

# Modelamiento Descriptivo de la calidad de aire en la calle 13 Fontibón, Bogotá, Colombia

## Descriptive Modeling of Air Quality on Fontibón, Street 13, Bogotá, Colombia

Juan Pablo Ramirez Prado<sup>1</sup>, Sonia Lucila Meneses Velosa<sup>2</sup>

<sup>1</sup><https://orcid.org/0009-0001-5342-4822> Universidad Libre, Bogotá, Colombia, juanp-ramirezp@unilibre.edu.co  
<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-0251-8308> Universidad Libre, Bogotá, Colombia, sonial.menesesv@unilibre.edu.co

Fecha de recepción: 28 de marzo de 2025

Fecha de aprobación: 18 de mayo de 2025

Fecha de publicación: 30 de junio de 2025



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons  
Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.12657>

Citar como: J. P. Ramirez y S. L. Meneses, "Modelamiento Descriptivo de la calidad de aire en la calle 13 Fontibón, Bogotá, Colombia," *Avances: Investigación en Ingeniería*, vol. 22, núm. 1, pp. 48–58, 2025, doi: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.12657>

## Resumen

La calidad del aire en Bogotá, particularmente en la localidad de Fontibón, constituye una problemática de salud pública debido a la alta concentración de partículas finas (PM2.5). Este estudio emplea un modelo descriptivo para analizar los patrones de contaminación en la calle 13, donde se identificaron picos de concentración durante las horas de la madrugada. El análisis se basó en la recopilación de datos provenientes de las estaciones fijas de monitoreo de calidad del aire ubicadas en la localidad, durante un período de 12 meses. Esta información permitió identificar patrones estacionales y evaluar la influencia de factores como el tráfico vehicular y las condiciones meteorológicas.

Para el procesamiento y análisis de los datos públicos proporcionados por la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, se utilizó la librería OpenAir del lenguaje R, aplicada a la localidad de Fontibón. Mediante esta herramienta se evaluaron variables como la dirección del viento, las ubicaciones críticas y el efecto del parque automotor en comparación con las diversas fuentes de emisión industrial presentes en la zona. Los resultados obtenidos indican que los niveles de partículas PM2.5 superan las normas recomendadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), especialmente durante las horas pico comprendidas entre las 05:30 a.m. y las 08:00 a.m., y entre las 05:00 p.m. y las 07:00 p.m. Asimismo, se identificó que los meses de mayor concentración de PM2.5 en el año 2024 fueron agosto, octubre y noviembre, con incrementos promedio del 8% respecto a los demás meses. Finalmente, se concluye que la calidad del aire en esta zona representa un riesgo significativo para la salud de los habitantes, lo que evidencia la necesidad de implementar políticas públicas orientadas a mejorar la calidad del aire urbano y controlar las emisiones contaminantes.

**Palabras Clave:** Calidad de aire, PM2.5, Contaminación Urbana, Modelado Descriptivo, Monitoreo Ambiental, Tráfico Vehicular.

## Abstract

Air Quality in Bogotá, particularly in the locality of Fontibón, represents a public health issue due to the high concentration of fine particulate matter (PM2.5). This study employs a descriptive model to analyze pollution patterns along Calle 13, where peaks in concentration were identified during the early morning hours. The analysis was based on data collected from fixed air quality monitoring stations located in the area over a 12-month period. This information made it possible to identify seasonal patterns and evaluate the influence of factors such as vehicular traffic and meteorological conditions.

For the processing and analysis of public data provided by the District Secretariat of Environment of Bogotá, the OpenAir library in the R programming language was used, applied to the locality of Fontibón. Through this tool, variables such as wind direction, critical locations, and the effect of the vehicle fleets were evaluated in comparison with the various industrial emission sources present in the area. The results indicate that PM2.5 levels exceed the limits recommended by the World Health Organization (WHO), especially during peak hours between 5:30 a.m. and 8:00 a.m., and between 5:00 p.m. and 7:00 p.m. Likewise, it was found that the months with the highest PM2.5 concentrations in 2024 were August, October, and November, with average increases of 8% compared to the other months. Finally, it is concluded that air quality in this area represents a significant health risk for residents, highlighting the need to implement public policies aimed at improving urban air quality and controlling pollutant emissions.

**Keywords:** Air Quality, PM2.5, Urban Pollution, Descriptive Modeling, Environmental Monitoring, Vehicular Traffic.

## 1. Introducción

La calidad del aire se ha convertido en un tema de creciente relevancia dentro de las agendas urbanas, debido a su impacto directo tanto en la salud de las personas como en el medio ambiente. Entre los diversos contaminantes atmosféricos, las partículas finas PM2.5 han adquirido especial atención por su capacidad de penetrar profundamente en el sistema respiratorio humano, alcanzando los alvéolos pulmonares y provocando una amplia gama de afecciones respiratorias y cardiovasculares [1]. Estas partículas, cuyo diámetro aerodinámico es inferior a 2,5 micras, se generan principalmente por fuentes antropogénicas como el tráfico vehicular, las actividades industriales, la quema de combustibles fósiles y otros procesos de combustión incompleta [2].

Además de su impacto en la salud humana, las PM2.5 contribuyen a problemas ambientales como la disminución de la visibilidad y el cambio climático, debido a su interacción con la radiación solar y su papel en la formación de nubes [3].

En ciudades de gran tamaño y alta densidad poblacional, como Bogotá, el problema del material particulado fino se agrava debido a la combinación de factores locales y regionales [4]. La topografía de la capital colombiana —situada en una meseta a más de 2.600 metros sobre el nivel del mar— genera condiciones que dificultan la dispersión de contaminantes. A ello se suma el elevado volumen de tráfico vehicular, las actividades industriales y las prácticas de quema de

biomasa en zonas periurbanas, que contribuyen a la emisión constante de partículas finas [5]. En este contexto, la Calle 13 se destaca como una de las vías más transitadas de la ciudad, funcionando como un eje clave para el transporte de carga y pasajeros. No obstante, esta arteria también representa un punto crítico en la generación de contaminantes [6], debido a la alta densidad de vehículos —en su mayoría con tecnología obsoleta— y a la presencia de actividades industriales en sus inmediaciones.

La relevancia de estudiar el material particulado PM2.5 en la Calle 13 radica no solo en su importancia como corredor vial, sino también en las implicaciones que tiene para la salud de las comunidades que residen y trabajan en sus alrededores. La exposición prolongada a niveles elevados de PM2.5 se ha asociado con un incremento en la incidencia de enfermedades respiratorias crónicas, como el asma y la bronquitis, así como con un mayor riesgo de eventos cardiovasculares, incluyendo infartos y accidentes cerebrovasculares [1]. Los grupos vulnerables —como niños, adultos mayores y personas con patologías preexistentes— presentan una susceptibilidad aún mayor frente a los efectos nocivos de este contaminante.

Abordar el problema de la contaminación por material particulado desde un enfoque científico y técnico resulta indispensable para diseñar estrategias efectivas de mitigación que protejan la salud pública. Diversos estudios realizados en Bogotá han demostrado que la exposición a contaminantes atmosféricos está asociada con un incremento en las consultas médicas por síntomas respiratorios, especialmente en niños que viven en áreas cercanas a fuentes de emisión. La ubicación de jardines infantiles próximos a corredores viales con alta concentración de PM10 y PM2.5 constituye un factor de riesgo crítico, ya que los menores de cinco años permanecen allí la mayor parte del día y presentan

una mayor sensibilidad a los efectos adversos de la contaminación atmosférica [7].

El presente estudio analiza la información específica sobre la calidad del aire en los alrededores de la calle 13, considerando que los estudios previos suelen ofrecer una visión general de la ciudad de Bogotá. Por tanto, se centra en el modelamiento descriptivo de las concentraciones de PM2.5 en esta zona, con el objetivo de comprender los factores que influyen en sus niveles y ofrecer información útil para la toma de decisiones.

Este enfoque implica analizar los datos obtenidos de estaciones de monitoreo de calidad del aire ubicadas en el sector, así como considerar variables ambientales y socioeconómicas relacionadas con la emisión y concentración de partículas. Entre las variables de interés se incluyen el tráfico vehicular, las condiciones meteorológicas (temperatura, humedad), la dirección del viento —para determinar el origen del material particulado circulante—, la población expuesta y la actividad industrial cercana. Integrar estos datos en modelos descriptivos, permite identificar puntos de concentración, patrones temporales y posibles estrategias de intervención orientadas a reducir los niveles de PM2.5 en la zona.

Una de las herramientas más relevantes para este tipo de estudios es el análisis de datos apoyado en tecnologías de minería de datos y aprendizaje automático, ampliamente utilizadas en la evaluación de la contaminación del aire en grandes ciudades como Bristol (Reino Unido), Ámsterdam (Países Bajos), Liubliana (Eslovenia), Aveiro (Portugal) y Liguria (Italia), donde se han obtenido resultados significativos para la toma de decisiones [8]. Estas técnicas permiten procesar grandes volúmenes de información y detectar relaciones complejas entre variables, lo que resulta útil para predecir tendencias y evaluar el impacto de diferentes escenarios de intervención. Por ejemplo, se puede modelar cómo

variaría la concentración de PM2.5 si se implementaran medidas como la renovación de la flota vehicular, la mejora de la infraestructura vial o la regulación de actividades industriales. Asimismo, este tipo de análisis permite identificar horarios y condiciones específicas en las que las concentraciones de PM2.5 son más elevadas, lo que facilita diseñar estrategias de mitigación más focalizadas.

Además del tráfico vehicular, otros factores ambientales desempeñan un papel crucial en la concentración de PM2.5. Las condiciones meteorológicas influyen significativamente en los procesos de dispersión y acumulación de contaminantes [9]. Durante períodos de alta presión atmosférica, pueden formarse capas de aire caliente que actúan como barrera, limitando el ascenso del aire frío cercano a la superficie. Este fenómeno, conocido como **inversión térmica**, provoca que los contaminantes queden atrapados cerca del suelo, incrementando su concentración y generando episodios de contaminación aguda. En contraste, la velocidad y la dirección del viento favorecen la dispersión de las partículas, reduciendo sus niveles en áreas específicas [10]. Por ello, considerar estas variables resulta indispensable para obtener una visión integral de los factores que inciden en la calidad del aire en la Calle 13.

Otro aspecto relevante es la influencia de las actividades industriales en las inmediaciones de esta vía. Muchas de estas actividades generan emisiones de PM2.5 debido a procesos de combustión, manipulación de materiales y otras operaciones que liberan partículas al ambiente [11]. Estas emisiones no sólo afectan la calidad del aire en la zona inmediata, sino que también pueden ser transportadas a otras áreas por las corrientes de aire, ampliando su impacto [12]. Este estudio busca evaluar cómo estas fuentes contribuyen a las concentraciones totales de PM2.5 en la Calle 13, así como identificar posibles estrategias para reducir su impacto, como la implementación de tecnologías de control de emisiones o la reubicación de determinadas actividades.

La importancia de este estudio trasciende el ámbito local, ya que los resultados pueden servir como referencia para abordar problemas similares en otras ciudades de América Latina y el mundo. Muchas de estas ciudades comparten características comunes, como un rápido crecimiento urbano y una alta dependencia del transporte motorizado, lo que genera retos significativos en la gestión de la calidad del aire. Si bien existe normatividad ambiental, esta suele aplicarse de manera general a toda la ciudad, lo que dificulta atender particularidades locales o regionales. En este sentido, las lecciones aprendidas a partir del análisis de la Calle 13 pueden ser aplicables en diversos contextos, contribuyendo a mejorar la calidad del aire y la salud pública en una escala más amplia.

Finalmente, es importante destacar que la calidad del aire no solo constituye una cuestión de salud pública, sino también un indicador del nivel de desarrollo sostenible de una ciudad. Ejemplo como Lisboa, San Francisco y Ottawa, que presentan concentraciones anuales promedio de PM2.5 de 8,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  [13].

La mejora de la calidad del aire requiere un enfoque integral que combine medidas técnicas, políticas públicas y participación ciudadana. Esto incluye la promoción de medios de transporte sostenibles [14], así como la educación de la población sobre la importancia de reducir las emisiones en su vida diaria. Además, es importante fortalecer los mecanismos de control y vigilancia para garantizar el cumplimiento de las normas ambientales.

## 2. Materiales y Métodos

Para la identificación y análisis de las variables asociadas a los niveles de PM2.5, junto con los parámetros meteorológicos—como temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento—, se aplicó la siguiente metodología estructurada.

## 2.1 Análisis Exploratorio de Datos

La información utilizada en el análisis proviene de la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá, correspondiente al período comprendido entre el 1 de enero de 2021 y el 31 de diciembre de 2024. Se seleccionaron las estaciones de Fontibón Fija, Fontibón Móvil y Puente Aranda, ubicadas a lo largo del eje vial de la calle 13.

El siguiente cuadro (Tabla 1) presenta el análisis de los datos correspondientes a los años evaluados, en relación con los niveles de material particulado respirable (PM2.5) para exposiciones de 24 horas, según los datos de las estaciones mencionadas.

En la Tabla 1, los símbolos utilizados representan los siguientes parámetros estadísticos:  $\bar{x}$  representa la media o valor promedio,  $s$  la desviación estándar y  $x_{máx}$  el valor máximo.

**Tabla 1.** Material particulado respirable.

| Año   | Estación Fontibón ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |      |           | Estación Puente Aranda ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |      |           |
|-------|--|------|-----------|---|------|-----------|
|       | $\bar{x}$                                      | $s$  | $x_{máx}$ | $\bar{x}$   | $s$  | $x_{máx}$ |
| 2023  | 13,17  | 4,54 | 21        | 18,08   | 4,46 | 25        |
| 2022  | 16,33  | 3,52 | 23        | 19,5  | 4,31 | 28        |
| 2021  | 21,45  | 3,37 | 27        | 16,92   | 3,84 | 23        |
| Total | 16,43  | 5,49 | 28        | 18,77   | 4,94 | 34        |

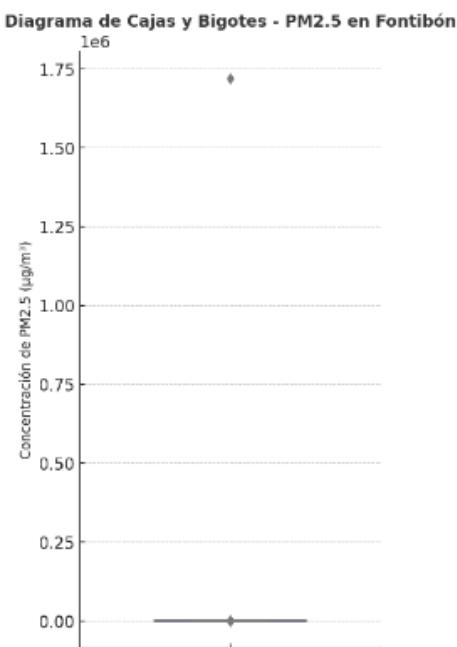
Sumado a lo anterior, con la base de datos obtenida de las estaciones de monitoreo para los mismos períodos, se calculó la participación promedio de contaminantes atmosféricos presentes en el aire. La Tabla 2 presenta los resultados de este análisis.

**Tabla 2.** Participación de contaminantes en el aire.

| Año  | Promedio (%) |       |      |              |      |               |               |               |
|------|--------------|-------|------|--------------|------|---------------|---------------|---------------|
|      | PM2.5        | PM10  | CO   | $\text{O}_3$ | NO   | $\text{NO}_2$ | $\text{NO}_x$ | $\text{SO}_2$ |
| 2021 | 41,07        | 17,87 | 0,32 | 8,19         | 7,30 | 8,59          | 15,89         | 0,78          |
| 2022 | 35,28        | 20,44 | 0,29 | 6,89         | 8,32 | 9,83          | 18,14         | 0,81          |
| 2023 | 36,34        | 18,22 | 0,24 | 6,24         | 8,37 | 10,69         | 19,06         | 0,84          |

Al ser evaluados los datos, se identificó que el nivel de PM2.5 presenta la mayor concentración en el aire, lo que lo convierte en el contaminante más representativo para realizar las mediciones requeridas en la afectación de la calidad del aire en la localidad de Fontibón. Estos contaminantes muestran variaciones asociadas a factores como la temperatura, la humedad relativa, el día, la hora, el año, la dirección y velocidad del viento, así como la estación climática (invierno/verano), entre otros.

En total, se cuantificaron 25.582 observaciones, compuestas por variables tanto numéricas como categóricas. Para garantizar la integridad de la base de datos, se aplicaron técnicas de imputación: la media o mediana para variables numéricas y el modo para las variables categóricas. Asimismo, los valores atípicos se identificaron mediante el método del diagrama de caja y bigotes, como se observa en la Figura 1:



**Figura 1.** Diagrama de Cajas y Bigotes para identificar valores atípicos.

Para la definición de los límites estadísticos, tanto el inferior, **LI**, como el superior, **LS**, se emplean las ecuaciones 1 y 2.

$$LI = Q1 - 1,5IQR \quad (1)$$

$$LS = Q3 + 1,5IQR \quad (2)$$

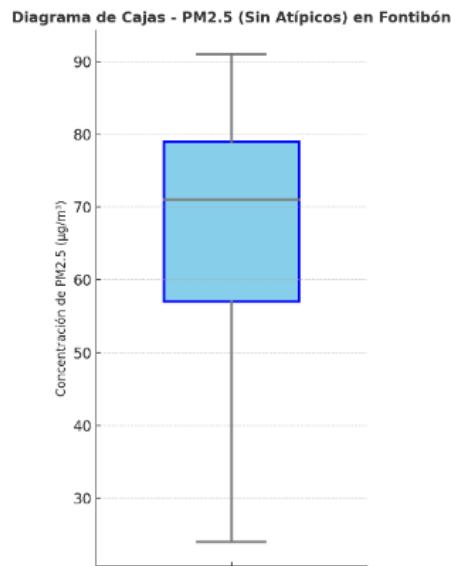
siendo **Q1** el primer cuartil y **Q3** el tercer cuartil, mientras que **IQR** es el rango intercuartil, que se determina por la ecuación 3:

$$IQR = Q3 - Q1 \quad (3)$$

Así con un Q1 de 57,0 y un Q3 de 79,0, se obtiene un IQR de 22,0 (ecuación 3) para llegar a un LI de 24,0 (ecuación 1) y un LS de 112,0 (ecuación 2).

Con base en esta definición de límites estadísticos, los valores aceptables de concentración de PM2.5 se encuentran dentro de un rango comprendido entre  $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $112 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Los valores que estén fuera de este intervalo se denominan atípicos y, por lo tanto, fueron excluidos del análisis.

Los datos se ajustaron de acuerdo con los criterios establecidos, con el fin de preservar la integridad de los análisis. Los criterios de exclusión incluyeron valores de PM2.5 extremadamente altos o bajos que no correspondían a condiciones reales de medición (Figura 2).



**Figura 2.** Diagrama de Cajas sin valores atípicos.

## 2.2 Análisis Exploratorio de Datos+

Cuando fue necesario, los datos fueron transformados para optimizar su interpretación y análisis. Para ello, se aplicaron técnicas de normalización, específicamente la normalización *Min-Max* para variables numéricas, garantizando así que todas las ellas tuvieran el mismo rango de valores. Esta técnica se utilizó debido a que algunas variables tenían escalas muy dispares, lo que podría haber afectado el rendimiento de los modelos de aprendizaje automático. La variable normalizada,  $x_n$ , se calcula a través de la ecuación 4:

$$x_n = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

donde,  $x$  es el valor original de la variable,  $x_{\min}$  es el valor mínimo de la variable y  $x_{\max}$  es el valor máximo de la variable. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Normalización de promedio de datos anuales.

| Año          | $\bar{x}_{nPM\ 2.5}$<br>(% en contaminantes del aire) |
|--------------|---|
| 2023         | 74,78   |
| 2022         | 75,24   |
| 2021         | 71,38   |
| <b>Total</b> | <b>73,87</b>  |

## 2.3 Modelos estadísticos aplicados

Los datos se dividieron en conjuntos de entrenamiento y prueba utilizando un criterio de 70% para entrenamiento y 30% para prueba, con el objetivo de asegurar que el modelo tuviese suficiente información para aprender, pero también una muestra independiente para validar su desempeño. Se ajustaron modelos univariados básicos (como regresión lineal y regresión logística) debido a su simplicidad y capacidad de proporcionar una base para comparar el rendimiento con modelos más complejos. El desempeño de estos modelos se evaluó mediante validación cruzada utilizando 5 pliegues para asegurar la robustez de los resultados.

## 2.4 Incorporación de factores adicionales

Se refinaron los modelos integrando variables adicionales como los días festivos, eventos especiales y la estación climática (invierno/ verano). Estas variables fueron consideradas relevantes debido a que podrían influir significativamente en los patrones de calidad del aire. Cada ajuste fue validado para medir su impacto en la precisión del modelo, utilizando el  $R^2$  ajustado y el error cuadrático medio (RMSE) como métricas principales.

## 2.5 Optimización de hiperparámetros

Se exploraron y ajustaron los hiperparámetros de los modelos utilizando un proceso iterativo de validación y ajuste, mediante búsqueda en malla (*grid search*) y validación cruzada. Se realizaron X iteraciones para identificar la configuración óptima de los hiperparámetros que maximizaran el desempeño del modelo.

## 2.6 Selección del modelo óptimo

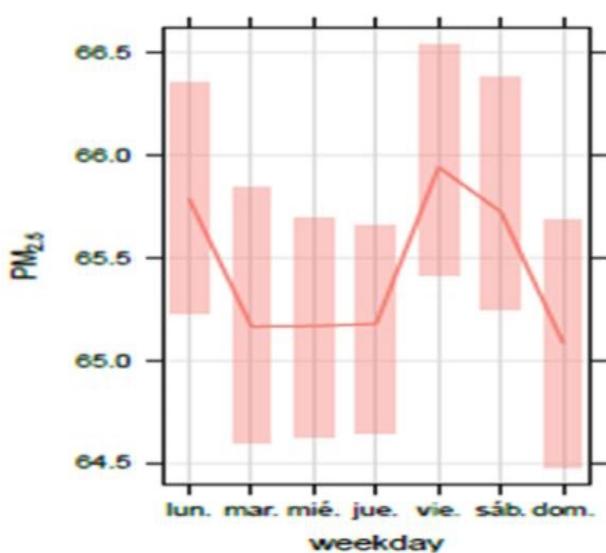
Se seleccionó el modelo que presentó el mejor desempeño según las métricas clave de evaluación, como la minimización de errores (RMSE) y la capacidad de generalización medida a través de validación cruzada. El modelo final se eligió tomando en cuenta tanto el desempeño en los datos de entrenamiento como en los de prueba, asegurando que tuviera la capacidad de generalizar bien a nuevos datos.

Para el análisis, se empleó el lenguaje de programación *R* junto con la librería *Open Air*. Esta herramienta permitió identificar las variables y tendencias asociadas con los contaminantes, utilizando datos obtenidos de las bases públicas proporcionadas por la Secretaría de Ambiente de Bogotá.

## 3. Resultados y Análisis

### 3.1 Variación Horaria de PM2.5

El análisis revela que las concentraciones más altas de PM2.5 se registran durante las horas nocturnas, específicamente entre las 18:00 y las 06:00 del día siguiente. Este patrón de concentración horaria se detalla en la Figura 3.

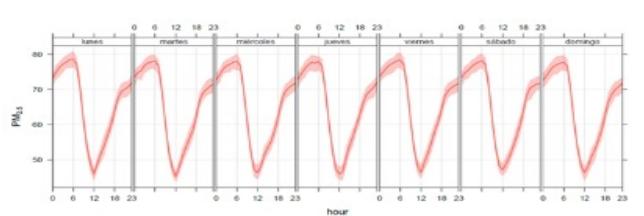


**Figura 3.** Variación horaria de PM2.5 para cada día de la semana.

## 3.2 Variación por día de la semana

En cuanto a la variación semanal, se identificó que los lunes, viernes y sábados presentan las concentraciones más altas de PM2.5. Este patrón podría estar relacionado con las dinámicas de tráfico y las actividades humanas que se desarrollan en el eje vial de la calle 13, especialmente en las localidades de Fontibón y Puente Aranda.

Según información de la Cámara de Comercio de Bogotá, estas zonas concentran una alta proporción de actividades industriales y logísticas, lo que contribuye significativamente a las emisiones de material particulado. El comportamiento descrito se ilustra en la Figura 4.



**Figura 4.** Concentración de PM2.5 por día de la semana.

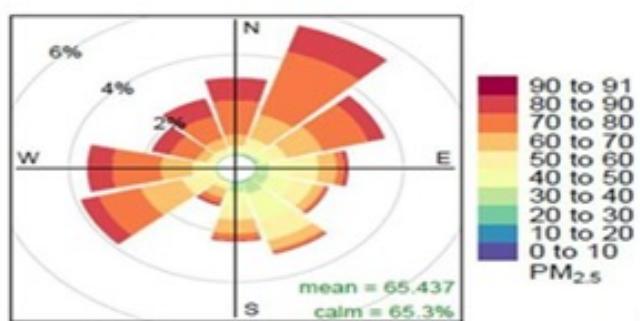
## 3.3 Variación Mensual de PM2.5

En relación con la variación mensual, se observó que los meses con las mayores concentraciones de PM2.5 fueron marzo, octubre y noviembre. Dado que Colombia es un país tropical, con temporadas de invierno y verano, se registró un aumento significativo de PM2.5 durante el periodo de Invierno (de octubre a noviembre), en comparación con los meses correspondientes a la temporada de verano.

## 3.4 Dispersión del PM 2.5 en el eje vial de la Calle 13

Finalmente, el análisis de la dirección predominante de la contaminación de PM2.5 en las estaciones de calidad del aire ubicadas en el área de influencia de la calle 13 de Bogotá muestra que las mayores concentraciones se desplazan hacia el norte y el occidente de la ciudad. Este fenómeno afecta principalmente la localidad de Fontibón, mientras que las áreas al oriente y al sur presentan menores niveles de exposición.

Los resultados de esta dispersión se evidencian en la Figura 5:



**Figura 5.** Dirección del viento (%) y dispersión de PM2.5 en Bogotá.

Así mismo, se evaluaron los episodios críticos por umbral de acuerdo con la OMS [13], lo que identifica en cada una de las categorías, los datos en la siguiente distribución:

*Alerta* ( $> 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ): 19.655 registros, que indica que la contaminación está frecuentemente por encima de los niveles seguros.

*Peligro* ( $> 55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ): 5.927 registros con niveles dañinos para la salud, especialmente para grupos sensibles (niños, ancianos, personas con enfermedades respiratorias).

## 4. Conclusiones

Mediante el uso de la librería *OpenAir* del lenguaje *R*, se analizaron un total de 25.582 registros correspondientes al período comprendido entre 2021 y 2023, obtenidos de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá. De este total, 8.759 registros correspondieron al año 2022 y 8.760 al año 2023, incluyendo variables como PM10, PM2.5, CO, O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>.

Con respecto al valor promedio del material particulado PM2.5, se observó que las concentraciones más elevadas se presentaron en la localidad de Fontibón, teniendo en cuenta que los valores promedio, presentado en el numeral 2.1 del artículo, superan los estándares recomendados por la OMS ( $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio anual).

La Tabla 4 muestra los valores recomendados por la OMS, según las "Global Air Quality Guidelines" de 2021 [15]:

**Tabla 4.** Valores recomendados por la OMS para PM 2.5.

| Periodo agregado    | Valor recomendado para PM 2.5 |
|---------------------|-------------------------------|
| Periodo anual       | $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$    |
| Periodo de 24 horas | $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$   |

Los resultados confirman que las temporadas lluviosas en Bogotá, particularmente durante los meses de octubre y noviembre, registran las

mayores concentraciones de PM2.5. Esto se debe a condiciones meteorológicas que favorecen la acumulación de contaminantes en la atmósfera, lo que representa un desafío adicional para la gestión de la calidad del aire.

Además, se identificó que las concentraciones de PM2.5 son más altas durante las horas nocturnas y de la madrugada (entre las 18:00 y las 06:00), debido a la menor atmósfera en este periodo. Esta reducción en la dispersión está relacionada, entre otros factores, con la disminución del tráfico vehicular en el eje vial objeto del estudio.

En cuanto a la variación semanal, los lunes, viernes y sábados muestran niveles más altos de PM2.5 en comparación con otros días de la semana. Este fenómeno podría estar relacionado con un incremento en las actividades económicas, sociales y comerciales, así como con un mayor flujo vehicular en dichos días.

Los elevados niveles de contaminación por PM2.5 en Bogotá, especialmente en la localidad de Fontibón, subrayan la urgencia de fortalecer los sistemas de monitoreo Ambiental y desarrollar estrategias integrales de mitigación. Estas políticas deben incluir la regulación del tráfico vehicular, la adopción de tecnologías más limpias en actividades industriales y la reforestación urbana con el fin de mejorar de manera sostenida la calidad del aire y proteger la salud de la población.

## Referencias

- [1] K. Lelieveld, "Revaluación de la carga de enfermedades cardiovasculares por contaminación del aire ambiental en Europa mediante funciones de razón de riesgo," European Heart Journal, vol. 40, pp. 1590–1596, 21 may. 2019, doi: <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz135>.

- [2] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), “Partículas suspendidas PM10 y PM2.5 dañan salud y medio ambiente,” 21 ene. 2021. [En línea]. <https://www.gob.mx/semana/articulos/perticulas-suspendidas-pm10-y-pm2-5-danan-salud-y-medio-ambiente>.
- [3] A. K. Afifa, “Air pollution and climate change as grand challenges to sustainability,” *Science of The Total Environment*, vol. 928, 10 jun. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172370>.
- [4] A. Casallas, M. Castillo Camacho, M. Guevara Luna y L. Belarcazar, “Spatio-temporal analysis of MP2.5 and policies in Northwestern South America,” *Science of The Total Environment*, 6 sep. 2022, doi: [10.1016/j.scitotenv.2022.158504](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158504)
- [5] L. A. Rodriguez Camargo, R. J. Sierra Parada y L. C. C. Blanco Becerra, “Spatial Analysis of PM2.5 concentrations in Bogotá according to the World Health Organization air quality guidelines for cardiopulmonary diseases, 2014-2015,” *Biomédica*, vol. 40, pp. 137-152, 2020, doi: <https://doi.org/10.7705/biomedica.4719>.
- [6] CESVI Colombia, “Análisis de la infraestructura y seguridad vial de la Calle 13 de Bogotá,” 3 ago. 2021. [En línea]. <https://www.cesvicolombia.com/analisis-de-la-infraestructura-y-seguridad-vial-de-la-calle-13-de-bogota/>.
- [7] L. J. Hernández, “Asociación entre la contaminación del aire y la morbilidad por Enfermedad Respiratoria Aguda en menores de 5 años en tres localidades de Bogotá,” Tesis de doctorado en Salud Pública, Universidad Nacional de Colombia, pp. 1-80, 2010. [En línea]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59011>.
- [8] V. Rodriguez, A. Monteiro, E. Hayes y M. Lopes, “Assessing air pollution in European cities to support a citizen centered approach to air quality management,” *Science of The Total Environment*, 10 dic. 2021, doi: [10.1016/j.scitotenv.2021.149311](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149311).
- [9] Secretaría de Ambiente Bogotá, “Secretaría de Ambiente Bogotá,” 5 ene. 2025. [En línea]. <https://www.ambientebogota.gov.co/red-de-monitoreo-de-calidad-del-aire-de-bogota-rmcab>
- [10] J. F. Méndez Espinosa, L. C. Pinto Herrera, B. R. Gálvis Remolina y J. E. Pachón, “Estimación de factores de emisión de material particulado resuspendido antes, durante y después de la pavimentación de una vía en Bogotá,” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, pp. 43-60, 2017, doi: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18359/cin.1797>.
- [11] C. F. Gaviria, P. C. Benavides y C. A. Tanguife, “Contaminación por material particulado (PM2.5 y PM10) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009),” *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, vol. 29, pp. 1-10, 2021.
- [12] J. H. Gutierrez Jaimes, M. J. Quijano Vargas y A. Quijano Parra, “Monitoreo y caracterización fisicoquímica del material particulado PM2.5 en Cúcuta-Norte de Santander-Colombia,” *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, vol. 10, pp. 24-38, 2012.
- [13] Organización Mundial de la Salud (OMS), “Nuevas directrices mundiales sobre calidad del aire: objetivo salvar millones de vidas de la contaminación atmosférica,” 22 sep. 2021. [En línea]. <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>.

- [14] O. Mosca, M. Lauriola, A. Manunza, A. L. Mura y F. Piras, "Promoting a sustainable behavioral shift in commuting choices: the role of previous intention and "personalized travel plan" feedback," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 106, pp. 55-71, 2024.
- [15] Organización Mundial de la Salud (OMS), global air quality guidelines, Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, Berna: WHO, 2015, pp. 1-290.
- [16] IQAir Newsroom, "Las nuevas directrices de la OMS sobre calidad del aire salvarán vidas," 331 dic. 2021. [En línea]. <https://www.iqair.com/mx/newsroom/2021-who-air-quality-guidelines>.