R., Hystad, P., Van Donkelaar, A., Tu, K., Brook, J. R., Goldberg, M. S., Martin, R. V., Murray, B. J., Wilton, A. S., Kopp, A., & Burnett, R. T. (2017). Exposure to ambient air pollution and the incidence of dementia: A population-based cohort study. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.08.020>

Fajardo, O. A., & Rojas, N. Y. (2012). Particulate matter exposure of bicycle path users in a high-altitude city. *Atmospheric Environment*, 46, 675–679. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.09.047>

Goncalves, Carvalho, Conde, La torre, Saldiva, & Vraga. (2005). The effects of air pollution and meteorological parameters on respiratory morbidity during the summer in São Paulo City. Science Direct.

Hernández, M. A., Ramírez, O., Benavides, J. A., & Franco, J. F. (2021). Urban cycling and air quality: Characterizing cyclist exposure to particulate-related pollution. *Urban Climate*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100767>

IDEAM. (01 de 01 de 2013). Emisiones por fuentes móviles . Obtenido de MADS: <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/emisiones-por-fuentes-moviles#:~:text=Las%20emisiones%20por%20fuentes%20m%C3%B3viles,de%20azufre%20>

Ingle, S. T., Pachpande, B. G., Wagh, N. D., Patel, V. S., & Attarde, S. B. (2005). Exposure to Vehicular Pollution and Respiratory Impairment of Traffic Policemen in Jalgaon City, India. *Industrial Health*, 43(4), 656–662. <https://doi.org/10.2486/INDHEALTH.43.656>

Jimenez, M. H., Grijalva, A. d., & Ponce, H. (2020). Plasma acoplado inductivamente en espectroscopia de emisión óptica. Mundo de la investigación y el conocimiento .

Krall, J. R., Chang, H. H., Waller, L. A., Mulholland, J. A., Winkquist, A., Talbott, E. O., Rager, J. R., Tolbert, P. E., & Sarnat, S. E. (2018). A multicity study of air pollution and

cardiorespiratory emergency department visits: Comparing approaches for combining estimates across cities. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.07.033>

Lucila, S., & Velosa, M. (n.d.). Determination of the level of risk of breathable particulate material in bike users: challenge of sustainable mobility by bicycle in Bogotá. Retrieved February 12, 2024, from <https://www.researchgate.net/publication/349961008>

Martínez-Ángel, J. D. (2018). Movilidad motorizada, impacto ambiental, alternativas y perspectivas futuras: consideraciones para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. *Revista de Salud Pública*, 20(1), 126–131. <https://doi.org/10.15446/RSAP.V20N1.57038>

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible . (11 de 01 de 2017). Resolucion 2254 . Obtenido de Resolucion 2254 : <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/2.+Resoluci%C3%B3n+2254+de+2017+-+Niveles+Calidad+del+Aire..pdf/c22a285e-058e-42b6-aa88-2745fafad39f>

Ministerio de transporte. (11 de 11 de 2009). Resolución 5443 de 2009. Obtenido de Resolución 5443 de 2009: https://rndc.mintransporte.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=nSq_Y8qQnaw%253d&tabid=204&language=es-MX

Observatorio Ambiental de Bogota . (18 de 02 de 2024). Concentracion de material particulado inferior a 10 micrometros (PM10) Promedio anual por estación- PM10 PAE. Obtenido de Concentracion de material particulado inferior a 10 micrometros (PM10) Promedio anual por estación- PM10 PAE: <https://oab.ambientebogota.gov.co/concentracion-de-material-particulado-inferior-a-10-micrometros-pm10-promedio-anual-por-estacion/>

OMS. (19 de 12 de 2022). Contaminacion del aire ambiente (Exterior). Obtenido de Contaminacion del aire ambiente (Exterior): [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)

Pardo, C. F., & lleras , N. (2015). Ciclo-Inclusión en America Latina y el Caribe. Banco interamericano de Desarrollo.

Secretaria de Movilidad . (22 de 02 de 2024). Pico y Placa. Obtenido de Pico y placa : https://www.movilidadbogota.gov.co/web/Pico_y_placa

Song, Q., Christiani, D. C., XiaorongWang, & Ren, J. (2014). The Global Contribution of Outdoor Air Pollution to the Incidence, Prevalence, Mortality and Hospital Admission for Chronic Obstructive Pulmonary Disease: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2014, Vol. 11, Pages 11822-11832, 11(11), 11822–11832. <https://doi.org/10.3390/IJERPH111111822>

Troncoso Rivera , J. R. (2011). Evaluacion del espectro de carga y coeficientes de daño en el corredor de la Avenida Boyaca,Bogota D.C. Universidad Nacional .

Velandia Medina , J. A. (2020). Modelación del comportamiento del trafico de transporte publico en la avenida Boyaca, Entre la Avenida Americas y la Calle 127 de la Ciudad de Bogota mediante dinamica de sistemas. Universidad Catolica de colombia.

World Health Organization (WHO). (2018). <https://www.who.int/>

Zuurbier, M., Hoek, G., Oldenwening, M., Lenters, V., Meliefste, K., van den Hazel, P., & Brunekreef, B. (2010). Commuters' exposure to particulate matter air pollution is affected by mode of transport, fuel type, and route. *Environmental Health Perspectives*, 118(6), 783–789. <https://doi.org/10.1289/EHP.0901622/ASSET/839C59A9-747A-4904-9419-6145823146D5/ASSETS/GRAPHIC/EHP-118-783F4.JPG>