



Monitoreo de material particulado fino y carbono negro, en microambientes de la ciudad andina de Manizales: estudio piloto

Angel David Gálvez Serna*
Carlos Mario González Duque**
Juan Felipe Franco Ramírez***
Ricardo Morales Betancourt****
Juan Manuel Rincón Riveros*****
Beatriz Helena Aristizábal Zuluaga*****

Recibido: 17/01/2020 • Aceptado: 22/10/2020

<https://doi.org/10.22395/rium.v20n39a8>

Resumen

Manizales cuenta actualmente con un sistema de vigilancia de calidad del aire que mide concentraciones en aire ambiente de material particulado (PM, por sus siglas en inglés). Sin embargo, este sistema no permite conocer concentraciones de exposición en inmediaciones de vías. El objetivo de este estudio fue realizar una primera aproximación a los niveles de exposición a material particulado fino (PM_{2.5}) y carbono negro (BC) en algunas vías de la ciudad de Manizales, evaluando microambientes relacionados con los peatones en vías y como pasajeros de buses del transporte público. Se midieron concentraciones de material particulado fino PM_{2.5} y BC durante dos semanas por periodos de cinco horas al día en horas de la mañana. Se usaron dos fotómetros DustTrack modelos 8533 y un Microaetalómetro modelo AE51. Los datos fueron evaluados en función de cada microambiente y tres zonas de estudio en la ciudad.

* Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, Grupo de investigación en ingeniería hidráulica y ambiental (GTAIHA). Manizales, Colombia. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6847-2635>

** Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Grupo de investigación en ingeniería hidráulica y ambiental (GTAIHA), Manizales, Colombia. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1641-2707>

*** Hill, Departamento del Gestión del Conocimiento, Bogotá, Colombia. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7260-8221>

**** Universidad de los Andes, Centro de investigación en ingeniería ambiental (CIHA), Bogotá, Colombia, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5475-8605>

***** Universidad de los Andes, Centro de investigación en ingeniería ambiental (CIHA), Bogotá, Colombia, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7637-383X>

***** Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Departamento de ingeniería química, Grupo de investigación en ingeniería hidráulica y ambiental (GTAIHA). Manizales, Colombia. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7945-7211>.

El valor obtenido de la mediana para las concentraciones de $PM_{2.5}$ y BC en las vías analizadas, fue 10 % y 30 % menor en la zona oriente respecto al sector centro, indicando la relevancia del tráfico vehicular como fuente de emisión en la ciudad. Para el caso de los pasajeros de transporte público, las concentraciones expresadas como la mediana de $PM_{2.5}$ y BC fueron 57 % y 54 % mayores comparadas con los peatones de las vías. Al interior del transporte público el porcentaje de aporte de BC fue aproximadamente del 41 % de la concentración total de PM registrado. Este es el primer estudio sobre exposición a estos contaminantes en Manizales; planteando la necesidad de seguir fortaleciendo análisis similares y usar los resultados como complemento para la gestión de calidad del aire en la ciudad.

Palabras clave: material particulado; carbono negro; exposición; peatones; transporte.

Monitoring of Fine Particulate Matter and Black Carbon, in Micro-Environments of Manizales Andean City: Pilot Study

Abstract

Manizales has an air quality network which measure particulate matter (PM) in ambient air concentrations. However, this monitoring system does not have information of pollutant concentrations in the vicinity of roads. The objective of this study was to determine the concentration of the fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and black carbon (BC) near main roads of Manizales. The evaluation considered micro-environments related with pedestrians of roads and passengers of public transport buses. $PM_{2.5}$ and BC concentrations were measured during two weeks for periods of five hours per day in the morning. The instruments used were two DustTrack photometers (model 8533) and a Microethalometer model AE51. The data were analyzed according to each micro-environment and three different zones of the city.

The median values of $PM_{2.5}$ and BC concentrations were 10 % and 30 % lower in the eastern zone than in the center zone, showing the impact of vehicular emissions in ambient air concentrations. In public transport buses, the median of $PM_{2.5}$ and BC concentrations were 57 % and 54 % higher than those obtained near roads. In terms of inside the public transport buses micro-environment, the contribution of BC was approximately 41 % of the total PM concentrations. This is the first study performed in Manizales in which concentrations of fine particles and BC near roads and public transport (pedestrians and passengers) were evaluated. These types of studies are important for adding new information for air quality management in the city and for complementing the official air quality monitoring.

Keywords: particulate matter; black carbon; exposure; pedestrians; transport.

INTRODUCCIÓN

Uno de los contaminantes del aire más críticos en zonas urbanas es el material particulado (PM) [1]. Una fracción de este material particulado incluye compuestos como el carbono negro (BC por sus siglas en inglés), contaminante considerado como trazador de emisiones provenientes de vehículos con motores diésel [2].

En Colombia, para el año 2015 los costos en la salud asociados a la mala calidad del aire urbano ascendieron a 15.4 billones de pesos (equivalentes al 1.93 % del PIB de 2015). Costos relacionados con cerca de 10527 muertes prematuras y por lo menos 67.8 millones de atenciones por síntomas y enfermedades respiratorias, cardiovasculares y algunos tipos de cáncer [3].

La ciudad de Manizales, Caldas-Colombia, es una ciudad de tamaño medio andina, situada en la cordillera central de los andes colombianos a 28 km del volcán nevado del Ruiz hacia el noroeste, con una altura promedio de 2150 m.s.n.m. El clima es tropical con alta humedad relativa (mayor al 70 %), con velocidades de viento menores a los 2 m/s, una temperatura promedio de 19 °C y promedio de lluvia de 2100 mm/año [4 - 5]. Para el 2018 su población aproximada fue de 400436 habitantes en 54 km² de área urbana, con una densidad poblacional de 7400 habitantes/km² [6].

Manizales actualmente cuenta con una red de calidad del aire que mide las concentraciones en aire ambiente de contaminantes criterio. La red cuenta con cinco estaciones fijas de material particulado de fracción gruesa (PM₁₀), dos estaciones de material particulado de fracción fina (PM_{2.5}) y una estación automática de gases para el monitoreo de monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂) y ozono troposférico (O₃). La información histórica de la red ha permitido identificar el material particulado como el contaminante de mayor relevancia en la ciudad. Para el año 2018, las concentraciones promedio registradas de PM₁₀ y PM_{2.5} fueron 32 µg/m³ y 14 µg/m³ respectivamente en dos de las estaciones representativas del centro urbano [7].

Así mismo, según los resultados obtenidos para el último inventario de emisiones (año base 2017), en Manizales el sector transporte emitió una cantidad equivalente a 631.6 ton/año de PM₁₀ y 573.5 ton/año de PM_{2.5}. Esto representó el 82 % y 93 % del total de emisiones de estos contaminantes en la ciudad respectivamente. De las fuentes móviles en ruta, se destaca el aporte al total de las emisiones de PM₁₀ y PM_{2.5} provenientes de las categorías vehiculares buses y vehículos pesados cuyos aportes fueron del 56 % y 24 % respectivamente. Estas categorías vehiculares corresponden al 3.7 % del parque automotor de la ciudad y usan diésel como combustible [8]. Resaltando además que no hay estudios asociados a medidas de concentraciones de carbono negro en la ciudad.

A pesar de contar con herramientas para la gestión de la calidad del aire, Manizales aún no tiene información que permita conocer los niveles de exposición de las personas en inmediaciones de vías de alto tráfico. Por esta razón se ha propuesto en este estudio piloto evaluar por primera vez en Manizales las concentraciones de $PM_{2.5}$ y BC a las que están expuestos peatones y pasajeros del transporte público y generar una primera línea base de niveles de exposición a estos contaminantes, dando un punto de partida para futuros estudios que permitan la comprensión de la dinámica de estos contaminantes en la ciudad y ayudar a tomar decisiones para una planificación urbana sostenible. Contando además con una primera aproximación sobre las concentraciones de carbono negro en la ciudad en estos ambientes estudiados.

1. METODOLOGÍA

La figura 1 muestra el esquema metodológico utilizado para la campaña de campo de medición de la concentración de $PM_{2.5}$ y BC en la ciudad de Manizales.

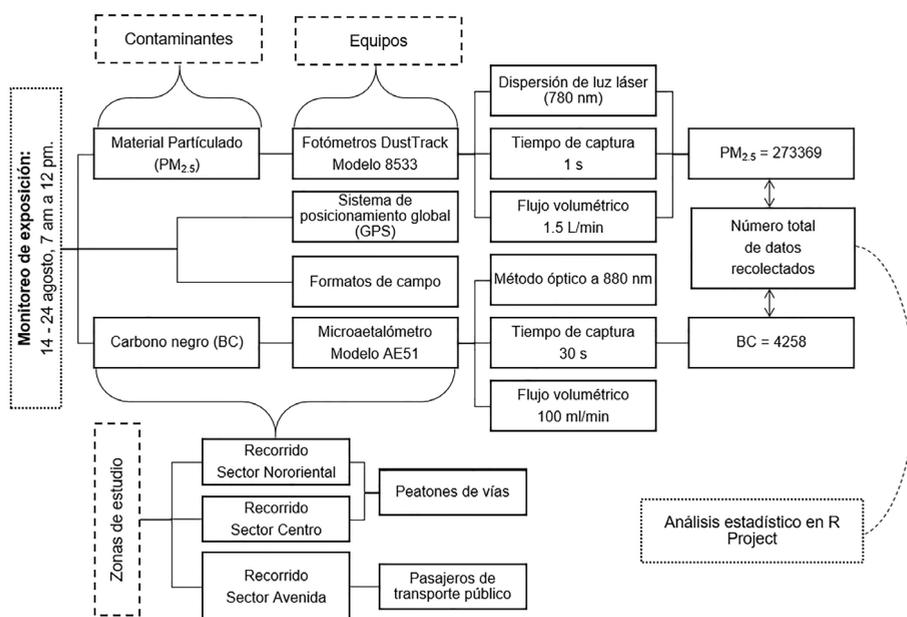


Figura 1. Esquema metodológico de la campaña de exposición a $PM_{2.5}$ y BC en microambientes de Manizales.

Fuente: Elaboración propia.

1.1 Sitios de estudio

Para su movilización, la ciudad de Manizales cuenta con tres importantes vías que comunican el oriente de la ciudad con la zona histórica (Centro): Avenida Santan-

der, Avenida Paralela, Avenida del Río. Estos corredores viales se caracterizan por contar con tráfico mixto. En 2017, el estudio de movilidad de la ciudad [9] identificó que más de la mitad de la población (69.7 %) se movilizó en medios de transporte motorizados, de los cuales el 28 % correspondió a transporte público (buses y busetas), seguido de los automóviles particulares con 20 % y motos con 12 %. Para el mismo año, los medios de transporte autónomos como peatón (a pie) y bicicleta representaron el 29 % y 1 % respectivamente. En la última década el número de automóviles particulares ha crecido en la ciudad en un 90 % y el de motos en más del 150 % [5], siendo Manizales la tercera ciudad del país con la mayor tasa de motorización con un total de 424.8 vehículos por cada 1000 habitantes para el 2018, solo superada por Medellín, Colombia con 433.7 y Bucaramanga, Colombia con 588.9 vehículos por cada 1.000 habitantes [10].

La figura 2 muestra el área estudio, donde se definieron tres zonas a evaluar y dos microambientes asociados. La primera zona corresponde al centro de la ciudad (centro histórico) que presenta alta afluencia peatonal-vehicular. Adicionalmente, la zona centro fue subdividida en dos vías principales para fines comparativos, una identificada por tener un mayor flujo vehicular (Carrera 20), mientras que la otra presenta un mayor flujo peatonal (Carrera 23). La zona centro es caracterizada por presentar calles angostas con edificios medianos y altos (de al menos 3 pisos de altura) en ambos costados de la vía. La segunda zona fue el sector nororiental conocido como Milán (Zona comercial - residencial), con afluencia vehicular más baja comparada con la zona centro y definida como punto de referencia de baja contaminación, caracterizada por espacios abiertos y edificios a un solo lado de la vía. Ambas zonas se conectan por una avenida principal (Avenida Santander) que fue definida como la tercera zona de análisis debido a que es la vía más concurrida por vehículos y peatones en la ciudad, esta es una vía de doble sentido y edificaciones variadas a lo largo del recorrido. Finalmente, los microambientes estudiados se relacionaron con peatones de vía de las zonas de estudio (recorridos por aceras en inmediaciones de las vías) y pasajeros de transporte público (al interior de los buses).

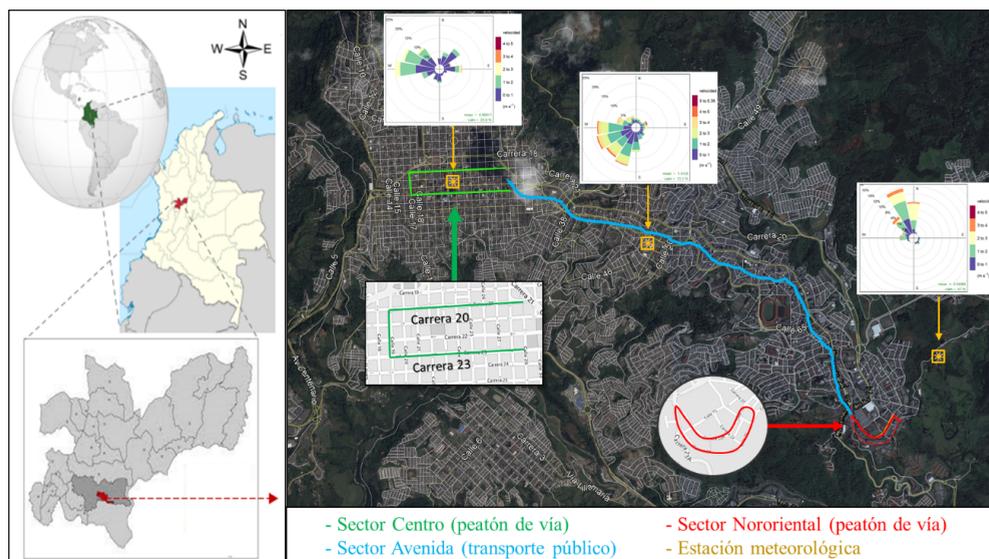


Figura 2. Sitios de estudio y microambientes relacionados.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 2 presenta además las rosas de vientos de tres estaciones meteorológicas representativa para las zonas de estudio durante el periodo de desarrollo de la campaña de recolección de datos (14 al 24 de agosto entre las 7 am y 1 pm) [5]. Para todos los casos se presentaron velocidades de viento menores a los 2 m/s. Se destaca, además, el registro en las estaciones de monitoreo de vientos tipo calma (velocidades menores a 0.2 m/s). En el sector centro al igual que en el sector avenida, los vientos predominantes provienen del occidente, registrándose un porcentaje de calma entre el 13 y 24 %. Para el sector nororiental los vientos predominantes provienen del noroccidente, registrándose un porcentaje de calma del 67 %. Se destaca que la variabilidad climática a lo largo de la ciudad se ve influenciada por las características del terreno y las edificaciones, siendo estos los factores determinantes en la dispersión de los contaminantes para cada zona. Se identificó además que la humedad relativa fue superior al 78 %, se registró una radiación solar promedio de 337 W/m^2 y no se presentaron condiciones de lluvia mientras se llevaron a cabo las jornadas de campo.

1.2 Medición de $\text{PM}_{2.5}$ y BC

Se llevó a cabo una campaña de medición de las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y BC durante 10 días por dos semanas, del 14 al 24 de agosto de 2018, incluyendo días laborales y fines de semana. Se monitorearon cinco horas diariamente (aproximadamente) entre las 7:00 am y las 12:00 del mediodía en los microambientes asociados a cada zona de estudio. Para el caso de los sectores centro y nororiente se evaluaron microambientes

asociados a recorridos tipo peatón en inmediaciones de las vías. Cada circuito (centro, 1.63 km y nororiental, 1.4 km) fue diseñado con el objetivo de identificar la posible exposición de un peatón a lo largo de cada zona y su relación espaciotemporal, mediante el diseño de un formato de campo para registrar los eventos ocurridos durante cada experimento; así como para la identificación de datos por fuera de las zonas de estudio deseadas. El tiempo promedio recorrido por un peatón en los sectores centro y nororiental se encontraron alrededor de los 60 minutos.

En el sector Avenida se evaluaron microambientes asociados con el interior de los vehículos de transporte público, es decir, la exposición de un pasajero que se encuentra en dicho vehículo. Para ello se utilizaron vehículos públicos de las empresas de transporte urbano de la ciudad de Manizales, los cuales operan con combustible diésel, poseen una edad promedio de 14 años y una capacidad entre 29 y 31 pasajeros sentados. El tiempo de recorrido medio para cada microambiente de este tipo se encontró alrededor de los 40 minutos, iniciando el recorrido desde el sector centro hasta el sector nororiental o viceversa, para una longitud total de recorrido alrededor de 4.73 km. Cada recorrido contó con su respectivo formato de campo.

La tabla 1 presenta el resumen de las características principales de las zonas de estudio, el número de mediciones realizadas y los flujos vehiculares que fueron medidos durante la campaña de campo. Para la estimación de los flujos vehiculares y peatonales se realizó un conteo manual durante las jornadas de campo, en puntos donde se identificó una actividad alta.

Tabla 1. Características principales de las zonas de estudio evaluadas

Zona de estudio	Vías		Flujo peatonal*		Flujo vehicular*					Número de experimentos			
	Longitud recorrida (Km)	Tiempo medio de recorrido (min)	Peatones	Bicicletas	A	M	TP	CC	Total	Semana		Fin de semana	
										PM _{2.5}	BC	PM _{2.5}	BC
Sector Centro (Cra 23)	0.83	30	1666	44	179	17	0	9	205	7	4	2	1
Sector Centro (Cra 20)	0.83	30	346	6	191	186	161	18	556	7	4	2	1
Sector Nororiental	1.4	60	108	18	64	34	15	0	113	8	4	2	1
Sector Avenida	4.73	40	1362	123	962	699	230	96	1987	8	4	2	1

*Todos los flujos presentados se encuentran expresados en número/hora (Incluye horas pico y valle de flujo).

**A: Automóviles particulares, M: Motocicletas, TP: Transporte público buses-busetas, CC: Camiones de carga

Fuente: Elaboración propia.

Para todas las mediciones, los datos fueron recolectados en la longitud total de cada recorrido con el uso de los dispositivos portátiles, evaluando microambientes

no homogéneos y cambiantes a lo largo del arco de las vías. Las concentraciones de $PM_{2.5}$ fueron medidas haciendo uso de dos fotómetros de dispersión de luz láser DustTrack modelo 8533, con una longitud de onda para el diodo de 780 nm, ajustado para tiempos de captación de 1 segundo y flujo volumétrico de 1.5 L/min. Para medir las concentraciones de BC se utilizó un microaetalómetro modelo AE51, con método óptico a una longitud de onda de 880 nm, una resolución temporal de 30 segundos y flujo de 100 ml/min. Durante cada jornada de medición se contó además con un sistema de posicionamiento global GPS marca Garmin eTrex con tiempo de captura cada segundo, que permitió asociar las concentraciones halladas con sus respectivas coordenadas geográficas.

Las horas seleccionadas para la campaña buscaban cubrir como mínimo una hora pico y una jornada valle de tráfico durante cada muestreo, de acuerdo con el plan de movilidad del año 2017 de Manizales [9], en la ciudad se presentan tres horas pico de flujo vehicular: la hora pico de inicio de la mañana (entre las 6:30 am y 7:30 am); la hora pico del medio día (11:45 am a 12:45 pm y 01:30 pm a 02:30 pm); y una hora pico al final de la tarde (05:30 pm a 06:30 pm).

1.3 Análisis de datos

Los datos se agruparon por sitio de estudio, tipo de microambiente y contaminante. Además, se asociaron algunos de los eventos particulares ocurridos durante las sesiones de medición con la ayuda de los formatos de campo. Se recolectaron un total de 273369 datos de $PM_{2.5}$ y 4258 de BC. El análisis de datos se llevó a cabo con el software estadístico R Project, permitiendo ajustar los datos de $PM_{2.5}$ y BC a una resolución temporal de 15 y 30 segundos respectivamente con el objetivo de obtener una mejor visualización de la información. Se realizó la estimación de los diferentes parámetros estadísticos descriptivos que permitieron determinar que los datos presentaron una distribución no normal con un sesgo hacia la izquierda, razón por la cual se estimaron y analizaron los diferentes percentiles de los datos, así mismo se optó por el uso de la mediana como parámetro comparativo. Finalmente, se combinaron los datos de concentración con la información GPS; para realizar la especialización de los datos se utilizó la herramienta “Powermaps” de Excel.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 Concentraciones observadas por tipo de microambiente

La tabla 2 presenta la estadística descriptiva para el total de mediciones realizadas y su correspondiente clasificación por tipo de microambiente asociado. Las mayores concentraciones de $PM_{2.5}$ y BC se registraron en el interior de los vehículos de

transporte público, con valores de la mediana de 40 y 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Estos niveles de exposición fueron 57 % y 54 % superiores a los registrados en las vías peatonales, cuyos valores de la mediana fueron de 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para BC. Al comparar estos resultados con los obtenidos en Bogotá [11] se identificó que las diferencias porcentuales entre los microambientes como pasajeros del transporte público y vías peatonales en la ciudad de Bogotá fueron del 68 % para $\text{PM}_{2.5}$ y 79 % para BC. Estos porcentajes entre microambientes son superiores comparados con la ciudad de Manizales debido posiblemente a la alta densidad vehicular de las vías de la ciudad de Bogotá [11].

Los microambientes para peatón de vías se caracterizaron por registrar picos de alta concentración y de corta duración. El valor máximo registrado para $\text{PM}_{2.5}$ fue 2216 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ asociado al arranque de vehículos después de un semáforo en rojo, sin embargo, el 95 % de los datos se encontró por debajo de los 66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para BC. La figura 3 muestra el comportamiento típico de las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ en inmediaciones de vías del sector nororiental de la ciudad (día entre semana), los eventos relacionados fueron documentados en la hoja de registro de campo correspondiente. Se identificó que la mediana de las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ se encuentra alrededor de 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con una desviación estándar de 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el 50 % de las concentraciones halladas entre 6.7 y 25.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Adicionalmente, los máximos de concentración durante el experimento fueron hallados entre las primeras horas del día, donde existe mayor flujo de vehículos en las vías (horas pico) con un 95 % de los datos por debajo de 67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Este comportamiento relacionado con zonas de mayor tráfico vehicular fue evidenciado también en la ciudad de Bogotá para el caso particular de BC, donde se observaron máximos de concentración asociados principalmente a semáforos en rojo e intersecciones de flujo [2].

Tabla 2. Estadística descriptiva para las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y BC en los microambientes estudiados (todas las mediciones)

Contaminante (Unidades)	Microambiente	Estadístico*							N
		χ	σ	P5	P25	P50	P75	P95	
$\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Peatón de vía	29.2	45.3	9.8	16	23	30	66	6875
	Pasajero de transporte público	54.5	49.8	16.1	26	40	64	148	6434
BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Peatón de vía	14.5	23.8	1.4	3	7	15	54	1578
	Pasajero de transporte público	20.4	23.1	1.7	6	13	26	66	1807

* χ = Promedio, σ = Desviación estándar, P5 = Percentil 5, P₂₅ = Percentil 25; P₅₀ = Mediana, P₇₅ = Percentil 75, N = Numero de observaciones

Fuente: Elaboración propia

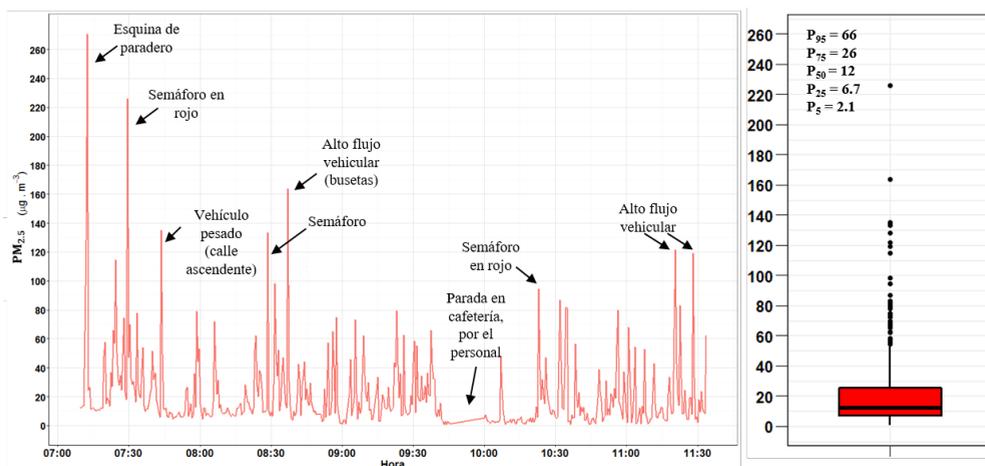


Figura 3. Serie de tiempo y diagrama de cajas para las concentraciones $PM_{2.5}$ en inmediaciones de vías del sector nororiental de la ciudad. Se relacionan con algunos eventos reportados en campo.

Fuente: Elaboración propia

La figura 4 presenta la relación de los promedios horarios de $PM_{2.5}$ para cada microambiente con el número total de vehículos promedio que se movilizan en la ciudad. Se observó una relación directa en la disminución de las concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas con la disminución en el número de vehículos entre las 9 y 10 am, concentraciones que posteriormente comienzan a aumentar debido al aumento del tráfico en la ciudad (hora pico). Se destaca el caso particular de $PM_{2.5}$ en el sector nororiental que aumentó hacia las 8 am, registros asociados posiblemente a la llegada de las rutas de transporte público que vienen desde el centro producto de la hora pico de la mañana, ya que por su parte en el centro y la avenida Santander existe mayor movimiento en el inicio de la jornada laboral (7 am) posiblemente asociado a la actividad económica de las zonas.

Como punto de comparación para este estudio piloto, se presentan en la tabla 3 algunos resultados obtenidos en otras ciudades de Colombia y el mundo. Se observa por ejemplo que la ciudad de Bogotá, Colombia, tiene concentraciones de $PM_{2.5}$ y BC promedio 4 veces mayores en exposición como pasajero de transporte público y 1.5 veces mayores en el caso peatonal comparado con la ciudad de Manizales. Por otro lado, si comparamos los resultados con ciudades como Delhi, India, para el caso de peatones de vía las concentraciones de Manizales se encuentran en un 83 % por debajo para el caso de $PM_{2.5}$ y un 60 % para pasajeros de transporte público. Finalmente, se hallaron concentraciones de $PM_{2.5}$ muy similares a las registradas en el parque municipal de Macau, China.

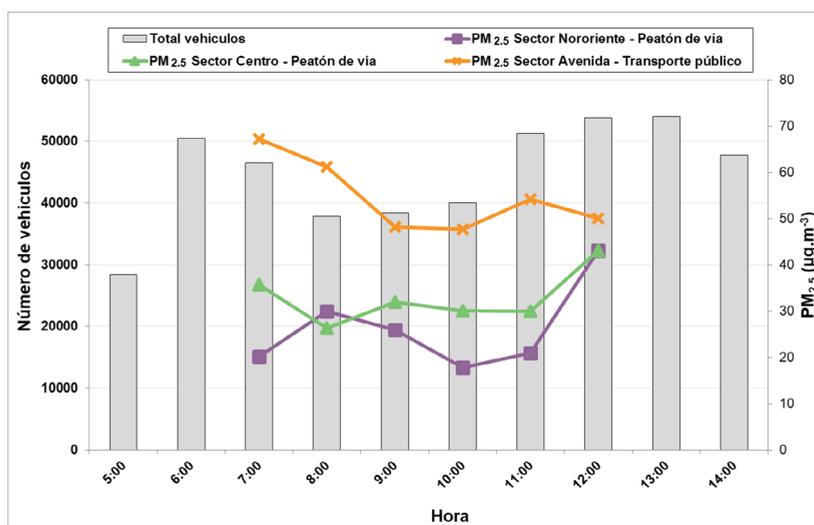


Figura 4. Relación entre las concentraciones promedio horarias halladas para PM_{2.5} y el comportamiento horario de tráfico vehicular en la ciudad de Manizales, los datos de distribución vehicular se tomaron del estudio de movilidad de la ciudad [9].

Tabla 3. Cuadro comparativo de estudios similares en Colombia y el mundo

Autores	Ubicación	Contaminante	Microambiente	Equipos*	Promedio (µg/m ³) ± Desviación estándar
[12]	Delhi, India	PM _{2.5}	Peatón de vía (verano)	DustTrack 8533	191.5
			Pasajero de transporte público (verano)		136
[13]	Bogotá, Colombia	PM _{2.5} BC	Bicicleta de Vía	DustTrack 8533	92.6
			Bicicleta de Vía	AE51	25.6
[14]	Guildford, Inglaterra	PM _{2.5}	Pasajero de transporte público (mañana) Peatón de vía (mañana)	Espectrómetro óptico de partículas (OPC)	29 ± 19 25 ± 22
[11]	Bogotá, Colombia	PM _{2.5} BC	Peatón de vía	DustTrack 8520	55.6 ± 38.1
			Pasajero de transporte público		176 ± 137.8
			Peatón de vía Pasajero de transporte público	AE51	18.9 ± 17.3 89.9 ± 85.8
[15]	Macau, China	PM _{2.5} BC	Peatón (Parque Municipal – mañana)	DustTrack 8530	3.5 ± 14
				AE51	26 ± 1.9
[16]	Estambul, Turquía	PM _{2.5} BC	Pasajero de transporte público	Personal DataRamTM 1200	43.4 ± 35
				AE51	11.1 ± 5.9
Este estudio	Manizales, Colombia	PM _{2.5}	Peatón de vía	DustTrack 8533	29 ± 45.3
			Pasajero de transporte público		55 ± 49.8
			Peatón de vía Pasajero de transporte público	AE51	14 ± 23.8 21 ± 23.2

*AE51: Microaetalmetro.

Fuente: Elaboración propia

2.3 Concentraciones observadas por sitio de estudio

La tabla 4 presenta la estadística descriptiva de las concentraciones registradas para cada contaminante y microambiente. Se identificó que la exposición con las menores concentraciones en vías tipo peatón fue el sector nororiental, con valores de la mediana de $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y $4.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para BC, valores 10 % y 31 % menores respecto a la exposición asociada al sector centro, cuyos valores de la mediana fueron de $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y $6.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para BC. Estos resultados se ven influenciados por el tipo de flujo vehicular de las zonas, siendo caracterizado el sector nororiental por tener un 80% menor de flujo total vehicular y 90 % menor de vehículos diésel comparado con el sector centro. Además, de las características físicas de las vías de cada zona, donde el sector nororiental cuenta con mayor espacio para la dispersión de los contaminantes con velocidades y direcciones de viento favorables, en sentido contrario a las edificaciones altas de la zona.

Los resultados obtenidos en el sector nororiental para $\text{PM}_{2.5}$ fueron similares a la concentración media reportada en Guildford, Inglaterra [15], indicando un posible comportamiento de tráfico similar en ambas ciudades para la jornada de movilidad de la mañana, aun cuando la longitud de recorrido en Guildford es superior en un 70 % (5.3 km) [14].

Para el caso del sector avenida, la exposición al interior de los buses es similar en ambos sentidos del recorrido y cada nivel de exposición está influenciado por el sistema de gases de escape, la ubicación del pasajero dentro del bus, las ventanas o puertas abiertas, entre otros factores que pudieron ser identificados con los formatos de campo.

Tabla 4. Estadística descriptiva para las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y BC en los microambientes estudiados por sitios de estudio

Contaminante (Unidades)	Microambiente	Sitio de estudio*	Estadístico**							
			χ	σ	P ₅	P ₂₅	P ₅₀	P ₇₅	P ₉₅	N
$\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Peatón de vía	Sector Nororiental	30.7	26.1	11	18	26	34	65	3229
		Sector Centro	36.8	35.5	14	23	29	41	75	3290
	Pasajero de transporte público	Sector Avenida (Nororiental -Centro)	42.8	35.5	16	23	33	52	86	2732
		Sector Avenida (Centro -Nororiental)	47.2	49.1	16	25	34	51	117	3412
BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Peatón de vía	Sector Nororiental	7.4	11.8	1.1	2.4	4.3	6.9	25	390
		Sector Centro	10.3	15.5	1.4	2.9	6.3	9.4	39	679
	Pasajero de transporte público	Sector Avenida (Nororiental -Centro)	23.8	27.4	2	6.8	15.7	29	80	773
		Sector Avenida (Centro -Nororiental)	18.5	19.3	1.7	5.9	12.7	25	51	948

* Para la clasificación de pasajero de transporte público se indica la orientación del recorrido del vehículo.

** χ = Promedio, σ = Desviación estándar, P₅ = Percentil 5, P₂₅ = Percentil 25; P₅₀ = Mediana, P₇₅ = Percentil 75, N = Numero de observaciones

Fuente: Elaboración propia

La figura 5 presenta la distribución gráfica de concentraciones observadas en escala logarítmica, representando los percentiles 25 y 75, la mediana de los datos y valores atípicos (puntos por fuera de la línea continua). Se registraron concentraciones atípicas con valores superiores a los 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ (figura 5a) y 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para BC (figura 5b), concentraciones posiblemente asociadas a condiciones instantáneas como por ejemplo emisiones por tubos de escape de un vehículo por arranque en la vía.

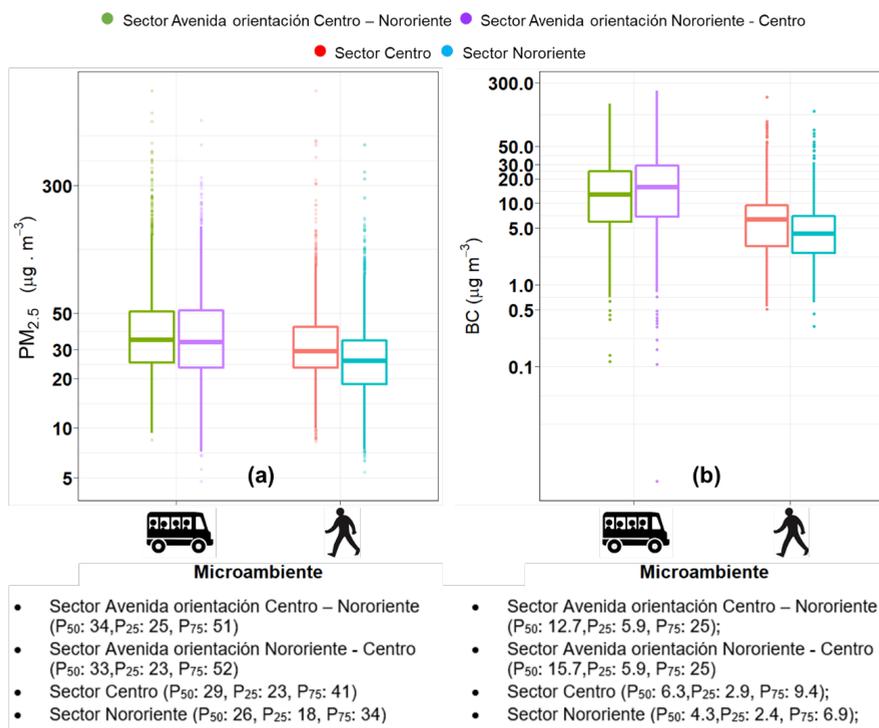


Figura 5. Diagrama de cajas en escala logarítmica de los contaminantes para cada microambiente y sitio de estudio (a) $\text{PM}_{2.5}$ y (b) BC. Se indica la mediana (P_{50}), percentil 25 (P_{25}) y percentil 75 (P_{75}).

Fuente: Elaboración propia

La figura 6 presenta espaciotemporalmente las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y BC observadas durante algunos de los recorridos en cada microambiente. Esta representación de los resultados sugiere que hay sectores que presentan mayores concentraciones de exposición a estos contaminantes. Se destacan los casos del centro e inmediaciones (sector avenida), donde se registraron concentraciones promedio superiores a los 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tanto para $\text{PM}_{2.5}$ como BC. Para el caso del sector nororiental, se observan mayores concentraciones hacia la zona occidental (entrada al sector), lugar donde se encuentra una rotonda en la cual confluyen todos los vehículos que ingresan y salen del sector, se observa además cómo esta influencia es mayor en horas pico de movilidad (mediodía).

Para el sector centro se observó que la carrera 20 presentó concentraciones de ambos contaminantes superiores a los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en varios puntos del recorrido, siendo estas observaciones 50 % superiores a los presentados en la carrera 23, cuyos promedios se encontraron alrededor de los $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este resultado se asocia principalmente a las características de la flota que transita por cada vía, teniendo la carrera 20 mayor flujo de camiones y buses respecto a la carrera 23, cuya vía es más peatonal y el flujo vehicular se caracteriza por categorías livianas como automóviles, motos, taxis y un flujo nulo de buses. Para la carrera 23 se observaron picos de concentración en intersecciones (sentido paralelo del recorrido) de calles que presentan pendientes pronunciadas ($>8^\circ$) que esfuerzan los motores de los vehículos.

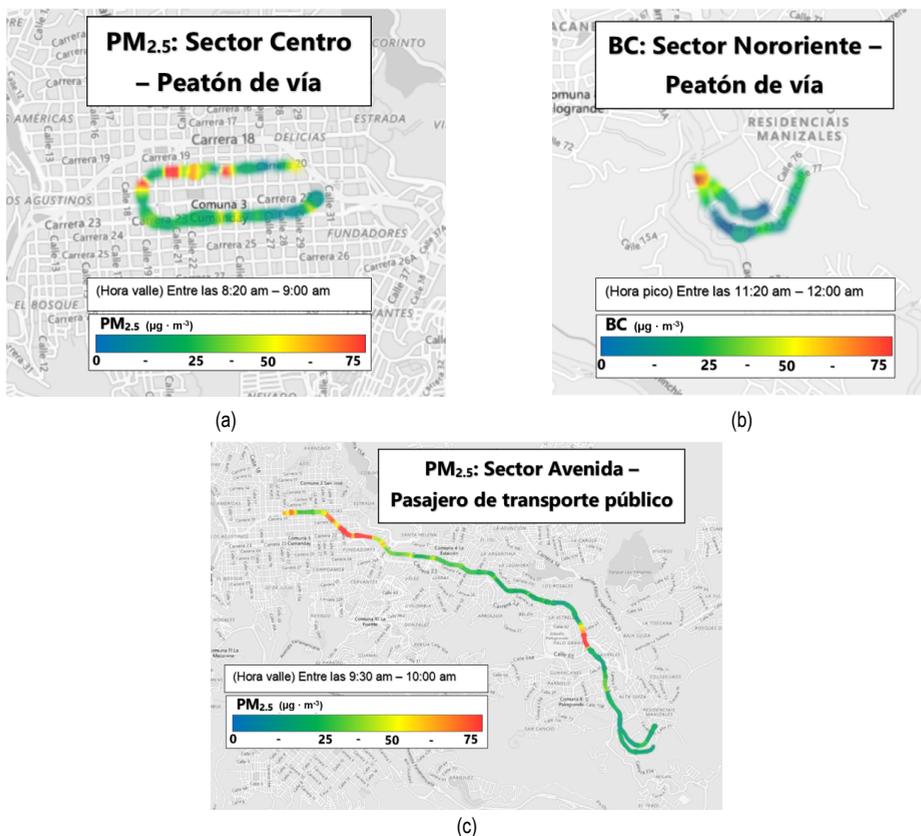


Figura 6. Distribución espaciotemporal de algunas de las concentraciones observadas durante los recorridos en los sitios de estudio **(a)** PM_{2.5}: Sector Centro, microambiente peatón de vía entre las 8:20 a 9:00 am. **(b)** BC: Sector Nororiental, microambiente peatón de vía entre las 11:20 am a 12:00 pm. **(c)** PM_{2.5}: Sector Avenida, microambiente pasajero de transporte público entre las 9:30 a 10:00 am.

Fuente: Elaboración propia

Se identificó, además, que las concentraciones también se ven influenciadas por el día de la semana, donde los fines de semana (sábado y domingo) el tráfico vehicular disminuye tanto en particulares como en el servicio de transporte público (en un 75 y 50 % respectivamente para esta última categoría). Los días sábado presentaron valores similares a un día laboral entre semana, mientras que para el domingo las concentraciones medianas de $PM_{2.5}$ disminuyeron un 21 % para peatones de vías y 65 % en interior de los buses con valores registrados de $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Para el caso de BC esta disminución fue del 28 % para peatones de las vías con una mediana de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (el interior de buses no presenta registro de este contaminante para el domingo). Este comportamiento de los sábados se evidencia también en las estaciones de calidad del aire, donde los sábados las concentraciones son similares a un día laboral con una variabilidad no mayor al 20 % [7].

2.4 Relación BC/ $PM_{2.5}$

Al realizar el comparativo entre las concentraciones observadas de BC y $PM_{2.5}$ en cada microambiente, se identifica que existe una mayor influencia del BC para microambientes asociados a interiores del transporte público, siendo el BC un aportante de alrededor del 38 % de material particulado, mientras que para el caso de microambientes asociados a inmediaciones en las vías (peatones) este aporte se reduce al 30 % del total, reducción posiblemente asociada a la facilidad de dispersión de los contaminantes.

Al comparar con los resultados obtenidos en Bogotá [11] se identificó que ambas ciudades (Bogotá y Manizales) poseen un aporte mayor de BC al total de $PM_{2.5}$ al interior del transporte público respecto a los peatones en las vías. Al relacionar las diferencias porcentuales entre los microambientes (bus y peatón) de la ciudad de Bogotá, se identificó que para $PM_{2.5}$ y BC existen concentraciones 68 % y 79 % superiores al interior de los buses comparado con los peatones en vías, mientras que para Manizales esta diferencia porcentual se halló en el 50 % y 25 % respectivamente [11]. Estos resultados reflejan la importancia del aporte aproximado de la contaminación proveniente de las emisiones de fuentes móviles y su relación con la dispersión del contaminante, considerando que la flota de esta categoría vehicular en su totalidad opera con motores de combustión diésel en ambas ciudades.

3. CONCLUSIONES

Por primera vez para Manizales, se caracterizaron las concentraciones de $PM_{2.5}$ y BC en inmediaciones de vías principales de la ciudad (niveles de exposición directa). Los resultados indican que las concentraciones medianas de $PM_{2.5}$ encontradas en las inmediaciones de las vías analizadas fueron de $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el sector centro y $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$

en el sector nororiental (Milán). Para BC, las concentraciones medianas fueron de $6.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el sector centro y $4.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el sector nororiental (Milán). Valores 10 y 30 % menores en el sector nororiental respecto al centro indican la influencia del tráfico vehicular del sector, cuyo flujo es más alto en el sector centro (90 % para vehículos diésel). Para el caso de los recorridos en vehículos de transporte público, cuyo recorrido era en ambos sentidos, las concentraciones medianas de $\text{PM}_{2.5}$ y BC fueron de $34\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $14\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Se identificó que la exposición para pasajeros de transporte público está influenciada por el sistema de gases de escape, la ubicación del pasajero dentro del bus, las ventanas o puertas abiertas, entre otros factores que pudieron ser identificados gracias a los formatos de campo.

La relación $\text{BC}/\text{PM}_{2.5}$ hallada en Manizales con valores de 0.3 para peatones y 0.38 para el interior de los buses sugiere que en las zonas de la ciudad estudiadas y en los microambientes monitoreados el tráfico vehicular que usa combustible diésel es una fuente de emisión importante.

Los resultados presentados muestran la necesidad de seguir fortaleciendo este tipo de análisis y usar sus resultados como insumo para la formulación de estrategias de gestión de la calidad del aire en Manizales. Así mismo, la divulgación de estos resultados con las autoridades ambientales, los ciudadanos e instancias como la mesa de calidad del aire de la ciudad permitirá resaltar la importancia de priorizar la problemática de contaminación atmosférica en la agenda pública de la ciudad. Considerando, además, que para el año 2017 la movilización se caracterizó por tener un total de viajes realizados en la ciudad equivalente al 29 % en modo de transporte autónomo (peatón) y un 28 % para el caso de transporte público, indicando una cantidad considerable de viajes que se realizan en las vías de la ciudad por estos dos medios.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los integrantes del Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental (GTAIHA) de la Universidad Nacional de Colombia por sus esfuerzos y dedicación para la recolección y procesamiento de la información aquí presente. También, al Centro de Investigación de Ingeniería Ambiental (CIIA) de la Universidad de los Andes por la participación en las campañas de recolección de datos. Y, por último, a la empresa de transporte público por su aceptación y apoyo en la jornada de campo dentro de los buses.

REFERENCIAS

- [1] Organización Mundial de la Salud (OMS), “Calidad del aire ambiente (exterior) y salud,” *Nota descriptiva*, 2016. [En línea]. Disponible: [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). [Consultado: 04-Dec-2019].
- [2] J. F. Segura-Contreras y J. F. Franco, “Exposición de peatones a la contaminación del aire en vías con alto tráfico vehicular,” *Revista salud pública*, vol. 18, pp. 179–187, 2016. doi: 10.15446/rsap.v18n2.47209
- [3] Departamento Nacional De Planeación, “Los costos en la salud asociados a la degradación ambiental en Colombia ascienden a \$20,7 billones,” 2017. [En Línea]. Disponible: [https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradación-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-\\$20,7-billones-.aspx](https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradación-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-$20,7-billones-.aspx). [Consultado: 04-Dec-2019].
- [4] J. Cortés, C. M. González, A. Arias, M. Orozco, y B. H. Aristizábal, “Análisis de Datos de Calidad del Aire en la Ciudad de Manizales Utilizando Matlab y Openair” en *Entendimiento de fenómenos ambientales mediante análisis de datos*, Vol I, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, pp.73-114, 2015.
- [5] Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales (UNAL). Instituto de estudios ambientales, “CDIAC Manizales,” 2019. [En línea]. Disponible: <http://cdiac.manizales.unal.edu.co/indicadores/public/calculationClimatology>. [Consultado: 08-Jun-2019].
- [6] DANE, “Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 Manizales, Caldas,” 2019.
- [7] Corporacion autonoma regional de Caldas (Corpocaldas) y Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales (UNAL). 2019. “Boletín calidad del aire en Manizales año 2018,” Manizales, 2018. [En Línea]. Disponible: http://cdiac.manizales.unal.edu.co/inicio/publicaciones/boletin_rvca_manizales_2018.pdf. [Consultado: 29-Sep-2020].
- [8] Corporacion autonoma regional de Caldas (Corpocaldas) y Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales (UNAL). 2019. “Actualización del inventario de emisiones atmosféricas en la ciudad de Manizales año base 2017,” Manizales, 2019. [En Línea] Disponible: <http://cdiac.manizales.unal.edu.co/inicio/publicaciones/Bolet%C3%ADn%20inventario%20de%20emisiones%20atmosf%C3%A9ricas%20Manizales%20a%C3%B1o%20base%202017.pdf> [Consultado: 29-Sep-2020]
- [9] Consejo de Manizales, “GACETA 0188 del 15 junio - Plan Maestro de Movilidad 2018,” Manizales, 15 Jun. 2018.
- [10] Programa Manizales cómo vamos, “Informe de calidad de vida, Manizales cómo vamos,” Manizales, 2018.
- [11] R. Morales Betancourt, B. Galvis, J. M. Rincón-Riveros, M. A. Rincón-Caro, A. Rodríguez-Valencia, y O. L. Sarmiento, “Personal exposure to air pollutants in a Bus Rapid Transit System: Impact of fleet age and emission standard,” *Atmospheric Environment*, vol. 202, pp. 117–127, 2019. doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.01.026

- [12] R. Goel, S. Gani, S. K. Guttikunda, D. Wilson, y G. Tiwari, “On-road PM_{2.5} pollution exposure in multiple transport microenvironments in Delhi,” *Atmospheric Environment*, vol. 123, pp. 129–138, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.10.037>
- [13] J. F. Franco, J. F. Segura, y I. Mura, “Air pollution alongside bike-paths in bogotá-colombia,” *Frontiers Environment Science*, vol. 4, pp. 1–10, 2016. doi: 10.3389/fenvs.2016.00077
- [14] P. Kumar, I. Rivas, A. P. Singh, V. J. Ganesh, M. Ananya, y H. C. Frey, “Dynamics of coarse and fine particle exposure in transport microenvironments,” *npj Climate and Atmospheric Science*, vol. 1, 2018. doi: 10.1038/s41612-018-0023-y
- [15] B. Liu, et al., “Potential exposure to fine particulate matter (PM_{2.5}) and black carbon on jogging trails in Macau,” *Atmospheric Environment*, vol. 198, pp. 23–33, 2019. doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.10.024
- [16] B. Onat, Ü. A. Şahin, B. Uzun, Ö. Akın, F. Özkaya, y C. Ayvaz, “Determinants of exposure to ultrafine particulate matter, black carbon, and PM_{2.5} in common travel modes in Istanbul,” *Atmospheric Environment*, vol. 206, pp. 258–270, 2019. doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.02.015