

EVALUACIÓN DIARIA DE LA EXPOSICIÓN PERSONAL A PM_{2.5} EN DIFERENTES PUNTOS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ

DAILY EVALUATION OF THE PERSONAL EXPOSURE TO PM_{2.5} IN DIFFERENT POINTS OF THE CITY OF BOGOTÁ

Gómez Ríos Angélica Maria¹

¹ Estudiante de la Facultad de Ingeniería Ambiental. Semillero de Salud Ambiental del grupo INAM-USTA. Universidad Santo Tomás de Bogotá D.C., Colombia. E-mail: angelica.gomez@usantotomas.edu.co

RESUMEN

Objetivo: evaluar la exposición personal a PM_{2.5} en diferentes actividades diarias que se desarrollan normalmente en diferentes puntos de la ciudad de Bogotá.

Metodología: estudio de caso, analizado por medio de estadística descriptiva de los datos de concentración para el contaminante PM_{2.5}, determinando máximos, mínimos, media, mediana y percentiles de 25, 50 y 75 respectivamente, para evidenciar el comportamiento de las concentraciones de PM_{2.5} a nivel ambiental y personal. Se utilizó información horaria de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) registrada en cuatro estaciones, y los registros en tiempo real obtenidos por el equipo de monitoreo portátil denominado Airbeam, para determinar el porcentaje de exposición personal del participante en las actividades diarias.

Resultados: se evidencio que la exposición personal promedio de PM_{2.5} del participante en la primera sesión de muestreo fue de 16,11 µg/m³, la RMCAB reportó concentraciones promedio de 27,46 µg/m³. Las concentraciones personales registradas más elevadas se evidenciaron en lugares cerrados, siendo en el área de trabajo y estudio, con un porcentaje de exposición de 85,4% y 72,6%, respectivamente. En el segundo monitoreo se registró un valor de 9,62 µg/m³, donde las actividades desarrolladas al aire libre y movilidad en transporte, obtuvieron un porcentaje de exposición de 187,1% y 193,2%, ya que los valores registrados por el Airbeam sobrepasan los de la RMCAB, es decir, que la exposición personal fue mayor en comparación a los niveles ambientales registrados por la RMCAB.

Conclusiones: se observó una relación entre las concentraciones de PM_{2.5} a nivel ambiente y personal, que permitió establecer un porcentaje aproximado de exposición con respecto a la RMCAB. El espacio con los niveles más altos de PM_{2.5} fue el exterior (transporte y aire libre), donde se tiene mayor exposición personal que ambiental; en los espacios de estudio y laboral se registraron las concentraciones más elevadas para mediciones intramurales en los dos periodos de monitoreo.

Palabras clave: exposición personal; estudio de caso; PM_{2.5}; medición a tiempo real; porcentaje de exposición.

ABSTRACT

Objective: evaluate the personal exposure to PM_{2.5} in different daily activities that take place in different points of the city of Bogotá.

Methods: case study, analyzed by means of the descriptive statistics of the concentration data for the PM_{2.5} pollutant, determining maximums, minimums, mean, median and percentiles of 25, 50 and 75 respectively, to demonstrate the behavior of PM_{2.5} concentrations at an environmental and personal level. Time information from the Bogota Air Quality Monitoring Network (RMCAB) registered at four stations was used, and real-time records obtained by the portable monitoring device called Airbeam, to determine the percentage of personal exposure of the participant in the daily activities.

Results: it was evidenced that the average personal exposure of PM_{2.5} of the participant in the first sampling session was 16,11 µg/m³, the RMCAB reported average concentrations of 27,46 µg/m³. The highest recorded personal concentrations were evidenced in closed places, being in the area of work and study, with an exposure percentage of 85.4% and 72.6%, respectively. In the second monitoring a value of 9,62 µg/m³ was registered, where the activities developed in the open air and transport mobility, obtained an exposure percentage of 306.5% and 175.5%, since the values recorded by the Airbeam surpass those of the RMCAB, that is to say, that the personal exposure was greater in comparison to the environmental levels registered by the RMCAB.

Conclusions: a relationship was observed between PM_{2.5} concentrations at ambient and personal level, that allowed to establish an approximate percentage of exposure with respect to the RMCAB. The space with the highest levels of PM_{2.5} was the exterior (transport and open air), where you have more personal exposure what environmental; in the study and work spaces, the highest concentrations were recorded for intramural measurements in the two monitoring periods.

Key Words: Personal exposure; case study; PM_{2.5}; real-time measurement; percentage of exposure.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire se refiere a la liberación de contaminantes en la atmósfera que pueden generar efectos adversos sobre la salud y el ambiente, se define como la contaminación del ambiente interior y exterior por cualquier agente químico, físico o biológico que modifique las características naturales de la atmósfera [1]. Los efectos de la contaminación del aire en la salud han sido objeto de un intenso estudio en los últimos años, ya que la exposición a contaminantes como el material particulado en el aire y el ozono se ha asociado con aumentos en la mortalidad y morbilidad; por lo cual, la regulación de las emisiones de contaminantes atmosféricos dañinos busca proteger la salud pública [2]. En la actualidad uno de los principales contaminantes evaluados a lo largo del mundo es la polución de partículas o más conocido como material particulado, el cual es una mezcla compleja de partículas suspendidas en el aire y gotitas líquidas compuestas por ácidos amonio, agua, carbón negro, productos químicos orgánicos, metales y material del suelo. La contaminación por partículas se agrupa en dos categorías, las partículas gruesas (PM₁₀)

con un diámetro de 2,5 a 10 micras, y las partículas finas ($PM_{2.5}$) con diámetros menores a 2.5 micras [3, 4]. Los tipos de fuentes que contribuyen a los modos de presentación de partículas son derivados de: para partículas en el modo grueso incluye el polvo de la carretera, el polen, las esporas y algunas partículas industriales [5]; las partículas finas se encuentran en el humo y la niebla, con principal fuente de emisión las industrias procesadoras de minerales (incluye fábricas de acero, cementeras, fundidoras, obras de construcción y demolición, hornos y chimeneas [6]) y una cantidad desconocida de partículas finas que han sido depositadas y resuspendidas por el viento o actividades humanas [5].

La exposición personal a material particulado (PM) puede estar influenciada por tiempo y concentraciones microambientales, de igual forma la exposición personal difiere significativamente según el patrón de actividad a evaluar [7]. Estudios demuestran que la exposición personal a PM varía según la actividad humana, como cocinar, pasar la aspiradora y caminar [8]; en China, investigaciones epidemiológicas de Zhanlan Fana, Vivian Pun, entre otros autores, evidenciaron una concentración ambiental promedio para $PM_{2.5}$ de $13,3 \pm 6,4 \mu g/m^3$ (monitoreado por las estaciones) siendo significativamente menor en relación con la concentración de exposición personal, con registros de $28,1 \pm 23,3 \mu g/m^3$ [9]. Actualmente, se han encontrado correlaciones entre los niveles de contaminación de material particulado y las afecciones respiratorias en humanos, teniendo como base visitas a salas de emergencia, hospitalización y reducción de la función pulmonar; de igual forma se establece la correlación entre la tasa de mortalidad asociada a enfermedades respiratorias y cardiovasculares [10, 11]; en estudios previos se ha encontrado relación entre la exposición a largo plazo de las fracciones más finas de material particulado y los efectos en la mortalidad por afecciones cardiovasculares [12].

En Colombia, la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), recolecta información sobre la concentración de contaminantes ambientales, entre los cuales se encuentran PM_{10} y $PM_{2.5}$, con el fin de determinar los lugares potencialmente dañinos para la población, debido a altas concentraciones de contaminantes criterio; .Estudios realizados en Estados Unidos establecen que el PM monitoreado puede ser insuficiente para caracterizar los resultados de salud a corto plazo que puede desarrollar la población afectada [13, 14]. El material particulado (PM) es un indicador clave de la contaminación del aire derivado de actividades naturales y humanas, ya que muestra la evolución de las emisiones de partículas sólidas en suspensión en la atmósfera; de igual forma, debido a que puede suspenderse y recorrer largas distancias en la atmósfera puede causar una amplia gama de enfermedades que conducen a una reducción significativa de la vida humana [15]. Algunos estudios han demostrado los efectos de la exposición prolongada a la contaminación del aire sobre la mortalidad, evaluando las concentraciones de material particulado menor de $10 \mu m$ (PM_{10}) de diámetro [16]; para $PM_{2.5}$ se dispone de pocos estudios que abordan la investigación, en parte debido a la baja disponibilidad de datos de monitoreo de rutina diaria [17]. El aumento diario de los niveles de exposición de partículas gruesas y finas afecta la modulación autonómica cardíaca entre adultos sanos, al igual que la presión arterial diastólica y reduce la función pulmonar, estableciendo niveles de riesgo

para la salud humana, por tal razón la contaminación por estos compuestos es relevante para la calidad de vida [18].

En Bogotá, capital de Colombia, se han desarrollado investigaciones asociadas a la exposición personal de 2017 en ciclistas, mediante la determinación de puntos estratégicos a lo largo de la ciclovía; de igual forma, otro estudio aplicado a los policías de tránsito de Bogotá, relacionó el PM_{10} con resultados adversos sobre la salud como la tos, expectoración y rinosinusitis, aplicando como herramienta de desarrollo encuestas y pruebas toxicológicas a cada individuo de estudio [19, 20]. Una investigación realizada en el 2017 en la ciudad de Bogotá evaluó la exposición de $PM_{2.5}$ y carbón negro en microambientes de transporte, registrando que la exposición de los individuos fue 10 veces más alta en los autobuses (sistema Bus Rapid Transit) en relación con los niveles de fondo, siendo el microambiente de transporte el más contaminado entre los considerados en el estudio (mayor dosis inhalada por unidad de tiempo) [21]. Teniendo en cuenta la ausencia de estudios de exposición personal diaria a $PM_{2.5}$ en actividades cotidianas desarrolladas en la ciudad de Bogotá, en el presente trabajo se evaluó las concentraciones de exposición personal a $PM_{2.5}$, tomando como base la rutina diaria de un individuo en diferentes puntos de la ciudad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. *Diseño de estudio*

Estudio de caso longitudinal desarrollado en diferentes zonas de la ciudad de Bogotá, delimitado en cuatro localidades: Suba, Barrios Unidos, Chapinero y Teusaquillo; es de tipo longitudinal ya que se abarcaron dos sesiones de muestreo en relación al mismo individuo de estudio, las cuales se llevaron a cabo entre el 18 al 31 de marzo y del 12 al 25 de mayo de 2018, teniendo en cuenta la temporalidad del estudio, las mediciones de la primera sesión de muestreo se realizaron en el desarrollo de la Semana Santa, para así evidenciar los niveles de exposición por partículas teniendo en cuenta los días hábiles y no hábiles de cada semana. El desarrollo de la Semana Santa posee un comportamiento diferente en las concentraciones de partículas, ya que tiene días festivos a lo largo de la semana; informes obtenidos por la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), establecen reducciones en los niveles de $PM_{2.5}$, debido a que la principal fuente móvil generadora de este contaminante circulan fuera del área metropolitana [21], generando una menor circulación vehicular por efecto de la Semana Santa.

Para el desarrollo de este estudio se requirió que el participante completará durante los dos periodos de medición un monitoreo personal activo de 24 horas [9], con el fin de medir la exposición personal a $PM_{2.5}$ durante catorce días consecutivos en cada muestreo, teniendo en cuenta el desarrollo de las actividades diarias del participante. Co [23].

Se cuantificó el tiempo invertido por el participante en cinco diferentes espacios donde se desarrollaban las actividades diarias, las cuales tuvieron lugar en el interior, exterior y en el transporte. Adicionalmente, se evaluó el comportamiento de las variables meteorológicas humedad relativa y temperatura, las cuales fueron medidas a la par con el contaminante a

estudiar, con el fin de evidenciar alguna correlación entre las variables meteorológicas y la concentración de partículas finas ($PM_{2.5}$) registradas en cada una de las sesiones de muestreo.

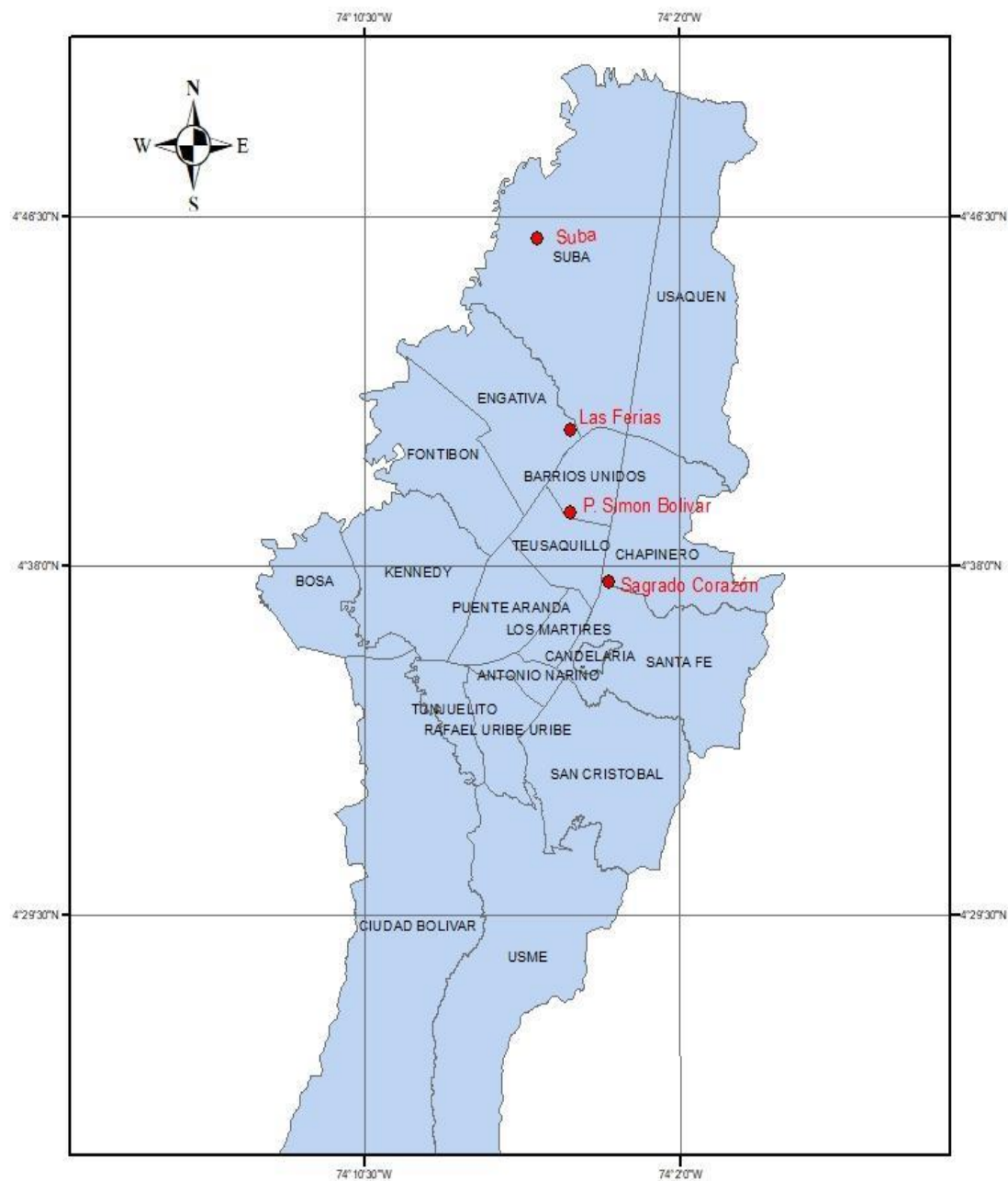
2.2. *Exposición personal $PM_{2.5}$ y datos sobre contaminantes ambientales*

La medición de exposición personal a $PM_{2.5}$ se realizó mediante el equipo de monitoreo portátil Airbeam, donde se registraron medidas continuas de concentraciones de partículas en el aire. El equipo de monitoreo posee una plataforma, la cual consiste en sensores portátiles que detectan cambio en su entorno y fisiología, incluido un motor de calidad del aire llamado Airbeam [24, 25]. El equipo de monitoreo permite documentar las mediciones de $PM_{2.5}$, por medio de la herramienta Bluetooth, donde los datos ingresan a la aplicación AirCasting indicando las concentraciones de partículas más altas o bajas en tiempo real [25]. Este método permite el examen de la exposición estimada de un individuo a través del espacio y el tiempo [26], lo que proporciona nuevos conocimientos sobre las relaciones exposición-actividad que no son posibles con las técnicas tradicionales de evaluación de la exposición [24, 27].

Siguiendo la rutina diaria de un individuo en específico, se obtuvieron datos intramurales y extramurales de las concentraciones de $PM_{2.5}$ a las cuales estuvo expuesto el participante.

Las concentraciones a nivel ambiental de $PM_{2.5}$ se obtuvieron de cuatro estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB). Las estaciones de la RMCAB fueron seleccionadas bajo la proximidad de desarrollo de las actividades diarias registradas en el diario de campo del participante, con el fin de delimitar las zonas de interés, para así relacionar los niveles de exposición personal registrados por el equipo portátil y los ambientales obtenidos por las estaciones de calidad del aire del Centro de Alto Rendimiento, Suba, Las Ferias y Sagrado Corazón (Figura 1) [28].

Figura 1. Ubicación de las cuatro estaciones de calidad del aire de Bogotá usadas en el estudio.



Convenciones

- Estaciones RMCAB
- Localidades

Ubicación estaciones de monitoreo de calidad del aire de Bogotá usadas para el estudio

Fuente de información:
Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá

Elaborado por: Angelica Maria Gómez Rios

Fecha: Agosto de 2018

Fuente: el autor.

2.3. Tratamiento de datos de ambiente y exposición personal

Los datos asociados a la exposición personal obtenidos con el equipo Airbeam, se obtuvieron en segundos, los cuales fueron convertidos a hora por medio de una media aritmética, con el fin de relacionar la exposición personal y ambiental. Se realizó un análisis de correlación con base en los datos obtenidos por la RMCAB y el equipo portátil, en los periodos de muestreo comprendidos entre el 18 al 31 de marzo y 12 al 25 de mayo de 2018.

Los datos disponibles en la página de Secretaría Distrital de Ambiente, comprenden las mediciones a nivel ambiental horarios de cada una de las estaciones de la RMCAB que fueron utilizadas, en las cuales se disponía de por lo menos el 98% de datos para las dos sesiones de monitoreo de $PM_{2.5}$; se determinaron los máximos y mínimos diarios, así como el promedio de 24 horas a nivel ambiental y personal. La base de datos de la ciudad de Bogotá y la obtenida mediante el equipo portátil, en las dos sesiones de monitoreo, fueron debidamente ordenadas mediante el programa informático Excel y Minitab 17 Statistical Software; la información fue posteriormente estratificada por día y estación de monitoreo, en relación a la proximidad de desarrollo de las actividades del participante.

Con el fin de comparar las concentraciones a nivel ambiental y personal, los datos registrados en la RMCAB se ordenaron con base al área de influencia donde el participante desarrollaba sus actividades; es decir, por cada uno de los microambientes fue asignada una estación de calidad del aire, generando así un registro diario de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en los dos contextos de monitoreo.

2.4. Análisis estadístico

Mediante el software estadístico Minitab 17 y el programa informático Excel se determinaron las concentraciones máximas, mínimas, media, mediana, rango intercuartil y percentiles de 25, 50 y 75 de $PM_{2.5}$, identificando el comportamiento de los niveles ambientales y personales a lo largo del muestreo.

Para la relación de síntomas como tos, expectoración o flema, dolor de pecho, disnea, secreción nasal, irritación ocular, dolor de cabeza, irritación de garganta, bronquitis o resfrió, irritación dérmica, irritación nasal y presencia de roncus [23], se tuvieron en cuenta las concentraciones de exposición personal a $PM_{2.5}$ a 10, 20 y 30 minutos previos a la manifestación del síntoma, para así de alguna forma evidenciar si podían o no ser un factor causal que generará efectos sobre la salud [20]; se adoptó este tiempo previo de exposición, debido a que estudios realizados en México y República Checa para la asociación de síntomas a concentraciones de partículas finas en salones de clase, determinaron que las concentraciones máximas 24 horas y las condiciones demográficas, se relacionaban con la manifestación de síntomas [29, 30].

Para la determinación del porcentaje de exposición basado en la RMCAB a la que estuvo expuesto el participante, se correlacionaron los datos obtenidos por las estaciones y las mediciones del Airbeam, es decir, se relaciona las concentraciones del monitoreo personal con las ambientales, para así establecer un porcentaje de exposición personal al que está

expuesto el participante; por medio de este se puede determinar en qué medida el individuo está expuesto con base a lo registrado por la RMCAB.

2.5. Caracterización de microambientes

La identificación de las actividades desarrolladas por el participante se determinó mediante la implementación del reporte diario, generando un cronograma detallado con las ocupaciones desarrolladas a lo largo de las mediciones de $PM_{2.5}$, permitiendo identificar los espacios y tiempos de desarrollo de cada una de las actividades. En interiores se desarrollaron actividades asociadas a estudio, hogar y laboral, mientras que en exteriores se clasificaron por aire libre y transporte. Para cada uno de estos espacios se analizó la distribución de las concentraciones medias de $PM_{2.5}$ a nivel personal a la que estuvo expuesto el participante.

3. RESULTADOS

3.1. Características del participante y perfil de actividades

Las características del participante del estudio están asociadas a un hogar de no fumadores, desempeñando actividades diarias de un estudiante promedio. El sujeto de estudio registró sus actividades a lo largo de cada periodo de muestreo generando un cronograma detallado, donde se determinó el tiempo invertido en diferentes microambientes durante el monitoreo personal de cada una de las sesiones de muestreo, esta caracterización del perfil de actividades para cada sesión de muestreo se muestra en la *Tabla 1*. Durante el primer periodo de monitoreo se determinó que el participante pasó un 84,2% de su tiempo en el interior, de los cuales el 58,6% lo pasaba en el hogar; para el desarrollo de las actividades en el exterior pasaba el 15,8% del tiempo total, donde 8,3% del tiempo se utilizó en el transporte. En el segundo periodo de muestreo, el participante pasó cerca del 51,5% desarrollando actividades en el hogar, seguido de un 18,4% en funciones laborales, mientras que el tiempo asociado al transporte fue de 10,1%. En el microambiente de estudio se registró para el primer periodo de muestreo un 12,2%, teniendo una variación al compararlo con el segundo periodo de medición, el cual determinó que el tiempo invertido en las actividades asociadas a este espacio fue de 14,9%, generando un incremento de 2,7% en el segundo periodo de muestreo.

La variación espacio-tiempo asociado a los dos periodos de muestreo, evidencia un cambio mínimo en el desarrollo de las actividades por el participante, ya que la variación del tiempo de cada uno de los microambientes no es significativa, en relación al desarrollo de actividades durante la medición; de igual forma, se debe tener en cuenta que la distribución temporal asociada a este estudio se basó en la rutina de un individuo en específico.

Tabla 1. Descripción de actividades del participante durante el muestreo personal.

Datos de diario de actividad, tiempo-actividad (%)	1^{ra} sesión de muestreo Mediana (media)	2^{da} sesión de muestreo Mediana (media)
Tiempo pasado en el interior		
En el interior, estudio	8,4 % (12,2%)	16,7 % (14,9%)
En el interior, trabajo	16,7 % (13,4%)	20,8 % (18,4%)
En el interior, casa	47,9 % (58,6%)	41,7 % (51,5%)
Total pasado en el interior	87,5% (84,2%;)	87,5 % (83,9%)
Tiempo pasado en el exterior		
Al aire libre	4,2 % (7,4%)	3,9 % (5,1%)
Transporte (Transmilenio)	12,5% (8,3%)	12,5 % (10,1%)
Total pasado en el exterior	12,5%(15,8%)	12,5 % (16,1%)

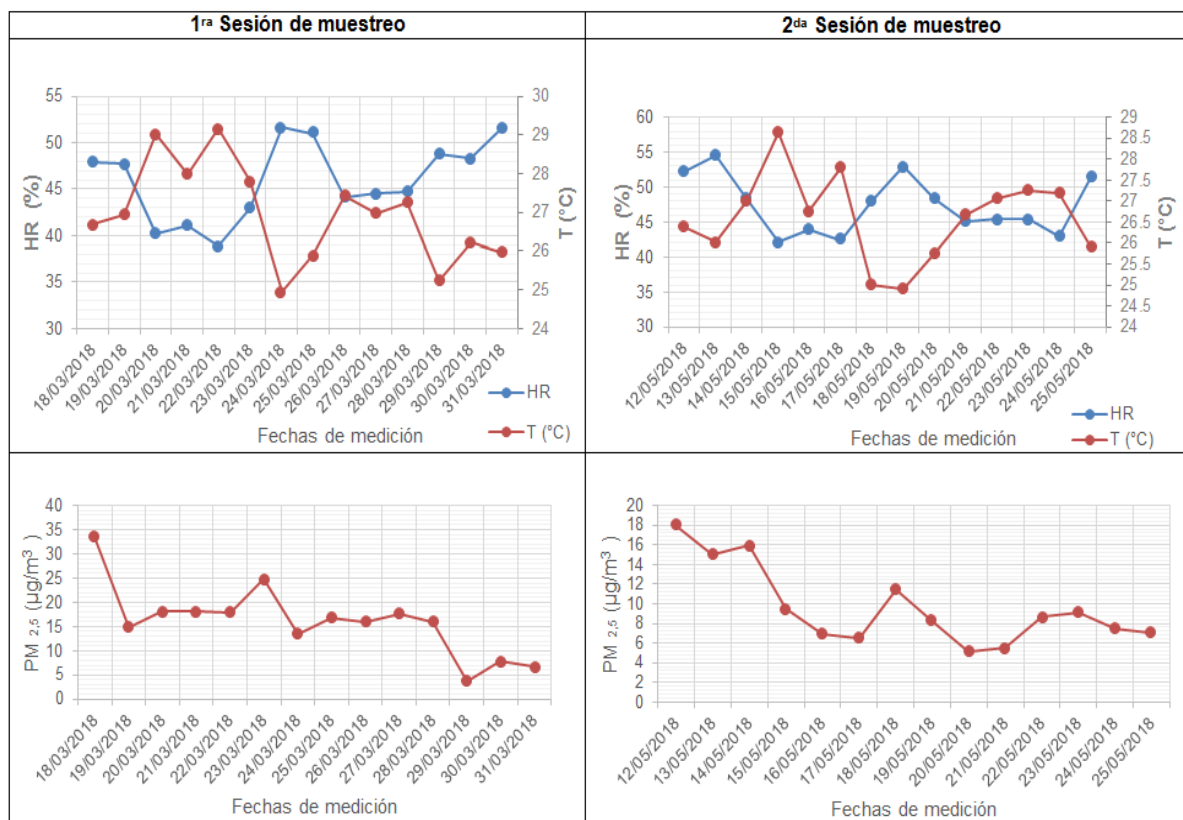
Fuente: el autor.

3.2. Relación de variables meteorológicas con respecto a PM_{2.5}

Los datos de cada una de las variables meteorológicas fueron registrados por el equipo portátil a la par con el PM_{2.5}, donde se encontró una humedad relativa promedio (HR) de 45,6% y temperatura de 26,9°C a lo largo del primer monitoreo, siendo consistente con lo registrado en el segundo monitoreo de 47,4% y 26,6 °C como se evidencia en la *Tabla 2*; se determinó que el comportamiento de estas dos variables meteorológicas fue inversamente proporcional, ya que la concentración de la humedad por volumen es mayor o menor en función de la energía calorífica que contiene la atmósfera (temperatura) [32]. Este comportamiento se evidenció el día 24 de marzo de 2018, donde se registraron valores de humedad relativa (HR) de 51,6% y temperatura de 24,9°C, generando así una disminución en las concentraciones de PM_{2.5} (13,5 µg/m³ promedio 24 horas). En el segundo muestreo se observó un comportamiento similar el día 19 de mayo de 2018, donde se registró una HR de 52,9% y una temperatura de 24,9°C, con concentración de PM_{2.5} de 8,3 µg/m³. Las temperaturas asociadas a la primera y segunda medición registraron valores medios entre 24,9°C y 29,1°C, donde el 50% de los registros mostraron una temperatura por debajo de 26,8°C; la humedad relativa registró una mediana de 46,6% con valores extremos de 38,8% y 54,5%.

El comportamiento de estas variables meteorológicas con respecto a las concentraciones de PM_{2.5} en este estudio, poseen en determinados días un comportamiento en el cual a medida que aumenta la temperatura se espera que incremente los niveles de contaminación, como se ha observado en otros estudios [32,33]; de igual forma la dispersión de los datos en relación con la temperatura y la humedad no siempre generan modificación en las concentraciones de PM_{2.5}, ya que a medida que se analizan los datos de las dos sesiones de muestreo, el comportamiento de las variables meteorológicas no es concluyente en cuanto a la reducción de PM_{2.5}.

Tabla 2. Relación de variables meteorológicas y PM_{2.5} promedio 24 horas.



HR: humedad relativa

T: temperatura

°C: grados Celsius

Fuente: el autor.

3.3. Caracterización de la exposición personal a PM_{2.5} en la 1^{ra} sesión de muestreo

El primer muestreo se realizó entre el 18 al 31 de marzo de 2018. Durante el desarrollo de este muestreo La Subdirección de Calidad del Aire, Auditiva y Visual (SCAAV), a través Sistema de Alertas Tempranas Ambientales de Bogotá (SATAB) en su componente aire, declaró el día 23 de marzo, alerta amarilla en la ciudad, motivada por el evento de contaminación atmosférica basado en el contaminante PM_{2.5} [34]. El Índice Bogotano de Calidad del Aire (IBOCA) mostró la distribución porcentual del contaminante para las estaciones de RMCAB ubicadas en las localidades de Suba, Engativá, Fontibón, Bosa, Tunjuelito, Kennedy y Puente Aranda, registrando una condición regular [35]. El informe emitido por la Secretaria Distrital de Ambiente establece como principal causante de esta alerta a las velocidades medias del viento de marzo de 2018, ya que son inferiores respecto a la velocidad media de los meses de marzo de años anteriores (2010 - 2017), contribuyendo en cierta medida un aumento en las concentraciones de PM_{2.5} durante el mes de marzo, lo que indica que la calidad del aire presenta reportes moderados [34] con efectos nocivos para la salud.

3.3.1. Caracterización general de las mediciones de PM_{2.5}

En la *Tabla 3* se evidencian las concentraciones medias del contaminante PM_{2.5}, a nivel ambiental, personal y el porcentaje de exposición con base a la RMCAB a las que estuvo expuesto el participante. La exposición personal promedio de PM_{2.5} fue calculada por medio de la media aritmética de los datos diarios de la primera sesión de muestreo, registrando una concentración promedio de 16,11 µg/m³, un máximo de 33,6 µg/m³ registrado el día 18 de marzo de 2018 y un mínimo de 3,69 µg/m³ para el día 29 de marzo de 2018; la RMCAB registró concentraciones promedio de 27,46 µg/m³ con un valor máximo de 40,11 µg/m³ para el día 23 de marzo de 2018 y un mínimo de 10,62 µg/m³ el 29 de marzo de 2018.

Las mediciones de la RMCAB permite generar una correlación con los datos obtenidos por el Airbeam, para así llegar a conocer un valor aproximado a la que está expuesto el participante a lo largo del desarrollo de su rutina diaria, teniendo como base las estaciones de monitoreo; para la primera sesión se estableció un porcentaje de exposición general de 56,73% con respecto a la RMCAB, por lo cual la concentración de PM_{2.5} asociada a esta porcentaje es de 15,6 µg/m³, es decir, el nivel al que está expuesto el participante tomando como base la concentración ambiental. La normativa colombiana para calidad del aire (Resolución 2254 de 2017), establece un máximo permisible para PM_{2.5} de 50 µg/m³ por un tiempo de exposición de 24 horas [36], el cual no fue superado en el primer muestreo, registrando valores de 27,46 µg/m³ para un periodo de 24 horas y un promedio por segundo de 16,11 µg/m³. Sin embargo, el valor guía establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 25 µg/m³ de media en 24 horas [37]; fue excedido en 2,46 µg/m³ por la medición promedio 24 horas calculada en la exposición personal.

Tabla 3. Descripción de las concentraciones de PM_{2.5} medidas por el Airbeam y la RMCAB para la 1^{ra} sesión de muestreo.

Contaminante	Media	S	Min.	Mediana	Max.
Personal PM _{2.5} (µg/m ³)	16,11	7,44	3,69	16,45	33,60
Ambiente PM _{2.5} (µg/m ³)	27,46	9,06	10,63	28,57	40,11
Porcentaje de exposición personal (%)	56,73	13,56	34,70	53,73	96,44

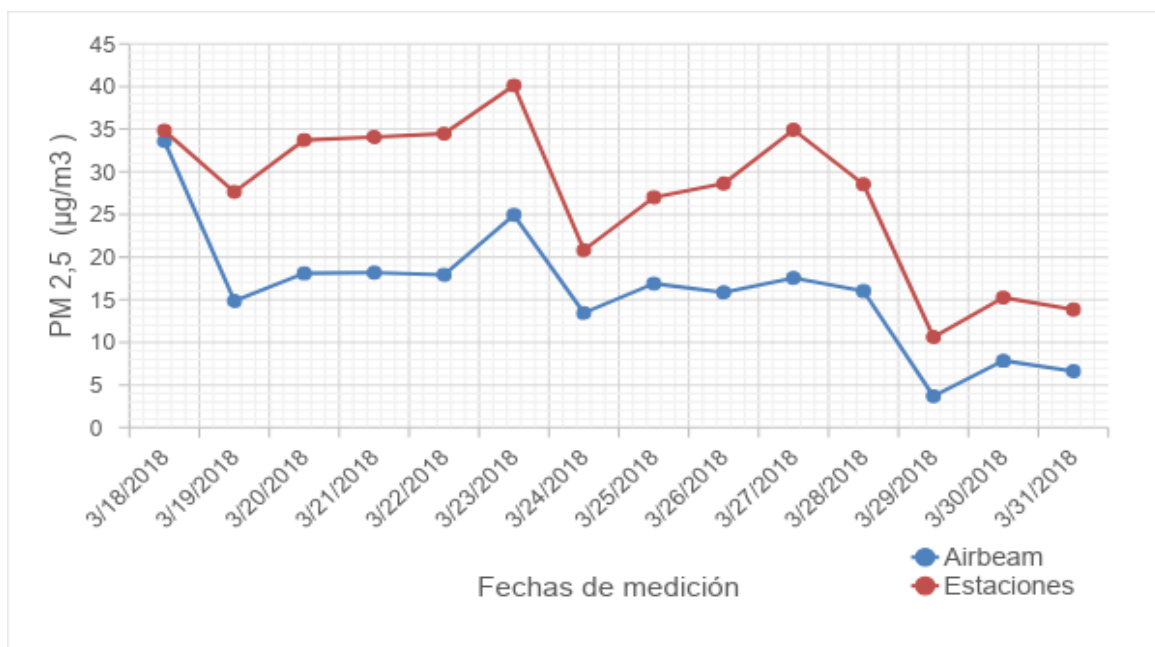
S: desviación estándar

Fuente: el autor.

En la *Gráfica 1* se observa el comportamiento de las concentraciones de PM_{2.5} a nivel ambiente y personal, donde la media de exposición personal fue de 16,11 µg/m³ (intervalo de confianza del 95%, IC: 12,2 – 20,0 µg/m³). A lo largo de las mediciones diarias de la primera sesión de muestreo se evidencia que la exposición personal al contaminante mantiene mediciones menores a las reportadas en la RMCAB, de igual forma se establece que el comportamiento para estas dos concentraciones son uniformes teniendo incrementos y reducciones en los mismos días respectivamente; a lo largo de esta medición se estableció el 23 de marzo de 2018 la alerta amarilla por contaminación del aire, donde se atribuyeron valores medios de 40,1 µg/m³ en las estaciones y a nivel personal de 25,0

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ (siendo este dato el máximo permisible por 24 horas de la OMS); una vez levantada la medida del IBOCA el día 29 de marzo de 2018, se registraron valores medios de $3,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $10,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a nivel personal y ambiental respectivamente. Los registros de $\text{PM}_{2,5}$ por exposición personal muestreados con el equipo portátil poseen una distribución de datos de la siguiente manera: el 75% de los datos oscilan entre $9,21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $19,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el 25% de los datos restantes tienen concentraciones de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $33,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, los cuales se registran el día de notificación de la alerta amarilla y un domingo pre-contingencia (18 de marzo de 2018), respectivamente.

Gráfica 1. Concentraciones medias 24 horas de $\text{PM}_{2,5}$ durante la 1^{ra} de medición.



Fuente: el autor.

Para evidenciar el comportamiento del contaminante a nivel personal se seleccionaron dos días específicos, siendo el 23 de marzo de 2018 el día con las concentraciones más altas registradas en este periodo de medición, de igual forma el 29 de marzo de 2018 posee los registros más bajos de este periodo. En la *Tabla 4* se evidencian las medidas estadísticas de posición de los datos diarios de muestreo, donde las concentraciones más altas del 23 de marzo de 2018 se encuentran por encima del cuartil tres, el cual registra concentraciones de $12,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $36,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ correspondiente a un 75% de los datos; el 25% restante tuvo mediciones más altas con un máximo de $53,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el valor mínimo registrado en las 24 horas a nivel personal fue de $9,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en horas de la madrugada. Los valores registrados el 29 de marzo de 2018 corresponde a los niveles más bajos de concentración del contaminante estudiado, con valores extremos de $1,5$ y $6,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una media de $3,68 \mu\text{g}/\text{m}^3$; los niveles de contaminación de este día se desarrollaron en un día festivo en Semana Santa.

Tabla 4. Concentración del contaminante PM_{2.5} en los días extremos

Día de medición (µg/m ³)	Q1	Mediana	Q3	Rango Intercuartil	Valores extremos
Viernes 23 de marzo de 2018	12,4	19,6	36,6	24,2	9,4 ; 53,5
Jueves 29 de marzo de 2018	1,7	2,9	3,8	2,2	1,5 ; 6,9

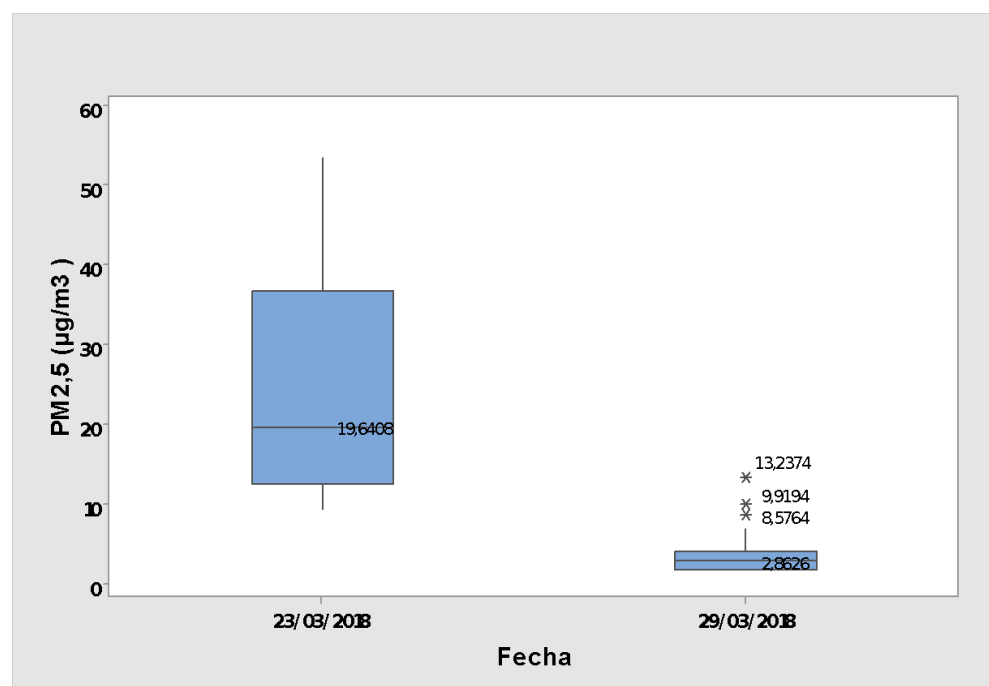
Q1: es el valor para el cual 25% de los valores en el conjunto de datos son menores o iguales a Q1.

Q3: es el valor para el cual 75% de los valores observados son menores o iguales a Q3.

Fuente: el autor.

La dispersión gráfica de los datos se observa en la *Gráfica 2*, donde se identifican valores atípicos atribuidos a las mediciones personales del 29 de marzo de 2018, perteneciente a la semana santa, donde se registraron las concentraciones personales más bajas de PM_{2.5}; los datos de muestreo se ubicaron entre 1,5 µg/m³ a 13,2 µg/m³, con un rango de valores extremos de 1,5 µg/m³ y 6,9 µg/m³, con valores atípicos de 13,2 µg/m³, 9,9 µg/m³ y 8,5 µg/m³ registrados a lo largo de la medición diaria. El 23 de marzo de 2018, no se presentaron valores atípicos, pero si un rango de valores que oscilaron entre 9,4 µg/m³ a 53,5 µg/m³ de PM_{2.5}.

Gráfica 2. Concentraciones de días extremos de la primera sesión de muestreo para PM_{2.5}.



Fuente: el autor.

3.3.2. Caracterización por microambientes de las mediciones de PM_{2.5}

En la *Tabla 5* se especifican las medidas estadísticas asociadas a cada uno de los espacios donde se desarrollaron las actividades cotidianas del participante, los espacios asociados para este estudio fueron interior, exterior y transporte. Para cada uno de estos espacios se

determinaron las concentraciones medias de PM_{2.5} personal, donde se estableció que el espacio con concentraciones más altas fue al interior en el trabajo (media, $\bar{x}=23,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), seguido al interior de la universidad ($\bar{x}=23,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y en tercer lugar en el transporte ($\bar{x}=18,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Mediante el rango intercuartil se evidencia la distribución de los datos de concentraciones, donde el microambiente laboral obtuvo un valor de IQR=13,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, universidad un IQR=13,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y transporte un IQR=6,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, estos valores corresponden a la distancia entre el primer cuartil (Q1) y el tercer cuartil (Q3), es decir, que el 50% de los datos está dentro de este rango.

Se calculó el porcentaje de exposición personal en los diferentes microambientes con base en las mediciones de las estaciones de la RMCAB. Para las actividades diarias realizadas en casa, trabajo y universidad se calculó un porcentaje de exposición promedio de 44,2%, 85,4% y 72,6% respectivamente, en relación a lo registrado por las estaciones para cada actividad; el porcentaje de exposición para trabajo y universidad fue más alto debido a que las mediciones promedio tanto de la estación, como del equipo portátil, no poseen mucha variación entre las dos, siendo la media de la estación para trabajo de 26,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y para universidad de 34,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las mediciones en exteriores (aire libre) y transporte exhibieron un porcentaje de exposición de 93,4% y 66,5% respectivamente; el porcentaje al aire libre representó cerca de la totalidad de exposición registrada debido a que la estación y el monitoreo personal obtuvieron medias similares (17,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 17,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

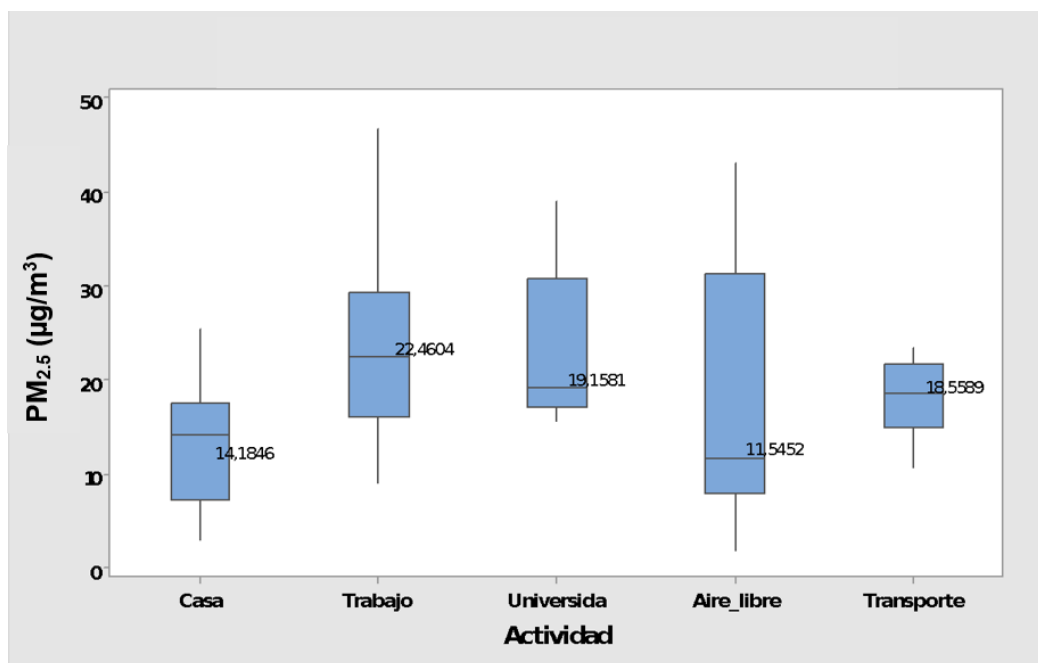
Tabla 5. Distribución de las concentraciones de PM_{2.5} por microambiente.

Actividad	$\mu\text{g}/\text{m}^3$				
	Q1	Mediana	Q3	Rango intercuartil	Valores extremos
En interior, casa	7,1	14,2	17,4	10,3	2,8 ; 25,3
En interior, trabajo	16	22,5	29,2	13,2	8,9 ; 46,7
En interior, universidad	17	19,1	30,6	13,6	15,6 ; 39,0
Aire libre	7,9	11,5	31,3	23,4	1,7 ; 43,0
Transporte	14,9	18,5	21,7	6,8	10,6 ; 23,2

Fuente: el autor.

Se identifica entonces que los espacios con un rango más amplio de datos no son necesariamente los que poseen concentraciones medias más elevadas, ya que se evidencia que al aire libre y en el trabajo el participante tuvo una exposición más variable con un rango de concentraciones más disperso a diferencia de los demás (*Gráfica 3*). De igual forma, mediante la elaboración del diagrama de caja (Box-Plot) no se identifica registro de concentraciones con valores atípico en ninguno de los microambientes categorizados en el estudio.

Gráfica 3. Distribución gráfica de las concentraciones de PM_{2.5} por microambiente.



Fuente: el autor.

Las estaciones de la RMCAB asociadas a este estudio fueron seleccionadas con relación a la proximidad del desarrollo de las actividades diarias, para evidenciar cómo las mediciones ambientales se relacionaban con lo registrado en la exposición personal, por esta razón a lo largo de cada día de medición se identificaron cuatro estaciones estratégicas (Figura.1), siendo la estación ubicada en Suba la que posee registros diarios completos, tanto para la estación, como para el monitoreo con el Airbeam, debido a que no se presentaron desplazamientos a otras localidades, contando así con un registro de 24 horas. Con estos datos se determinó el porcentaje de exposición personal para la localidad de Suba, obteniendo como resultado un 77,2% de la concentración registrada por la estación, donde la media del equipo portátil fue de 21,2 µg/m³ mientras que la de la estación fue de 30,9 µg/m³. Los datos obtenidos por la estación de Suba registraron una concentración máxima de 56 µg/m³, mientras que el equipo portátil registró un valor de 63,9 µg/m³.

3.3.3. Caracterización de síntomas identificados

En la *Tabla 6* se presentan los síntomas desarrollados a lo largo del primer periodo de medición; se calcularon las concentraciones de exposición personal a PM_{2.5} a 10, 20 y 30 minutos previos a la manifestación del síntoma; dando como resultado que el dolor de cabeza (número de datos, n=9) fue el más recurrente, adicionalmente el participante registro tos, irritación ocular y de garganta una vez a lo largo de la medición. La media de las concentraciones personales de PM_{2.5} para 10, 20 y 30 minutos fueron 21,9 µg/m³, 22,7 µg/m³ y 23 µg/m³ respectivamente, con una media general de 22,5 µg/m³; la manifestación

de dolor de cabeza en gran medida se presentaba sobre el medio día a lo largo de la medición, registrando más casos en la semana del 20 a 23 de marzo de 2018.

Los principales síntomas respiratorios asociados con la exposición a contaminantes en el aire, son en gran medida y frecuencia la tos, expectoración o flema, dolor de pecho, ahogo o dificultad para respirar, mocos por la nariz, ojos rojos o con rasquiña y dolor de cabeza [23]. Por tal razón los síntomas presentados en este estudio pueden ser o no atribuidos a una exposición en un lapso, pero de igual forma el desarrollo de síntomas como el dolor de cabeza, puede presentarse por un factor externo al que ha estado sometido el participante a lo largo del muestreo; estudios previos asocian las concentraciones de $PM_{2.5}$ con enfermedades de tipo respiratorio, sin embargo el dolor de cabeza fue asociado a la mezcla de diferentes contaminantes dentro de los cuales está el Monóxido de Carbono, como uno de los principales [38]; otros estudios afirman que los efectos en la salud de los contaminantes del aire varían ampliamente dependiendo de la edad y condición médica de los expuestos. Los efectos agudos pueden incluir fatiga, dolor de cabeza, mareos, dolor de garganta, irritación de ojos y nariz, asma y ansiedad [39].

Tabla 6. Lapso atribuido a la presencia de síntomas

T=10 min ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	T=20 min ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	T=30 min ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tos	Irritación Ocular	Dolor de cabeza	Irritación garganta
19,31	19,26	19,08				
26,30	33,38	41,11				
13,50	18,04	24,51				
18,08	18,45	18,28				
33,11	43,27	35,33				
11,68	11,57	12,55				
46,61	29,00	22,46				
21,85	23,35	24,88				
12,91	11,80	11,18				
17,18	17,27	17,23				
20,88	24,30	26,49				

Fuente: el autor.

3.4. Caracterización de la exposición personal a $PM_{2.5}$ en la 2^{da} sesión de muestreo

El segundo muestreo se desarrolló del 12 al 25 de mayo de 2018, en semanas cotidianas para la comunidad capitalina. A lo largo del periodo de medición no se presentaron alertas sobre la calidad del aire de Bogotá, por lo cual se considera que las mediciones atribuidas a este periodo son los estándares de concentraciones diarias a la que está expuesto una persona cotidianamente.

3.4.1. Caracterización general de las mediciones de PM_{2.5}

En la *Tabla 7* se observan los datos de exposición personal, ambiental, además del porcentaje de exposición registrada en el segundo periodo de monitoreo de PM_{2.5}; la exposición personal promedio a la que estuvo expuesto el participante fue de 9,62 µg/m³, con registros de máxima concentración de 17,94 µg/m³ para el 12 de mayo de 2018 y un mínimo de 5,09 µg/m³ para el 20 de mayo de 2018; en la RMCAB se presentaron concentraciones promedio de 14,33 µg/m³, con un valor máximo de 21,10 µg/m³ para el 18 de mayo de 2018 y un mínimo de 8,54 µg/m³ el 13 de mayo de 2018. Los datos reportados por el equipo de monitoreo Airbeam registraron una distribución en las concentraciones, donde el 75% de los datos se encuentran dentro del rango entre 6,8 µg/m³ a 12,3 µg/m³. El porcentaje de exposición en el segundo muestreo fue de 73,3%, es decir, que para un promedio de concentración ambiental de 14,33 µg/m³ de PM_{2.5}, la exposición personal fue de 10,5 µg/m³. Teniendo en cuenta la normativa colombiana para calidad del aire establecida en la Resolución 2254 de 2017 y lo sugerido en las guías de calidad del aire y salud de la OMS, las mediciones de 24 horas no sobrepasan los valores, ya que se mantienen bajo el máximo permisible de 25 µg/m³ y 50 µg/m³ respectivamente.

Tabla 7. Descripción de las concentraciones de PM_{2.5} medidas por el Airbeam y RMCAB para la 2^{da} sesión de muestreo.

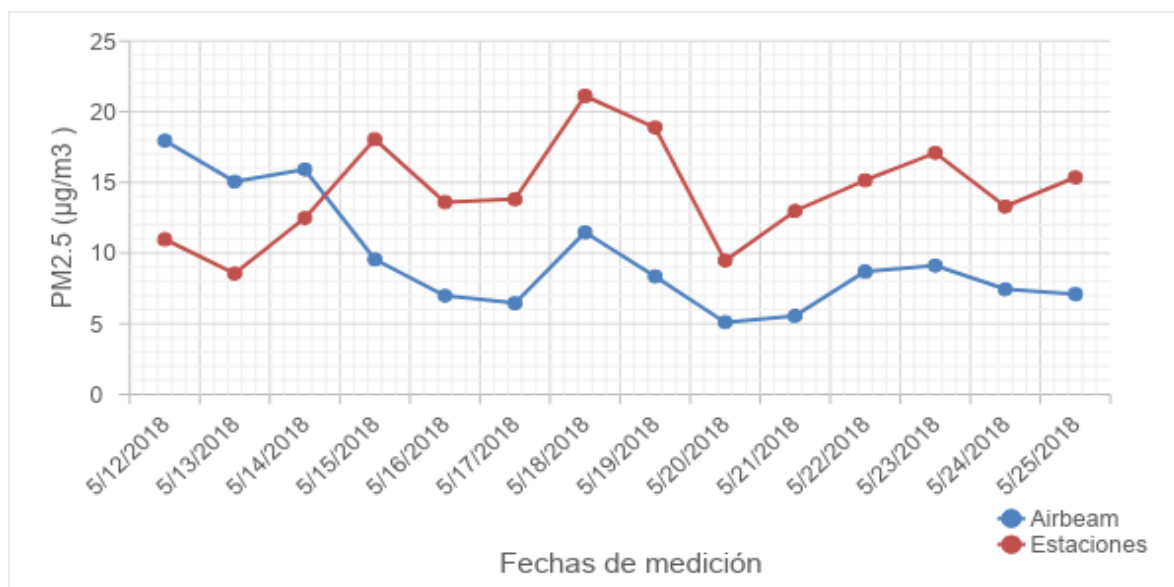
Contaminante	Media	S	Min.	Mediana	Max.
Personal PM _{2.5} (µg/m ³)	9,62	4,01	5,09	8,52	17,94
Ambiente PM _{2.5} (µg/m ³)	14,33	3,56	8,54	13,70	21,10
Porcentaje de exposición (%)	73,3	45,9	42,8	53,6	176,1

S: desviación estándar

Fuente: el autor.

El comportamiento en las concentraciones de PM_{2.5} a nivel ambiente y personal se evidencia en la *Gráfica 4*, donde la media de la exposición personal fue de 9,6 µg/m³ (IC95%: 7,3 -11,9 µg/m³) y la media de concentraciones ambientales fue de 14,3 µg/m³. El comportamiento de los datos en relación con los registrados con la RMCAB, evidencia una distribución uniforme en relación a ambas mediciones, a excepción de los tres primeros días de muestreo, donde las concentraciones de exposición personal sobrepasan lo registrado por las estaciones; las concentraciones medias personales asociadas a estos días oscilan entre 15,04 a 17,9 µg/m³, mientras que a nivel ambiente están entre 8,5 a 12,4 µg/m³. La máxima exposición ambiental que se registró en las estaciones de monitoreo por 24 horas fue de 21,1 µg/m³, registrada el día 18 de mayo de 2018, mientras que la concentración media de exposición personal de PM_{2.5} fue de 11,4 µg/m³, siendo esta una de las más altas. A diferencia del primer muestreo, en los datos registrados por las estaciones y por el Airbeam, ninguno superó lo reglamentado por la legislación colombiana ni la guía internacional de OMS. Los datos registrados por el equipo portátil se ubicaron entre los 5,1 a 18,0 µg/m³ y con una mediana de 8,5 µg/m³.

Gráfica 4. Concentraciones medias 24 horas de PM_{2.5} durante la 2^{da} de medición.



Fuente: el autor.

En la *Tabla 8* se evidencian los picos de concentraciones a nivel personal de PM_{2.5}, siendo los días 12 y 14 de mayo de 2018 los que registraron niveles del contaminante por arriba de lo registrado en la RMCAB; el promedio de la concentración 24 horas para cada uno de estos días fue de 17,9 µg/m³ y 15,9 µg/m³ a nivel personal respectivamente, mientras que el registro obtenido por SDA fue de 10,9 µg/m³ y 12,4 µg/m³ para los mismos días. El comportamiento del contaminante a lo largo de estos dos días, establece que el 14 de mayo de 2018 cerca de un 25% de los datos registrados por el equipo portátil poseen concentraciones de PM_{2.5} superiores a 8,1 µg/m³, registrando dos valores atípicos a lo largo del día de medición siendo 27,4 µg/m³ y 56,4 µg/m³, los cuales se localizaron en el horario de 17:00 a 18:00, horas donde según el diario de campo se desarrollaban actividades al aire libre. El 12 de mayo de 2018 registró concentraciones mayores o iguales a 14,6 µg/m³, estableciendo que hay presencia de concentraciones con valores atípicos de 34,5 µg/m³ y 88,7 µg/m³, los cuales se registraron desde las 12:00 hasta 13:00 horas, donde se desarrollaban actividades al aire libre, igual a lo presentado el 14 de mayo.

Adicionalmente se identificaron los días con valores extremos, donde las concentraciones personales no sobrepasaron las ambientales; para evidenciar el comportamiento de PM_{2.5} se seleccionaron dos días relevantes para las mediciones, siendo el 18 y el 20 de mayo de 2018. En la *Tabla 8* y *Grafica 5* se evidencian las medidas estadísticas de posición de los datos diarios de medición, donde el día 18 de mayo se obtuvo la concentración más elevada con un valor de 11,4 µg/m³ de PM_{2.5}, con un Q3 equivalente a 19,5 µg/m³, además de un valor extremo de 23,0 µg/m³.

Tabla 8. Concentraciones de PM_{2.5} en los días con valores extremos

Día de medición	Q1	Mediana	Q3	Rango Intercuartil	Valores extremos
Sábado 12 de mayo de 2018	2,8	4,7	8,1	5,3	1,4 ; 9,9
Lunes 14 de mayo de 2018	2,5	6,9	14,6	12,1	1,3 ; 17,3
Viernes 18 de mayo de 2018	4,5	8,7	19,5	15,0	2,6 ; 23,0
Domingo 20 de mayo de 2018	1,9	2,1	4,3	2,5	1,3; 4,8

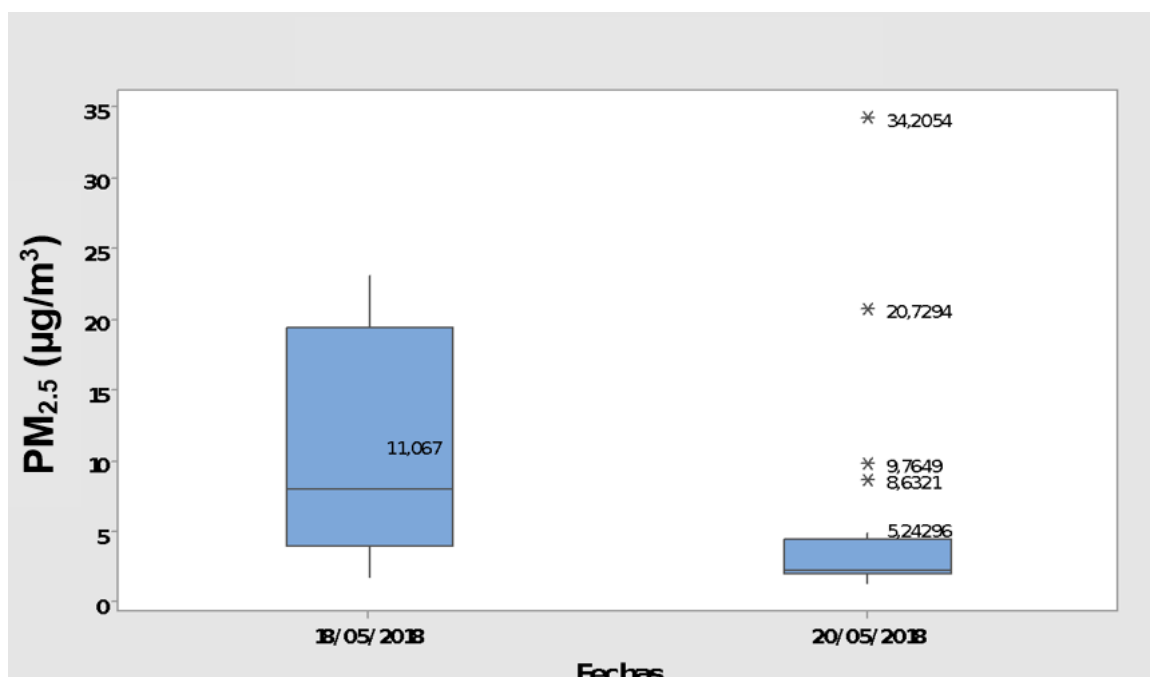
Q1: es el valor para el cual 25% de los valores en el conjunto de datos son menores o iguales a Q1.

Q3: es el valor para el cual 75% de los valores observados son menores o iguales a Q3.

Fuente: el autor.

En la *Gráfica 5*, se identifican los valores atípicos; el 20 de mayo de 2018 se registraron concentraciones que se ubicaron entre los 8,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 34,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (valores extremos: 1,3 – 4,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), teniendo en cuenta que posee los registros de concentración más bajos, se evidencia valores atípicos asociados a la medición de 24 horas del mismo día; el 18 de mayo de 2018 no registró valores extremos, observando un rango de concentraciones de 2,6 a 23,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los valores extremos del día 20 de mayo de 2018 se atribuyen según el diario de campo al desplazamiento en transporte público (Transmilenio), siendo esta actividad realizada sobre las 12 del día. Mediante lo instaurado por la ley colombiana y la OMS, ninguno de estos días sobrepasa el máximo permisible de 24 horas.

Gráfica 5. Mediciones de los días extremos de la segunda sesión de muestreo para PM_{2.5}



Fuente: el autor.

3.4.2. Caracterización por microambientes de las mediciones de PM_{2.5}

En la *Tabla 9* se especifican las medidas estadísticas asociadas a cada una de las actividades identificadas a lo largo del estudio, para cada una se determinó la media siendo las más altas aire libre, transporte y universidad. La media al aire libre fue de 21,9 µg/m³ con un mínimo y máximo de 9,7 µg/m³ y 41,7 µg/m³, siendo la actividad con las mediciones más altas, seguida del transporte donde se determinó una media 14,1 µg/m³ con valores extremos de 9,1 µg/m³ a 20,8 µg/m³.

En cuanto al porcentaje de exposición tomando como base la RMCAB, las actividades desarrolladas al aire libre y en el transporte poseen un porcentaje de exposición de 134,4% y 193,2%, ya que los valores registrados por el Airbeam sobrepasan los de la RMCAB, con valores medios para aire libre de 11,3 µg/m³ en la estación y 21,9 µg/m³ en el equipo portátil; de igual forma en el transporte se presentan concentraciones medias de 14,1 µg/m³ y 10,5 µg/m³, respectivamente. Las mediciones en el interior para estudio, trabajo y casa obtuvieron un porcentaje de exposición de 45,1%, 76,1% y 66,3% respectivamente.

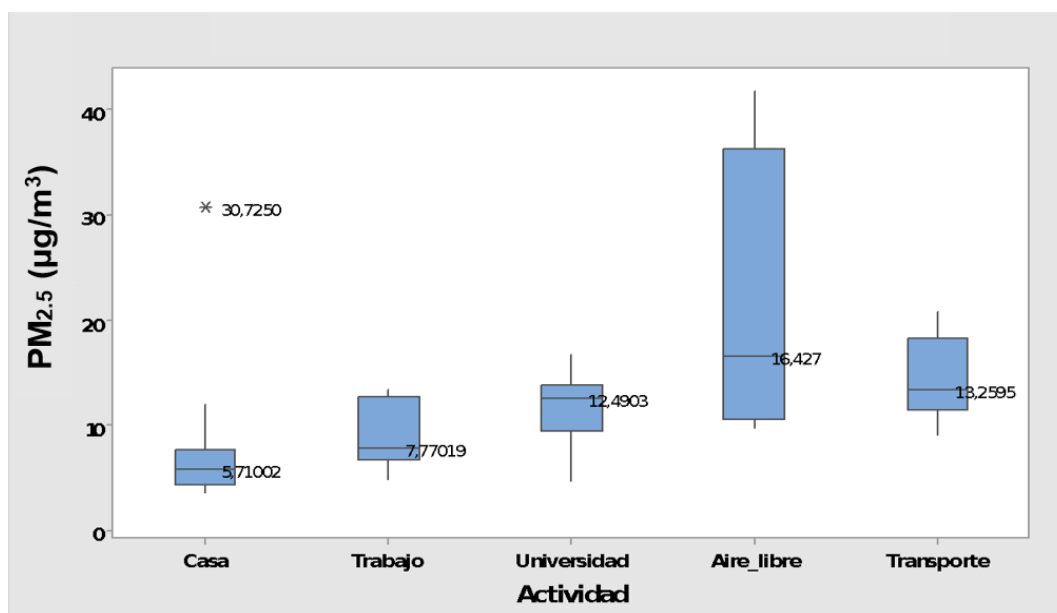
Tabla 9. Distribución de las concentraciones de PM_{2.5} por actividad.

Actividad	µg/m ³					
	Media	Q1	Mediana	Q3	Rango intercuartil	Valores extremos
En interior, casa	7,9	4,3	5,7	7,6	3,3	3,6 ; 12,0
En interior, trabajo	9,1	6,7	7,8	12,7	6	4,8 ; 13,3
En interior, universidad	11,9	9,3	12,5	13,7	4,4	4,6 ; 16,6
Transporte	14,1	11,4	13,3	18,1	6,7	9,1 ; 20,8
Aire libre	21,9	10,5	16,4	36,2	25,7	9,7 ; 41,7

Fuente: el autor.

En la Gráfica 6 se evidencia el comportamiento de las concentraciones; para la actividad desarrollada en interiores se encontró un valor atípico de 30,7 µg/m³ con una media de 7,9 µg/m³; de igual forma, la actividad de transporte registró el 25% de concentraciones por encima de 18,1 µg/m³ (valores extremos: 9,7 – 20,8 µg/m³). Las actividades al aire libre poseen un rango entre 9,7 a 41,7 µg/m³, lo cual se puede atribuir al flujo vehicular, ya que más de 1.2 millones de vehículos circulan en Bogotá, representando la principal fuente de emisión atmosférica (70%), dando paso a uno de los problemas más grandes de salud ambiental en Colombia [40, 41].

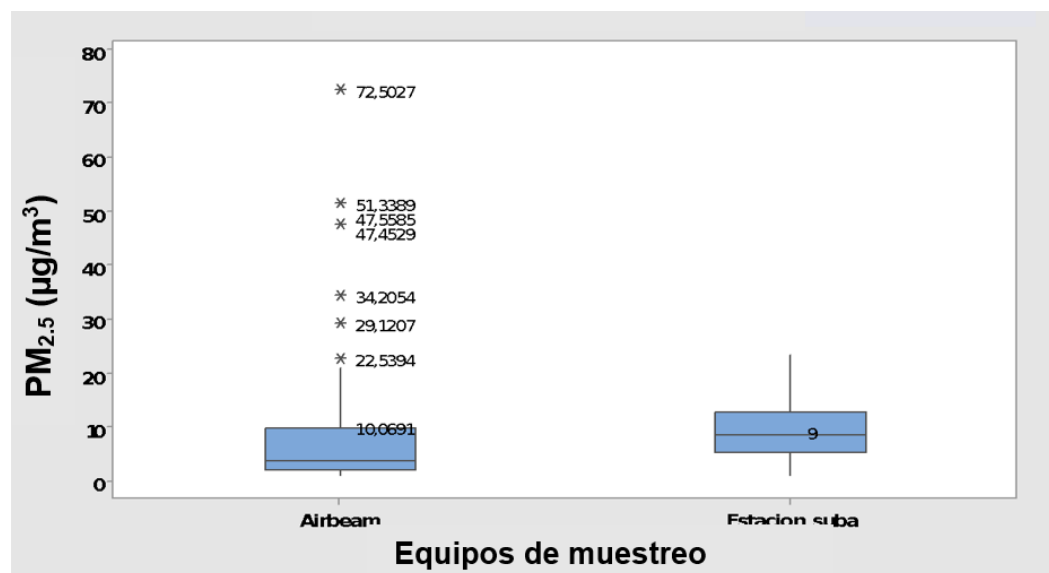
Gráfica 6. Distribución gráfica de los datos de monitoreo PM_{2.5} por actividad.



Fuente: el autor.

El porcentaje de exposición en base a la RMCAB calculada para el segundo monitoreo fue de 112,2% de la concentración registrada por la estación, la media del equipo portátil fue de 10,1 µg/m³, mientras que la de la estación fue de 9,0 µg/m³. Los datos obtenidos por la estación de Suba registran una concentración máxima de 23,0 µg/m³, mientras que el equipo portátil registró valores extremos de hasta 72,5 µg/m³ (Gráfica 7).

Gráfica 7. Distribución gráfica de las concentraciones de PM_{2.5} para la estación de suba.



Fuente: el autor.

3.4.3. Caracterización de síntomas identificados

En la *Tabla 10* se presentan los síntomas desarrollados durante la medición de exposición personal, donde el dolor de cabeza ($n=4$) fue el más recurrente; adicionalmente el participante registro tos, irritación ocular y de garganta una vez a lo largo de la medición. Los síntomas identificados a lo largo de la medición no se les pueden atribuir como causalidad las concentraciones de $PM_{2.5}$, ya que existen factores externos que pueden influir en el desarrollo de los síntomas; la media de los datos de exposición personal fue de $24,5 \mu g/m^3$; los valores registrados por el equipo permiten establecer que el Q3 fue igual a $41,1 \mu g/m^3$, es decir que el 25% restante de los datos registraron valores que llegaron hasta los $61,6 \mu g/m^3$. En relación a los síntomas del segundo periodo de muestreo se evidenció una reducción en el más persistente (dolor de cabeza) pasando de 9 a 4 manifestaciones del síntoma; en 3 de los 4 casos registrados del síntoma se estuvo realizando desplazamiento en transporte por la ciudad. Por esta razón se ratifica que el desarrollo de los síntomas a lo largo del estudio no es causado por las concentraciones de $PM_{2.5}$, ya que el participante está sujeto a factores externos que permitan el desarrollo y manifestación del síntoma.

Tabla 10. Lapso atribuido a la presencia de síntomas.

T=10 min ($\mu g/m^3$)	T=20 min ($\mu g/m^3$)	T=30 min ($\mu g/m^3$)	Tos	Irritación Ocular	Dolor de cabeza	Irritación de garganta
61,60	52,93	47,06				
43,95	38,34	45,30				
18,16	22,46	38,21				
8,12	9,32	9,01				
19,32	18,91	18,46				
14,86	14,75	14,62				
6,26	6,73	5,99				

Fuente: el autor.

4. DISCUSIÓN

El presente estudio analizó la relación entre las diferentes actividades diarias en la ciudad de Bogotá y la exposición personal a $PM_{2.5}$. Dentro de los resultados el participante de estudio tuvo una distribución de tiempo, donde el 6,2% fue al aire libre y el 84,1% en interiores, siendo congruente con lo presentado en otros estudios, donde se evidencia que el mayor porcentaje de tiempo se pasa en interiores [9, 42]; Bogotá es la ciudad de Latinoamérica donde las personas dedican más tiempo en sus trayectos de viaje, con un promedio diario de 97 minutos en el uso de transporte público, donde el 32% de los usuarios viajan más de 2 horas en el transporte público diariamente [43] para un porcentaje diario de tiempo de 8,33%, siendo similar al obtenido en este estudio que fue de 9,2%.

Las variables meteorológicas como la humedad relativa y la temperatura han sido estudiadas en relación al comportamiento de contaminantes atmosféricos; en Japón se ha

establecido que existen tres factores que tienen un efecto importante en la concentración de masa de $PM_{2.5}$: fuentes de emisión de contaminantes nacionales, fuentes externas fuera del país y las condiciones meteorológicas, con resultados de correlación negativa entre temperatura y $PM_{2.5}$ [32], y positiva entre la humedad y $PM_{2.5}$ [33]. En las regiones costeras de Colombia se han desarrollado estudios en función de las variables meteorológicas y PM_{10} , destacando la dirección del viento como un factor clave para las concentraciones del contaminante [44]. El comportamiento de las variables meteorológicas (HR y temperatura) con respecto a partículas evidenciados en estos trabajos, es congruente con los resultados del presente estudio, estableciendo que el comportamiento de estas dos variables meteorológicas es inversamente proporcional, debido a que la concentración de la humedad por volumen es mayor o menor en función de la temperatura, teniendo una correlación negativa la temperatura con las concentraciones de $PM_{2.5}$, ya que se registró un mínimo de temperatura de 24,9°C y un máximo de HR 51,6%, que generó una disminución en las concentraciones de $PM_{2.5}$.

Estudios realizados en países como India se han orientado a la exposición personal de $PM_{2.5}$, ya que dependen económicamente de los sectores de manufactura y textil. El estudio evidenció concentraciones promedio de exposición personal de 39,3 $\mu g/m^3$ [42] y para interiores una media de 112,8 $\mu g/m^3$ siendo siempre 2.5 veces mayor a la concentración ambiental [45], comparado con los estándares de la OMS [37]. Las concentraciones anuales excedieron 14 veces el $PM_{2.5}$; las metodologías aplicadas para el desarrollo de estos estudios establecen sesiones de 24 horas no consecutivas con un monitor de $PM_{2.5}$, las cuales incluyeron días de la semana y fines de semana; los horarios de inicio se planificaron para evitar la interrupción de las actividades habituales de los participantes, los cuales fueron seleccionados de forma aleatoria. Otros estudios toman los datos de concentración de $PM_{2.5}$ a través de mediciones ambientales, siendo utilizadas como un sustituto de la exposición personal al contaminante [46]. En relación con los resultados de este estudio se evidencia una diferencia significativa, ya que los promedios de exposición personal muestreados en Bogotá varían desde 9,62 a 16,11 $\mu g/m^3$. Estudios en España registran medianas al aire libre de 15,2 $\mu g/m^3$, interior de 11,4 $\mu g/m^3$ y personal de 19,4 $\mu g/m^3$ [47], siendo similares a lo encontrado en este trabajo, con medianas al aire libre de 15,1 $\mu g/m^3$, al interior de 18,6 $\mu g/m^3$ y personal de 12,5 $\mu g/m^3$.

Para la exposición personal a $PM_{2.5}$ en el transporte, priorizando el uso TransMilenio, un estudio encontró una exposición media diaria de 18,56 $\mu g/m^3$ [48], siendo congruente con lo encontrado en este trabajo, donde se encontró una media de exposición de 14,1 $\mu g/m^3$ (valores extremos: 9,1 y 20,8 $\mu g/m^3$). Otro estudio registró exposiciones 6 veces más altas en los autobuses públicos que para los peatones y 10 veces el nivel de fondo [21].

En cuanto a los síntomas relacionados a los niveles de contaminación por $PM_{2.5}$, se ubicaron estudios que evidenciaban el riesgo atribuible a la exposición a la contaminación del aire en la población, encontrando que dicha proporción fluctuó de acuerdo con los síntomas entre 37% para las sibilancias nocturnas (IC95%: 26-47,8 %) y 10,6% para la tos (IC95%: 6,3-15 %) [23]. En China se evidenciaron afectaciones a corto plazo como lo son la bronquitis aguda, ataques de asma y hospitalización [49], mientras en Japón, un análisis

multivariado mostró que $PM_{2.5}$ fue un predictor significativo del número de visitas ambulatorias (odds ratio = 9,05, $p = 0,0463$) [50] y en Corea, para un $PM_{2.5}$ interior promedio de $8,7 \mu g/m^3$ el odds ratio fue 1.18 (95% CI 0.89-1.58) para la tos y 1.07 para sibilancias [51]. En India asociaron las concentraciones del contaminante mediante la implementación de encuestas, los síntomas más frecuentes fueron cefalea (60% en casas urbanas), irritación de la nariz y ojos (45% casas urbanas) [52], siendo este último congruente con los resultados asociados a los síntomas del presente trabajo, ya que el síntoma más persistente fue el dolor de cabeza representando el 72% de los síntomas desarrollados, seguido de tos e irritación ocular por el participante. Los estudios epidemiológicos realizados a nivel mundial han demostrado que la exposición a contaminantes ambientales denominados partículas, es una de las principales causas de efectos sobre la salud [53], a corto plazo como alteraciones cardiovasculares y morbilidad y mortalidad cardiopulmonar [54, 55]; en China se han obtenidos conclusiones similares con respecto a los efectos adversos que se desarrollan sobre la salud del individuo, ya sea a una exposición a corto o largo plazo a material particulado [56, 57]. Es importante aclarar que los datos obtenidos en el seguimiento no permiten verificar una relación causal, sin embargo, como se observó con respecto al dolor de cabeza [53], los síntomas registrados podrían tener una relación, por lo cual realizar un estudio más robusto permitiría evidenciar el efecto de la exposición.

Para la determinación del porcentaje de exposición no se encontraron estudios previos que aborden esta temática específicamente. En Estados Unidos de América, se desarrolló un estudio para determinar la fracción de ingesta de autocontaminación de un vehículo, encontrando que la masa total del escape de un autobús inhalado por los estudiantes que viajan en este, es comparable en magnitud a la masa total de ese autobús, siendo aproximadamente una exposición de 34% a 70% más alta [58]. Teniendo como referencia esto, el presente trabajo registró como porcentaje de exposición promedio 73,3%; el porcentaje de exposición atribuida a las actividades desarrolladas al aire libre y en el transporte fue de 187,1% y 193,2%, ya que los valores registrados por el Airbeam sobrepasan los de la RMCAB, excediendo en gran medida el porcentaje de exposición tomada por el estudio anterior.

En conclusión, el mayor nivel de exposición personal a $PM_{2.5}$ registrado en este estudio fue de $16,11 \mu g/m^3$ (max: $33,6 \mu g/m^3$ y min: $3,69 \mu g/m^3$), el cual se dio en la semana de contingencia registrada por la SDA; el segundo periodo corresponde a una semana ordinaria registrando una exposición de $9,62 \mu g/m^3$ (max: $17,94 \mu g/m^3$ y min: $5,09 \mu g/m^3$), evidenciando que el porcentaje de exposición es mayor en la segunda medición (Tabla 7); para el desarrollo de las actividades realizadas por el participante se evidenció que las concentraciones más altas en condiciones normales se registraron en el exterior, siendo el principal al aire libre con un media de $16,4 \mu g/m^3$; es importante señalar, que los valores registrados en este trabajo están sujetos a variaciones con base a las relaciones personales/ambientales, para individuos con diferentes ocupaciones [9, 8].

Se observó que las concentraciones de los contaminantes en el periodo de estudio cumplen con las directrices de la OMS y la Resolución 2257 de 2017 de Colombia [36, 37], donde el índice Bogotano de calidad de aire (IBOCA) lo ubica en una calidad del aire moderada y

regular [59], teniendo en cuenta las mediciones realizadas durante el periodo de contingencia donde se registraron máximos de $40,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y una media de $27,45 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Dentro de las limitaciones de este estudio se incluye que la identificación de síntomas no fue correlacionada por signos clínicos como el ritmo cardiaco entre otros, como se ha realizado en otros estudios [60], lo que puede generar un sesgo en la identificación y desarrollo de los síntomas a lo largo del estudio; de igual forma, las mediciones fueron realizadas por el mismo participante lo cual puede generar un error en el análisis del estudio. No obstante, el participante registró el espacio y tiempo durante los dos periodos, para así identificar las concentraciones previas a la manifestación del síntoma. Como fortalezas se determinaron las concentraciones personales de $\text{PM}_{2.5}$, de igual forma, se examinaron las correlaciones entre las concentraciones ambientales y personales en el mismo periodo de tiempo, identificando el porcentaje de exposición para cada una de las actividades desarrolladas y la general para cada muestreo. Además, se utilizó un equipo de monitoreo portátil, que permitió el muestreo durante las 24 horas del día, sin generar sesgos por mediciones faltantes en la base de datos.

Los resultados de esta investigación se orientaron al desarrollo de actividades de un individuo en específico en un espacio y momento determinado, mediante lo cual se ofrece nueva información sobre la exposición personal a $\text{PM}_{2.5}$ a la que está expuesto un ciudadano bogotano, a lo largo del desarrollo de las actividades cotidianas durante el día; este estudio puede ser un avance en investigación para la para el sector ambiental y de salud de la capital bogotana; de igual forma, se recomienda un estudio que involucre a más individuos, para así permitir la toma de decisiones sobre la calidad de aire en la ciudad, identificando escenarios que puedan ser intervenidos para minimizar las condiciones de exposición de la población, retomando así los lineamientos de promoción y prevención del plan decenal de salud pública y la política integral de salud ambiental. El porcentaje de exposición a $\text{PM}_{2.5}$ con base a la RMCAB, permite evidenciar la importancia del Sistema de Alertas Tempranas Ambientales de Bogotá (SATAB) en su componente aire [61].

REFERENCIAS

- [1] J. Mackenzie, Natural Resources Defense Council (NRDC), 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.nrdc.org/stories/air-pollution-everything-you-need-know>.
- [2] P. Torres *et al*, "Air pollution: A public health approach for Portugal", *Science of The Total Environment*, vol.643, pp. 1041-1053, 2018.
- [3] C. A. ARCINIEGAS SUÁREZ, "DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO: PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES Y FRACCIÓN RESPIRABLE PM₁₀", *Luna Azul*, nº 34, 2012.
- [4] Agencia de protección de los Estados Unidos (EPA), What is PM?, [En línea]. Estados Unidos, 2016. Disponible en: <https://www3.epa.gov/region1/airquality/pm-what-is.html>.
- [5] W. Gene Tucker, "An overview of PM_{2.5} sources and control strategies", *Fuel Processing Technology*, Vols. 65-66, pp. 379-392, 2000.
- [6] H. Pérez, M. Lunagomez y L. Acosta, "ANÁLISIS DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES (PST) Y PARTÍCULAS FRACCIÓN RESPIRABLE (PM₁₀), EN CUNDUACÁN, TABASCO", *Universidad y Ciencia TrópicoHúmedo*, vol. 26, nº 2, 2008.
- [7] L. Soogil, "Personal exposures to PM_{2.5} and their relationships with microenvironmental concentrations", *Atmospheric Environment*, vol. 47, pp. 407-412, 2012.
- [8] Y. Hwang y K. Lee, "Contribution of microenvironments to personal exposures to PM₁₀ and PM_{2.5} in summer and Winter", *Atmospheric Environment*, vol. 175, pp. 192-198, 2018.
- [9] Z. Fan *et al*, "Personal exposure to fine particles (PM_{2.5}) and respiratory inflammation of common residents in Hong Kong", *Environmental Research*, vol. 164, pp. 24-31, 2018.
- [10] C. Cappelli, P. D'Urso y F. Di Iorio, "Regime change analysis of interval-valued time series with an application to PM₁₀", *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 146, pp. 337-346, 2015.
- [11] E. Ignottiet *al*, "Impact on human health of particulate matter emitted from burnings in the Brazilian Amazon región", *SaúdePública*, vol. 44, nº 1, 2010.
- [12] F. F. García, R. Agudelo y K. Jimenez, "Spatial and temporal distribution of concentrations of particulate material in Santa Marta, Colombia", *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, vol. 24, nº 2, pp. 73-82, 2006.
- [13] M. L. Bell y K. Ebisu, "Environmental Inequality in Exposures to Airborne Particulate Matter Components in the United States", *Environmental Health Perspectives*, vol. 120, nº 12, pp. 1699-1704, 2012.

- [14] R. Nedbor-Gross, B. Henderson, M. P. Perez y J. Pachon, "Air quality modeling in Bogotá, Colombia using local emissions and natural mitigation factor adjustment for re-suspended particulate matter", *Atmospheric Pollution Research*, vol. 9, nº 1, pp. 95-104, 2017.
- [15] K.-H. Kim, E. Kabir y S. Kabir, "A review on the human health impact of airborne particulate matter", *Environment International*, vol. 74, pp. 136-143, 2015.
- [16] B. Brunekreef y S. Holgate, "Air pollution and health", *THE LANCET*, vol. 360, pp. 1233-1242, 2002.
- [17] R. Beelen *et al*, "Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE Project", *The Lancet*, vol. 383, nº 9919, pp. 785-795, 2014.
- [18] T. Cole-Hunter *et al*, "Estimated effects of air pollution and space-time-activity on cardiopulmonary outcomes in healthy adults: A repeated measures study", *Environment International*, vol. 111, p. 247–259, 2018.
- [19] O. Fajardo y N. Rojas, "Particulate matter exposure of bicycle path users in a high-altitude city", *Atmospheric Environment*, vol. 46, pp. 675-679, 2012.
- [20] J. A. Estevez, N. Y. Rojas y A. I. Rodriguez, "Occupational exposure to air pollutants: particulate matter and respiratory symptoms affecting traffic-police in Bogotá", *Revista de Salud Pública*, vol. 15, nº 6, p. 889, 2013.
- [21] R. Morales *et al*, "Exposure to fine particulate, black carbon, and particle number concentration in transportation microenvironments", *Atmospheric Environment*, vol. 157, pp. 135-145, 2017.
- [22] A. Rodríguez *et al*, "EFECTO DEL MATERIAL PARTICULADO PM10 SOBRE SÍNTOMAS RESPIRATORIOS Y LOS NIVELES DE METABOLITOS DE LOS HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS PIRENO Y BENZO(A)PIRENO EN UNA POBLACIÓN EXPUESTA A CONTAMINACIÓN AMBIENTAL. BOGOTÁ 2008 – 2009", Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2010.
- [23] R. Sarmiento, L. J. Hernández, E. Medina, N. Rodríguez y J. Reyes, "Síntomas respiratorios asociados con la exposición a la contaminación del aire en cinco localidades de Bogotá, 2008-2011, estudio en una cohorte dinámica", *Biomédica*, vol. 35, 2015.
- [24] C. Adams, P. Riggs y J. Volckens, "Development of a method for personal, spatiotemporal exposure assessment", *Journal of Environmental Monitoring*, vol. 7, 2009.
- [25] Air Casting [En línea]. Disponible en: <http://aircasting.org/>.

- [26] A. McCreddin, M. Alam y A. McNabola, "Modelling personal exposure to particulate air pollution: An assessment of time-integrated activity modelling, Monte Carlo simulation & artificial neural network approaches", *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 218, nº 1, pp. 107-116, 2015.
- [27] A. Karanasiou, M. Viana, X. Querol, T. Moreno y F. de Leeuw, "Assessment of personal exposure to particulate air pollution during commuting in European cities—Recommendations and policy implications", *Science of The Total Environment*, vol. 490, pp. 785-797, 2014.
- [28] Secretaria Distrital de Ambiente, "Estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire en Bogotá", SDA, Bogotá, 2013.
- [29] M. Braniš, P. Řezáčová y M. Domasová, "The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM10, PM2.5, and PM1 in a classroom", *Environmental Research*, vol. 99, nº 2, pp. 143-149, 2005.
- [30] R. Pedroza, L. Hernández y R. Rojas, "Asociación entre la exposición a PM10 y PM2.5 y síntomas respiratorios en una población escolar del municipio de Ecatepec, Estado de México", Artículo Publicable, México, Maestría en Salud Pública, área de concentración en Epidemiología.
- [31] N. Rojas, "Aire y problemas ambientales de Bogotá", *Universidad Nacional de Colombia: Sede Bogotá*, 2012.
- [32] J. Wang y S. Ogawa, "Effects of Meteorological Conditions on PM2.5 Concentrations in Nagasaki, Japan", *Int J Environ Res Public Health*, vol. 12, nº 8, p. 9089–9101, 2015.
- [33] Y. Cheng *et al*, "Humidity plays an important role in the PM2.5 pollution in Beijing", *Environmental Pollution*, vol. 197, pp. 68-75, 2015.
- [34] Secretaria Distrital de Ambiente, "Informe Técnico No. 00422, 23 de marzo del 2018", ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C, Bogotá, Informe técnico, no. 00422, 2018.
- [35] Redacción Bogotá, "Pese a mejoras, continúa alerta amarilla por la calidad del aire en Bogotá", *El Espectador*, 26 marzo 2018.
- [36] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "Resolución 2254 de 2017", Minambiente, Bogotá, 2017.
- [37] World Health Organization, Ambient (outdoor) air quality and health WHO, [Enlínea]. Estados Unidos, 2018. Disponible en: [http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- [38] G. Keeler, M. Morishita, J. Wagner y J. Harkema, "Characterization of Urban Atmospheres during Inhalation Exposure Studies in Detroit and Grand Rapids, Michigan", *Toxicologic Pathology*, vol. 35, pp. 15-22, 2007.

- [39] S. Gilbert, "Una pequeña dosis de contaminación del aire o Una introducción a los efectos de la contaminación del aire en la salud", de *Una pequeña dosis de toxicología – Efectos a la salud de químicos comunes*, Institute of Neurotoxicology&NeurologicalDisorders, 2016, pp. 5-15.
- [40] M. P. Pérez Peña, H. Barrón, J. Pachón y R. Nedbor-Gross, "Natural mitigation factor adjustment for re-suspended particulate matter emissions inventory for Bogotá, Colombia", *Atmospheric Pollution Research*, vol. 8, nº 1, pp. 29-37, 2017.
- [41] K. Ramgolam, S. Chevaillier, F. Marano, A. Baeza-Squiban y L. Martinon, "Proinflammatory effect of fine and ultrafine particulate matter using size-resolved urban aerosols from Paris", *Chemosphere*, vol. 72, nº 9, pp. 1340-1346, 2008.
- [42] M. Salmon *et al*, "Wearable camera-derived microenvironments in relation to personal exposure to PM2.5", *Environment International*, vol. 117, pp. 300-307, 2018.
- [43] MOOVIT, "Global Cities Public Transit Usage Report 2016: LATIN AMERICA", Data by Moovit, 2018.
- [44] R. Rojado, J. Pérez y E. Freyle, "Efecto de la humedad relativa en la determinación de PM10 utilizando una DataRam 4 en la región costera de Colombia", *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, vol. 35, nº 2, 2012.
- [45] M. Habila, D. Massey y A. Tanejab, "Personal and ambient PM2.5 exposure assessment in the city of Agra", *Data in Brief*, vol. 6, pp. 495-502, 2016.
- [46] Q. YuMeng, D. Spector, S. Colome y B. Turpin, "Determinants of indoor and personal exposure to PM2.5 of indoor and outdoor origin during the RIOPA study", *Atmospheric Environment*, vol. 43, nº 36, pp. 5750-5758, 2009.
- [47] D. Montagne *et al*, "Temporal associations of ambient PM2.5 elemental concentrations with indoor and personal concentrations", *Atmospheric Environment*, vol. 86, pp. 203-211, 2014.
- [48] J. Gantiva y J.P Ramos, "*Estimación y Comparación de Exposición Personal a PM2.5 en diferentes modos de Transporte en la Ciudad de Bogotá, Colombia*", Bogotá, Universidad de los andes, 2015.
- [49] H. Yin, M. Pizzol y L. Xu, "External costs of PM2.5 pollution in Beijing, China: Uncertainty analysis of multiple health impacts and costs", *Environmental Pollution*, vol. 226, pp. 356-369, 2017.
- [50] T. Mimura *et al*, "Airborne particulate matter (PM2.5) and the prevalence of allergic conjunctivitis in Japan", *Science of The Total Environment*, vol. 487, pp. 493-499, 2014.
- [51] W. K. KyungKimM, Y. W. Wook y H.-S. Yoon, "Associations Between Outdoor Of PM2.5 With Cough and Wheeze Symptoms In Asthmatic Children In Korea", *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, vol. 133, nº 2, p. AB98, 2014.

- [52] D. Massey, J. Masih, A. Kulshrestha, M. Habil y A. Taneja, "Indoor/outdoor relationship of fine particles less than 2.5 μm (PM_{2.5}) in residential homes locations in central India región", *Building and Environment*, vol. 55, nº 10, pp. 2037-2045, 2009.
- [53] S. SLimPhet *et al*, "A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010", *The Lancet*, vol. 380, nº 9859, pp. 2224-2260, 2012.
- [54] C. Arden y D. Dockery, "Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect.", *J Air Waste Manag Assoc.*, vol. 56, nº 6, 2006.
- [55] Z. Zhang *et al*, "Particulate matter air pollution, physical activity and systemic inflammation in Taiwanese adults", *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 221, nº 1, pp. 41-47, 2018.
- [56] J. Xu *et al*, "Assessment on personal exposure to particulate compounds using an empirical exposure model in an elderly community in Tianjin, China", *Science of The Total Environment*, vol. 572, pp. 1080-1091, 2016.
- [57] C. Wang *et al*, "Personal exposure to fine particulate matter, lung function and serum club cell secretory protein (Clara)", *Environmental Pollution*, vol. 225, pp. 450-455, 2017.
- [58] J. MARSHALL y E. BEHRENTZ, "Vehicle Self-Pollution Intake Fraction: Children's Exposure to School Bus Emissions", *Environ. Sci. Technol*, vol. 39, pp. 2559-2563, 2005.
- [59] Índice Bogotano de Calidad de Aire (IBOCA), "Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales", ICDE, 01 junio 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.icde.org.co/noticias/Indice-Bogotano-de-Calidad-de-Aire-IBOCA>.
- [60] O. Riojas *et al*, "Uso de la variabilidad de la frecuencia cardiaca como marcador de los efectos cardiovasculares asociados con la contaminación del aire", *Salud Pública de México*, vol. 48, nº 4, 2006.
- [61] Alcaldía Mayor de Bogotá, "DECRETO 595", Alcaldía Mayor de Bogotá, Bogotá, 2015.