



Evaluación de la concentración del material particulado (PM2.5 y PM10) para la gestión ambiental enfocada en la calidad del aire. Estudio de caso Parque Juan Amarillo - Siete canchas localidad de Engativá.

Yulanni Katherine Castro Camberos
July Ximena Mancipe Díaz

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá D.C, Colombia
2023

Evaluación de la concentración del material particulado (PM2.5 y PM10) para la gestión de la calidad del aire. Estudio de caso Parque Juan Amarillo - Siete canchas localidad de Engativá.

Yulanni Katherine Castro Camberos
July Ximena Mancipe Díaz

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Línea de Investigación:
Salud Ambiental

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá D.C, Colombia
2023

Tabla de Contenido

1. *Resumen*
2. *Abstract*
3. *Introducción*
4. *Planteamiento del problema*
 - 4.1 *Pregunta de investigación*
 - 4.2 *Hipótesis*
 - 4.2.1. *Hipótesis nula*
 - 4.2.2. *Hipótesis alternativa*
5. *Justificación*
6. *Objetivos*
 - 6.1. *Objetivo general*
 - 6.2. *Objetivos específicos*
7. *Marcos de referencia*
 - 7.1. *Marco geográfico.*
 - 7.2. *Antecedentes del problema*
 - 7.3. *Estado del arte*
 - 7.4. *Marco teórico - conceptual*
 - 7.5. *Marco normativo*
 - 7.6. *Marco institucional*
8. *Metodología*
 - 8.1. *Diseño metodológico*
 - 8.1.1. *Enfoque de la investigación*
 - 8.1.2. *Alcance de la investigación*
 - 8.1.3. *Matriz metodológica por objetivos específicos*
 - 8.1.4. *Unidad de análisis*
 - 8.1.5. *Población*
 - 8.1.6. *Limitaciones de la investigación*
 - 8.2 *Plan de Trabajo*
 - 8.2.1 *Metodología por objetivo específico*
9. *Resultados y análisis de resultados*
 - 9.1. *Objetivo específico I*
 - 9.2. *Objetivo específico II*
 - 9.3 *Objetivo específico III*
10. *Conclusiones*
11. *Recomendaciones*
12. *Referencias bibliográficas*
13. *Anexos*
 - 13.1. *Gráficas de emisiones de PM10 y PM2.5 cada 24h durante los años 2021-2022 y su comparación con la normativa nacional y la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021*
 - 13.2 *Semanas típicas anuales 2021-2022 y los calendarios del comportamiento diario de las concentraciones PM2.5 y PM10*

Listado de Tablas

- Tabla 1. Estado del arte
- Tabla 2. Características generales de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá
- Tabla 3. Datos reportados por RMCAB
- Tabla 4. Normativa colombiana
- Tabla 5. Instituciones colombianas
- Tabla 6. Matriz metodológica
- Tabla 7. Límite permisible de PM10 y PM2.5 para la normativa nacional y la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021

Listado de Figuras

- Figura 1. Planteamiento del problema
- Figura 2. Fotografías Parque Juan Amarillo
- Figura 3. Pirámide poblacional Localidad de Engativá
- Figura 4. Parque Juan Amarillo - sector Siete Canchas.
- Figura 5. Antes y después del Parque Juan Amarillo.
- Figura 6. Ubicación y distancia de la estación de calidad del Aire Bolivia hasta el Parque Juan Amarillo- Siete Canchas.
- Figura 7. Estación de monitoreo Bolivia.
- Figura 8. Índice Bogotano de Calidad del Aire.
- Figura 9. Consulta de monitoreo de PM10 y PM2.5 RMCAB Bolivia - Localidad de Engativá
- Figura 10. Estación de monitoreo Bolivia Fuente: IBOCA
- Figura 11. Diagrama de la metodología objetivo específico I.
- Figura 12. Diagrama de la metodología objetivo específico II.
- Figura 13. Diagrama de la metodología objetivo específico III.
- Figura 14. Emisiones de PM10 y PM2.5 promedios 24h, para el mes de enero de 2021 y su comparación con la normativa nacional y la a Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021
- Figura 15. Emisiones de PM10 y PM2.5 promedios 24h, para el mes de noviembre de 2021 y su comparación con la normativa nacional y la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021.
- Figura 16. Emisiones de PM10 y PM2.5 promedios 24h, para el mes de diciembre de 2021 y su comparación con la normativa nacional y la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021
- Figura 17. Número excedencia año 2021
- Figura 18. Porcentaje de días evaluados en cuanto a la concentración de PM10 y PM2.5 - Año 2022.
- Figura 19. Emisiones de PM10 y PM2.5 promedios 24h, para el mes de febrero de 2022 y su comparación con la normativa nacional y la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021
- Figura 20. Emisiones de PM10 y PM2.5 promedios 24h, para el mes de junio de 2022 y su comparación con la normativa nacional y la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021.
- Figura 21. Emisiones de PM10 y PM2.5 promedios 24h, para el mes de diciembre de 2022 y su comparación con la normativa nacional y la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021
- Figura 22. Número de excedencia año 2022
- Figura 23. Cartel de Fauna en el Parque Juan Amarillo.
- Figura 24. Promedio de precipitación en Bogotá.

- Figura 25. Promedio de lluvias Julio 2021
- Figura 26. Semana típica en temporada seca año 2021 vs año 2022 PM10
- Figura 27. Semana típica en temporada lluviosa 2021 vs 2022 PM10
- Figura 28. Semana típica en temporada seca año 2021 vs año 2022 PM2.5
- Figura 29. Semana típica en temporada de lluviosa 2021 vs año 2022 PM2.5
- Figura 30. Histórico de temperatura para la ciudad de Bogotá
- Figura 31. Dirección anual de los vientos años 2021 -2022 del contaminante criterio PM10.
- Figura 32. Dirección anual de los vientos años 2021 -2022 del contaminante criterio PM2.5.
- Figura 33. Cartografía cierre por UPZ localidad de Suba
- Figura 34. Rosa de vientos de la estación de monitoreo Las Ferias.
- Figura 35. Semana típica 2021 concentraciones PM10 y PM2.5
- Figura 36. Semana típica 2022 concentraciones PM10 y PM2.5

1. Resumen

La evaluación de la calidad del aire es esencial para garantizar un entorno sostenible, la preservación de la salud humana y la protección de los ecosistemas. Por lo tanto, el análisis de PM se convierte en un indicador crítico para prevenir o mitigar los impactos adversos. Este trabajo de grado se enfoca en la recopilación de datos de concentraciones PM2.5 y PM10 durante el período 2021-2022, reportados por la estación de monitoreo Bolivia, perteneciente a la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, operada por la Secretaría Distrital de Ambiente. A través del análisis de las concentraciones (PM2.5 y PM10) se compararon los datos con las regulaciones nacionales y la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021. Para después, analizar la influencia de los factores meteorológicos en el comportamiento de los PM. También, se llevó a cabo un análisis de patrones horarios, obteniendo que las horas con las concentraciones más altas están entre las 22:00 pm y las 2:00 am, con un segundo pico entre las 7:00 am y las 9:00 am. Por lo tanto, se identificó que el menor horario de exposición es entre las 12:00 pm a 2:00 pm. En cuanto a los días, el domingo son constantes, mientras que los niveles más altos son los miércoles, jueves y viernes. Finalmente, se estableció estrategias de gestión ambiental, alineadas con el Plan Ambiental de la localidad de Engativá adaptadas al Parque Juan Amarillo - Siete Canchas.

Palabras claves: Material Particulado, Calidad del aire, Patrones Horarios, Gestión Ambiental.

2. Abstract

Air quality assessment is essential to ensure a sustainable environment, the preservation of human health and the protection of ecosystems. Therefore, PM analysis becomes a critical indicator to prevent or mitigate adverse impacts. This degree work focuses on the collection of data on PM2.5 and PM10 concentrations during the period 2021-2022, reported by the monitoring station Bolivia, belonging to the Air Quality Monitoring Network of Bogotá, operated by the District Environment Secretariat. Through the concentration analysis (PM2.5 and PM10), data were compared with national regulations and the WHO Air Quality Guide-2021. Also, an analysis of time patterns was carried out, obtaining that the hours with the highest concentrations are between 22:00 pm and 2:00 am, with a second peak between 7:00 am and 9:00 am. Therefore, it was identified that the lowest exposure time is between 12:00 pm to 2:00 pm. As for the days, Sunday is constant, while the highest levels are on Wednesdays, Thursdays and Fridays. Finally, environmental management strategies were established, aligned with the Environmental Plan of the town of Engativá adapted to the Juan Amarillo Park - Siete Canchas.

Key words: Particulate Matter, Air Quality, Timetables, Environmental Management

3. Introducción

La calidad del aire especialmente en áreas urbanas es un tema de constante atención y preocupación a nivel mundial, pues está asociada a un impacto directo en la calidad de vida y salud pública de las comunidades. En este contexto, el presente trabajo de grado se enfoca en un área especial de interés, el cual es el Parque Juan Amarillo – sector Siete Canchas, situado en el barrio Ciudadela Colsubsidio en la localidad de Engativá de la ciudad de Bogotá. Este espacio beneficia a una gran cantidad de personas, pues en primer lugar está destinado para recreación y ocio tanto de adultos como de menores, ya que está dividido por secciones y cada espacio cuenta con diferentes canchas y parques, tiene espacios para jugar juegos de mesa y finalmente un sendero que abarca la totalidad del parque. Es una zona la cual está rodeada tanto de naturaleza gracias a su diversidad en flora y fauna por el humedal Juan Amarillo, como de urbanización dado que a su otro lado se encuentran algunos conjuntos residenciales; Sin embargo, la calidad del aire es un tema relevante teniendo en cuenta el flujo de visitantes a esta zona.

La contaminación del aire, en particular relacionada a la concentración de material particulado (PM), se puede originar a partir de diferentes fuentes ya sean naturales o antropogénicas, el PM conforme ha avanzado el tiempo ha sido objeto de estudio, pues su presencia en la atmósfera genera impactos tanto en el ambiente como en la salud humana (Pacheco, Parodi, Mera & Salini, 2020) acarreando problemas respiratorios e incluso se ha llegado a asociar a problemas cardiovasculares. De allí, radica la importancia de realizar estudios que se dediquen tanto a medir su concentración como también a entender su comportamiento en el tiempo y espacio y además identificar factores meteorológicos y climatológicos que pueden alterar o favorecer su prevalencia (Arciniegas, 2012) y gracias a esto establecer estrategias que mitiguen, prevengan y controlen la exposición prolongada al PM, estableciendo medidas informadas de seguimiento.

Dicho material particulado, se puede entender como un conjunto de partículas sólidas y líquidas que están en el aire y se puede encontrar en el polvo, cenizas, hollín, cemento, también pueden ser una mezcla de productos químicos que incluyen compuestos volátiles, hidrocarburos, aromáticos policíclicos y endotoxinas que pueden interactuar entre sí (Arciniegas, 2012). Como se mencionó anteriormente dicho material puede generar efectos adversos en la salud, pero también al ambiente al disminuir la visibilidad, en la vegetación pues puede interferir en procesos como la fotosíntesis y por último también pueden generar el deterioro de superficies (Pacheco, Parodi, Mera & Salini, 2020). Por consiguiente, debido a su amplia diversidad se pueden clasificar por su tamaño, pero se debe resaltar que al tener gran variedad en su forma no se puede caracterizar en una sola dimensión geométrica y por ello se utiliza el diámetro aerodinámico como indicador de tamaño de la partícula, por ende, al clasificarlas de esta manera se pueden dividir en fracción respirable, es decir, partículas suspendidas totales con diámetro teórico de partículas menores a $10\mu\text{m}$ y mayores a $2.5\mu\text{m}$ (Pacheco, Parodi, Mera & Salini, 2020).

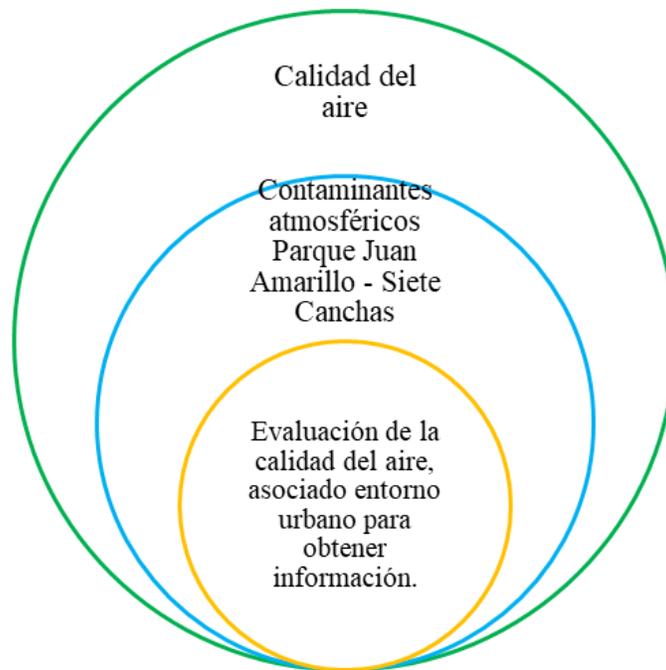
En relación con lo anterior, el presente trabajo desea generar un impacto social, ya que pretende contribuir con el estudio de calidad del aire de una zona especial, con el fin de aportar bases a futuros análisis e investigaciones que se realicen en el área asociada a la calidad del aire que reciben los visitantes del parque Juan Amarillo en especial en el sector siete canchas, por ello, para el desarrollo de este estudio en primer lugar se realizó una búsqueda de estaciones de monitoreo cercanas a la zona para

así obtener datos de concentración de material particulado (PM10 y PM2.5) y comparar respecto a la resolución 2254 de 2017 y a las recomendaciones de la OMS, el cumplimiento de la normativa vigente teniendo en cuenta dos años diferentes y así entender de cierta manera el comportamiento de las concentraciones, teniendo en cuenta las características tanto bióticas y abióticas del parque, para luego relacionarlas con las variables meteorológicas del lugar y así comprender mejor la dinámica presente y luego establecer patrones horarios que permitan identificar picos de concentración según la hora y el día de la semana permitiendo un análisis integral que incluya estrategias de control o seguimiento desde puntos de vistas técnico ecológicos, sociales y económicos; para que finalmente sirva como apoyo a autoridades locales y ambientales para procesos de mejora en la zona.

4. Planteamiento del problema

Para este apartado en primer lugar, se realizó un diagrama el cual se presenta en la figura 1 y resume el problema de investigación.

Figura 1. Planteamiento problema



El crecimiento poblacional y la expansión que ha presentado la capital de Colombia a lo largo de los años ha generado un incremento en la demanda de recursos, actividades industriales y demás, que entre sus efectos genera un alteración en el aire y su calidad, además según el IDEAM entre las ciudades más contaminadas en Colombia está Bogotá, en la cual se presentan diferentes localidades con problemas de contaminación en el aire, en este caso la localidad de Engativá aunque no está en el ranking de las localidades con mayor reporte de contaminación en el aire, es una zona que enfrenta una compleja

combinación de factores urbanos, industriales y geográficos que pueden contribuir a la acumulación de contaminantes en el aire.

La calidad del aire se puede asociar con la emisión de contaminantes que son generados por actividades industriales, comerciales, humanas, entre otros, y el hecho de que sea buena o mala la calidad en una zona, está asociado a diferentes factores que harán que varíe. La exposición a dichos contaminantes en relación con la salud humana se ha investigado y se ha asociado a con morbilidad y mortalidad, pues la disminución de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de partículas finas se asocia al aumento en la esperanza de vida entre 0.60 y 0.80 años (Rojano et al., 2013). El PM que se refiere a material particulado es una mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas que se encuentran en el aire, algunas de estas partículas pueden ser grandes, como hay otras que pueden detectarse sólo a través del uso de herramientas especiales para ello; entre el material particulado se puede encontrar PM_{2.5} las cuales son partículas finas e inhalables que tienen de diámetro $2,5\mu\text{m}$ y también se presentan PM₁₀ las cuales son partículas inhalables con un diámetro de $10\mu\text{m}$ o menor (EPA, 2023).

Dichas partículas pueden venir de diferentes fuentes y su composición puede ser de diferentes químicos, sin embargo, la mayoría se forma en la atmósfera como resultado de reacciones complejas de químicos que pueden incluir al dióxido de azufre y óxido de nitrógeno (EPA, 2023). El daño que tienen estas partículas en el ser humano está relacionado con la facilidad que tienen de ser inhalados y de llegar hasta los pulmones y el torrente sanguíneo.

De acuerdo con lo anterior, es necesario fortalecer el monitoreo en la concentración de material particulado pues a pesar de que Bogotá cuenta con 20 estaciones de monitoreo es una de las ciudades con mayor contaminación, ya sea por fuentes fijas o móviles, adicional a esto se encontró que en la localidad de Engativá se encuentran puntualmente solo dos estaciones de monitoreo las cuales son Ferias y Bolivia pertenecientes a la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá pertenecientes a la Secretaría Distrital de Ambiente, las cuales se rigen bajo la Resolución 2254 de 2017.

En relación a ello, el parque Juan Amarillo se encuentra ubicado en la localidad de Engativá, cerca de la estación de monitoreo Bolivia, en el barrio Ciudadela Colsubsidio, alrededor de este parque se presentaron diferentes conflictos pues está al lado del humedal Juan Amarillo y la comunidad suponía una alteración general del entorno y del ecosistema con su construcción, sin embargo al día de hoy es un parque que cuenta con más de $80,000\text{ m}^2$ y beneficia a diferentes personas ya sean residentes o personas que pasan por él, pues allí también se encuentra la ciclo ruta, en dicho parque se encuentran gimnasios al aire libre, canchas de fútbol, basquetbol, voleibol, espacio para juegos como el pin pon, parques para niños y en general es un espacio bastante amplio para la recreación y esparcimiento de la comunidad. Sin embargo, al ser un lugar público de gran afluencia y que desempeña un papel importante para los residentes locales y sus visitantes, es esencial conocer su calidad del aire y garantizar que sea un entorno seguro.

A continuación, se muestran una serie de fotografías sobre la zona de estudio.

Figura 2. Fotografías Parque Juan Amarillo



Como se pudo apreciar en las anteriores fotografías, es un espacio valioso para la comunidad ya que permite realizar y desempeñar diferentes actividades beneficiosas para su salud tanto física como mental ya que su entorno, permite una percepción de tranquilidad, no obstante su problemática central

se puede radicar en la falta de información y en general en estudios detallados sobre la calidad del aire en la zona y en especial en el entorno del Parque Juan Amarillo - Siete Canchas y en la necesidad de comprender la variación de los contaminantes PM2.5 y PM10 en factor a las horas y los días de la semana.

Esta falta de información limita la capacidad de tomar decisiones informadas tanto a autoridades ambientales como a grupos de interés de la zona, adicional no se encuentran líneas base más allá de las páginas de monitoreo en tiempo real que permitan entender la dinámica del material particulado y su concentración allí y así poder comprender más a fondo las necesidades u oportunidades de mejora para mantener o mejorar la calidad del aire de este lugar.

4. 1. Pregunta de investigación

Lo que motiva la realización de este trabajo de grado, es la necesidad de explorar y comprender la interacción entre la calidad del aire, específicamente los niveles de material particulado (PM2.5 y PM10) en el entorno del Parque Juan Amarillo - Siete Canchas. Este trabajo busca aportar un recurso de información que amplíe el conocimiento de un tema de valor como lo es la calidad del aire y que de igual forma sea un cimiento tanto para la construcción de investigaciones por parte de entidades autorizadas como para la formulación de estrategias que propendan por resguardar y cuidar el ambiente del parque, teniendo en cuenta los procesos que allí se desarrollan en cuanto al aire. Por dicha razón en este trabajo nos planteamos la siguiente pregunta. ¿Cómo afectan los factores meteorológicos y los patrones horarios a la concentración de material particulado (PM2.5 y PM10) en la zona de estudio, y de qué manera se pueden desarrollar estrategias efectivas de gestión ambiental para abordar esta influencia?

4. 2. Hipótesis

4. 2. 1. Nula:

La concentración de material particulado (PM2.5 y PM10) en la zona de estudio se ve influenciada por factores meteorológicos y patrones horarios, lo que respalda la importancia de establecer estrategias basadas en la gestión ambiental.

4. 2. 2. Alternativa:

La concentración de material particulado (PM2.5 y PM10) en la zona de estudio no se ve influenciada por factores meteorológicos y patrones horarios, lo que no respalda la importancia de establecer estrategias basadas en la gestión ambiental.

5. Justificación

La contaminación atmosférica se puede entender como la presencia en el aire de materiales los cuales comprometen la salud y el bienestar, generando riesgos de enfermedades y de degradación. La contaminación se puede generar por diferentes circunstancias, sin embargo, el crecimiento poblacional e industrial suponen una mayor presión en el ambiente, lo cual conlleva a que el monitoreo y observación de la calidad del aire sean convenientes (Aránguez et al., 1999).

En relación con lo anteriormente expuesto, la evaluación de la información de calidad de aire asociado a PM2.5 y PM10, permite interpretar y analizar de manera integral las problemáticas a las que un determinado lugar puede estar expuesto. La importancia de este trabajo radica en presentar la relación y la interpretación de cómo los contaminantes atmosféricos pueden tener incidencias en el ambiente y en la sociedad.

Desde el componente social, la importancia de este trabajo de grado se refleja desde la salud ambiental y el ODS 3, el cual hace referencia a salud y bienestar, pues la elección de los contaminantes atmosféricos PM2.5 y PM10 como objeto de estudio, se fundamenta en la reconocida asociación que tienen con afecciones respiratorias, además que el lugar elegido para interpretar dicha información es un lugar social y recreativo que se encuentra en medio de una zona residencial y natural, en donde a lo largo del tiempo se han presentado diferentes problemáticas por las intervenciones realizadas en su entorno, además de estar cerca de un ecosistema de importancia, por lo que comprender la interacción entre la calidad del aire y la salud humana sirve también como una herramienta de información y sensibilización a la comunidad sobre la importancia de abordar la contaminación atmosférica de manera integral y proactiva, además de promover una mejora en la calidad de vida, al comprender tendencias en las concentraciones de PM, pues se pueden identificar si en esa zona hay períodos con calidad del aire deficiente.

Finalmente, desde la ingeniería ambiental, permite abordar los efectos de la contaminación del aire de manera integral en un entorno que es urbano, pero también ecológico al estar cerca al Humedal Juan Amarillo, por lo que el desarrollo de este trabajo está asociado a la protección de la salud pública donde se pretende reportar tanto a las autoridades encargadas como a la comunidad sobre la información recolectada del momento en el que mayor exposición pueden tener al material particulado, pero también a la conservación de un ecosistema y la contribución a la gestión ambiental, además de establecer el cumplimiento de la normativa asociada al aire, que en este caso es la Resolución 2254 de 2017, la cual dicta los niveles máximos permitidos de los contaminantes anteriormente mencionados y relacionar de igual forma las recomendaciones establecidas por la Guía de la OMS sobre la Calidad del Aire 2021.

6. Objetivos

6.1. Objetivo general

Evaluar la concentración del material particulado (PM2.5 y PM10) para la gestión ambiental enfocada en la calidad del aire. Estudio de caso Parque Juan Amarillo- Siete canchas localidad de Engativá.

6.2. Objetivo específico

- I. Determinar el cumplimiento de la Resolución 2254 de 2017 y las recomendaciones de la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021 en relación con la concentración de los contaminantes PM2.5 y PM10 registrada por la estación Bolivia de la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá.
- II. Analizar la influencia de los factores meteorológicos en las concentraciones de PM10 y PM2.5 en la zona de estudio.
- III. Establecer patrones horarios en la concentración de PM2.5 y PM10 para la gestión ambiental, en la zona de estudio.

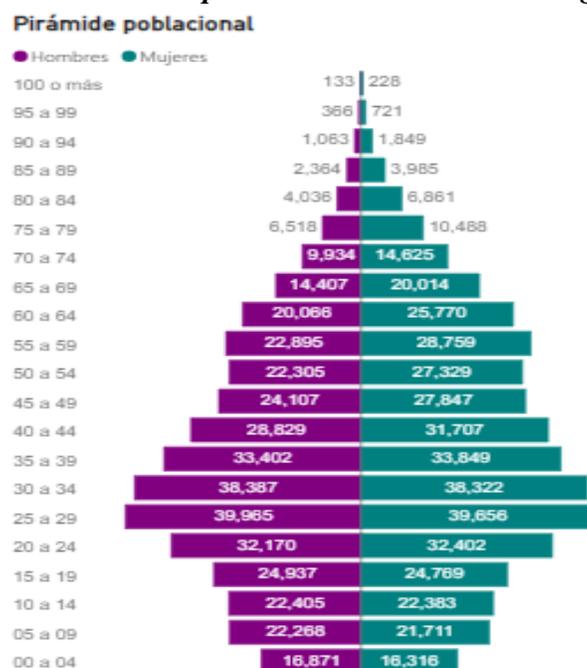
7. Marco de referencia

Las siguientes secciones proporcionarán una base sólida y un contexto teórico para comprender las cuestiones que se analizarán en detalle a lo largo del trabajo de grado, trazando un camino hacia un análisis más profundo y una contribución significativa.

7.1. Marco geográfico

El desarrollo del trabajo está enfocado en la localidad de Engativá, siendo la décima ¹ de cuerdo a la división por localidades de la ciudad de Bogotá D.C, la cual limita al norte con la localidad de Suba, separados por el río Juan Amarillo y el Humedal Jaboque; al oriente con las localidades de Barrios Unidos y Teusaquillo, divididos por la Avenida del Congreso Eucarístico; al sur con la localidad de Fontibón, donde las Avenidas José Celestino Mutis y Jorge Eliécer Gaitán marcan el límite; y al occidente con los municipios de Cota y Funza, con el río Bogotá como frontera. La topografía de Engativá es mayormente plana, con una ligera inclinación de oriente a occidente, lo que predominante es una tipología de valle aluvial. (Alcaldía local de Engativá,2023). Actualmente, tiene una población proyectada con un censo de 817,019 personas, donde hay más presencia de mujeres que hombres, como se puede observar en la pirámide población a continuación:

Figura 3. Pirámide poblacional Localidad de Engativá

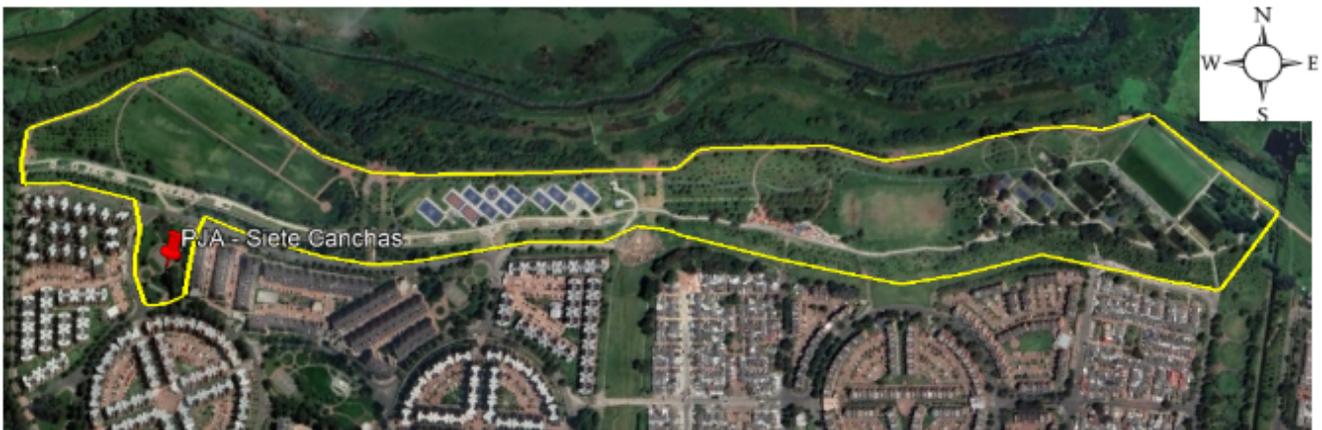


Fuente: OSB SaluData, 2023

¹ La ciudad de Bogotá D.C está dividida por 20 localidades, 19 urbanas y 1 rural, la cual Engativá tiene la décima posición.

Por otro lado, el estudio de caso se centra el Parque Juan Amarillo sector Siete Canchas, como se evidencia en la figura 4, construido por el Instituto Distrital de Recreación y Deporte ubicado en esta localidad al noroccidente de Bogotá D.C y al lado del Humedal Juan Amarillo en el barrio Ciudadela Colsubsidio, este parque cuenta con un espacio de más de 86 mil m^2 distribuido por senderos peatonales, ciclorruta, múltiples gimnasios y juegos cerca de 20 canchas para diferentes áreas de prácticas deportivas para que sean utilizadas aproximadamente por 150.000 usuarios (Alcaldía de Engativá,2023).

Figura 4. Parque Juan Amarillo - sector Siete Canchas.



Fuente: Google Earth, 2023.

Además, con la construcción del parque se logró optimizar el uso y aprovechamiento de esta área que previamente se consideraba como un parqueadero ilegal y debido a su amplia extensión del lugar, solía ser escenario de actividades ilícitas dando problemas de seguridad para la comunidad local (Figura 5). Así, se estableció una relación entre los aspectos ecológicos y sociales en beneficio del desarrollo urbano y la preservación del ecosistema.

Figura 5. Antes y después del Parque Juan Amarillo.



Fuente: Google Imágenes.

En este contexto, el trabajo de grado se llevará a cabo en la mencionada área, y para la recopilación de datos, se ha empleado la información provista por la estación de monitoreo de calidad del aire perteneciente a la RMCAB, más cercana a la ubicación de estudio, la cual corresponde a la Estación de Monitoreo Bolivia (Figura 7), ya que, se encuentra a 1.09 kilómetros del lugar de estudio. Esta estación se encuentra geográficamente ubicada en las coordenadas latitud $4^{\circ}44'08.9''N$ y longitud $74^{\circ}07'33.2''W$, siendo la más cercana al Parque Juan Amarillo-Siete Canchas (Figura 6).

Figura 6. Ubicación y distancia de la estación de monitoreo de calidad del Aire Bolivia (RMCAB) hasta el Parque Juan Amarillo- Siete Canchas.



Fuente: Google Earth, 2023.

Figura 7. Estación de monitoreo Bolivia.



Fuente: RMCAB, 2017.

7.2. Antecedentes del problema

Para la realización de este apartado, se seguirán investigaciones que se han hecho sobre el tema en estudio. Sin embargo, cabe resaltar que la búsqueda se ha limitado pues a pesar de que se encuentran diferentes estudios sobre calidad del aire enfocados en PM2.5 y PM10, no han sido relacionados con ecosistemas que se hayan intervenido y si ello produce alteraciones o no en el aire. A pesar de ello a continuación se refieren algunos estudios que se han hecho cercano a la zona de estudio como en otros lugares, pero que se pueden asociar con este.

En primer lugar para la localidad de Engativá se encuentra un primer estudio llamado "Diagnóstico de la incidencia del PM2.5 en la salud de los habitantes de la localidad de Engativá y propuesta de prevención y mitigación de los impactos adversos de la contaminación del aire en la salubridad de la zona" realizado por Chaparro Juan David en el año 2021, en donde a través de su tesis de grado reveló información relevante para el aporte conceptual y teórico de este trabajo, pues primero recolectó datos sobre la concentración de uno de los contaminantes criterio para el presente estudio, dando un histórico de cómo se ha comportado el PM2.5 a lo largo de los años 2010 al 2019, por lo que permite una visión más amplia sobre el comportamiento de dicho contaminante, además allí se identifica que no tuvo mayor incidencia con los números de casos de muertes por infecciones respiratorias en los habitantes de la zona, sin embargo si ha sido una localidad afectada por la presencia del contaminante, pues se ven mapas de dispersión de los barrios que componen la UPZ por lo que es una base para entender y analizar mejor, el lugar de estudio del presente trabajo. Entre las conclusiones más relevantes para este trabajo es que "La zona noroccidental (UPZ Engativá, zona norte de las UPZ Garcés Navas y Bolivia), occidental (borde occidental de las UPZ Álamos y Santa Cecilia) y suroccidental (UPZ Jardín Botánico) fue la superficie de la localidad de Engativá que presentó mayores cantidades de PM2,5, en el periodo estimado en el estudio" (Chaparro, 2021). Finalmente, como se mencionó anteriormente este estudio presenta una línea de tiempo general de la calidad del aire en cuanto PM2.5 que arroja resultados pertinentes para la discusión de este trabajo.

Otro estudio que se puede relacionar es "Evaluación del impacto en calidad del aire, asociado a resuspensión de material particulado por la pavimentación de la vía principal de Caracolí - Ciudad Bolívar, Bogotá D.C" realizado por Pinto Laura & Méndez Juan en el año 2015, allí se presenta información relevante para el aporte a la construcción de análisis de los resultados pues comparan e identifican la relación de PM2.5 y PM10, allí valoran de igual forma el impacto cuantitativo en la calidad del aire teniendo en cuenta el material particulado, tomando como referencia también condiciones meteorológicas, comparando el estado antes de pavimentar la vía y después de pavimentada, por lo que, brinda bases para realizar análisis de comparación antes y durante determinado evento, haciendo uso de herramientas SIG para evidenciar de mejor manera cómo alteró positiva o negativamente la pavimentación a su zona de influencia.

Entre otras investigaciones asociadas al objetivo del trabajo, se encuentra "Efecto de la vegetación en el nivel de contaminación atmosférica generada por material particulado en cañones urbanos" realizado por Vargas Tomas en el año 2021, en esta investigación se presentan bases interesantes pues se evalúa el efecto que tiene la presencia de vegetación en relación con el PM y su disminución en la contaminación, tomando como metodología el análisis de estudios recientes donde se evaluó la capacidad de captura de la vegetación de PM en entornos urbanos, en especial estudios que se enfoquen en la influencia de la vegetación en las concentraciones de PM en cañones urbanos, uno de sus resultados dice que la captación y reducción de la concentración de los contaminantes atmosféricos, ha sido aceptado como un servicio ambiental más ofrecido por la vegetación. Las plantas remueven los contaminantes y mejoran la calidad del aire absorbiendo gases vía sus estomas y remueven también por medio de la deposición de los contaminantes en la superficie de sus hojas o por procesos de dispersión (Montez, 2021).

Esto es relevante, pues la zona de estudio se encuentra rodeada de vegetación y demás al estar cerca también a un humedal pues cuenta con diversidad en cuanto a flora y fauna, por lo que se puede

analizar si la construcción del Parque Juan Amarillo cercano al humedal requirió la deforestación de algunas zonas y si ello se puede asociar a la posible alteración en la concentración del material particulado, articulado con otros factores, esto permite presentar una discusión y análisis pertinente e interesante sobre la relación que puede tener con el aire y su calidad.

7.3. Estado de arte

Esta sección comprende la recopilación de documentos afines con el tema central dividiéndolo a nivel global, regional y local, cabe resaltar que la búsqueda de información se ha soportado en bases de datos como Google académico, Scielo, Proquest, relacionando principalmente términos como: *Calidad del aire, material particulado, PM2.5 - PM10, zonas urbanos, zonas creativas* y de los resultados obtenidos se escogieron los más representativos, que servían como base tanto para plantear el problema de investigación, para los marcos y para la futura guía y construcción de la discusión y análisis de resultados. Es importante destacar que, al realizar la búsqueda de información para este apartado, se ha identificado una falta de conocimiento en un área específica. A pesar de que existen diversos estudios que se centran en la evaluación y análisis de la calidad del aire en relación con los contaminantes PM2.5 y PM10, existe una brecha significativa en la literatura en lo que respecta a la interacción entre la calidad del aire y las intervenciones en zonas de importancia ecosistémica.

Esta brecha resalta la necesidad de abordar desafíos actuales que involucran la integración de servicios ecosistémicos de diferentes ecosistemas con la calidad de los recursos, como el aire. Esta integración es esencial para fortalecer y ampliar nuestro conocimiento sobre la importancia de conservar entornos naturales y comprender cómo las intervenciones humanas pueden alterar las dinámicas naturales que estos ecosistemas proporcionan.

A medida que evolucionamos hacia una mayor atención y monitoreo de la calidad del aire, es crucial ampliar nuestra percepción y llevar a cabo estudios que busquen comprender mejor la relación entre la calidad del aire y los ecosistemas. Por lo tanto, este trabajo se centrará en abordar esta brecha de conocimiento específica al analizar la calidad del aire en la zona del Parque Juan Amarillo y su relación con factores ecológicos integrando de igual manera el factor social en ese dicho entorno.

En la siguiente tabla se presentan de manera sintetizada diferentes recursos encontrados en diferentes países y regiones nacionales y locales, que se pueden enlazar para un desarrollo completo de este trabajo.

Tabla 1. Estado del arte

Investigación	Año	Título	Autor (es)	Tema de investigación	Contribución

A nivel Global	2022	Análisis de la calidad de aire (PM10) influenciada por la obra civil en la parroquia tarqui de guayaquil, 2022	Mora Solis Andres Steven	Esta investigación revisa en primer lugar el cumplimiento de la normatividad por parte de la empresa constructora, realizando seguimientos a las estaciones de monitoreo cercanas a la zona	Marco teórico - conceptual, discusión y resultados Esta investigación presenta información que en primer lugar puede servir como base para la construcción de análisis y discusión, además se pueden tomar en cuenta para las teorías y justificación.
	2020	Análisis del sistema socio-ecológico del estuario Bahía Blanca (Argentina) y su impacto en los servicios ecosistémicos y el bienestar humano	María Angeles Speake, María Elizabeth Carbone, Carla Vanesa Speer	Es un artículo en el cual se habla de los humedales costeros y destacan su importancia bajo la metodología integral. el cual se basó en el marco conceptual de la Evaluación de Ecosistemas del Milenio (EM), diseñado por la Organización de Naciones Unidas arrojando como resultado que la presión que se ejerce sobre estos ecosistemas tiene como resultado, problemas de salud derivados de la calidad del aire, entre otros.	Marco teórico conceptual, discusión y análisis de resultados. Dicho artículo puede servir como referencia para la comparación de la importancia de la preservación de los humedales y evaluar como la construcción en ellos puede afectar en la concentración de contaminantes.
	2021	Influencia de las zonas verdes urbanas y de viario público en la calidad del aire de Sevilla: una	Pomares Zambrano, Lucas.	En este trabajo, se llevaron a cabo análisis de información sobre la calidad del aire y datos relacionados	Discusión de resultados - conclusiones La guía de este trabajo permitirá

		visión desde el bienestar social		con la vegetación, con el propósito de desarrollar modelos predictivos para la concentración de contaminantes. Estos modelos tienen como finalidad respaldar la toma de decisiones orientadas hacia el diseño urbano sostenible y respetuoso con el medio ambiente.	relacionar la contaminación atmosférica con la importancia de la vegetación con la concentración atmosférica y así relacionar estos factores con los resultados obtenidos.
A nivel regional	2016	Dispersión de material particulado (PM10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos.	Arrieta Fuentes Javier	En este trabajo de investigación, se evaluó la dispersión de PM10 por medio de modelación de software para visualizar el comportamiento y realizar su respectiva mitigación o control.	Discusión y análisis de resultados. Este documento, permitirá obtener información relevante en cuanto al comportamiento del PM10.
		Análisis espacial de las concentraciones de PM2.5 en Bogotá según los valores de las guías de la calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud para enfermedades cardiopulmonares, 2014-2015	Laura Andrea Rodríguez Ronald Jackson Sierra Luis Camilo Blanco	Su tema de investigación relaciona la concentración de PM2.5 en localidad de Bogotá, donde relacionan lo establecido por la OMS	Discusión de resultados. El principal aporte de este trabajo es la relación con lo establecido por la OMS con los niveles encontrados de PM2.5 y su articulación
A nivel local	2018	Evaluación de la	Tarazona	En este trabajo de	Marco teórico -

		calidad de aire por emisiones de material particulado (pm10) en la vereda mochuelo-alto Bogotá D.C	Rincón Paula Andrea	investigación, se evaluó la calidad del aire desde el criterio contaminante (PM10) en la estación de Mochuelo Alto Bogotá Rural durante el año 2017, con el objetivo de realizar una comparación en dos tiempos y frente a la normativa colombiana y así analizar los posibles efectos en la salud.	conceptual, discusión de resultados. El documento aporta información relevante en cuanto a términos, conceptos, normativas, en cómo crear datos numéricos en estadísticos y presentar argumentos sobre la problemática.
2019		Estrategias de recuperación y conservación de la zona de amortiguamiento del humedal Juan Amarillo, intervenida por el “proyecto parque Juan Amarillo”, en área de influencia de los barrios cortijo y ciudadela Colsubsidio de la localidad de Engativá	Carolina Torres García	El objetivo principal de este trabajo es evaluar los impactos generados por la construcción de las obras civiles del proyecto “Parque Juan Amarillo” en el Humedal Juan Amarillo, para generar una estrategia de recuperación y conservación.	Marcos de referencia, discusión de resultados. El documento aporta en dar una guía de lineamientos e información de otros estudios, puesto que la ubicación a trabajar es la misma.

7.4. Marco teórico - conceptual

Para el desarrollo de este apartado se abordarán diferentes conceptos principales, como las diferentes teorías que soportan la base para realizar satisfactoriamente el presente trabajo de grado.

Calidad del aire:

El aire es un recurso natural esencial para la vida de todos los seres vivos. Garantizar su calidad es fundamental para mantener la salud y el bienestar físico de las personas, ya que depende de la pureza del aire que se respira; ya que una o más sustancias químicas en concentraciones elevadas en la atmósfera pueden causar daños irreversibles en la salud de los seres humanos, animales y la vegetación (EPA, 2023); Ya que la contaminación del aire representa un riesgo medioambiental, la carga mundial de morbilidad asociada con la exposición a la contaminación del aire tiene un gran impacto para la salud humana en todo el mundo pues se calcula que la exposición genera en cada año millones de muertes (OMS, 2022). La contaminación del aire ha cobrado gran reconocimiento a nivel global, ejemplo de ello en septiembre del 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas adoptó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, referencias hacia el aire, las cuales se pueden encontrar en la meta 3, 7 y 11 (OPS, 2016).

Actualmente la calidad del aire se ha degradado cada vez más, producto del crecimiento poblacional y el desarrollo industrial desmedido, con base en ello y para abordar esta crisis de contaminación atmosférica los gobiernos de cada país deben tomar medidas para la regulación de la calidad y la vigilancia de los contaminantes atmosféricos (ONU, 2022).

En relación con ello es primordial abordar en primer lugar que son los contaminantes atmosféricos.

Contaminantes atmosféricos: Hacen referencia a la presencia de partículas muy pequeñas imperceptibles a simple vista, productos gaseosos secundarios resultados de diversos procesos; esta contaminación se puede generar a grandes rasgos en procesos industriales con combustión que serían fuentes de emisión fijas y por fuentes móviles los cuales son automóviles (IDEAM, 2023)

Adicional a ello, cabe mencionar que la contaminación también es específica según el contexto del lugar por lo que otras fuentes incluyen el consumo doméstico de energía para cocinar y calentarse, los vehículos de combustión, la generación de energía, la incineración de residuos y desechos agrícolas, entre otros (OMS, 2022).

Los contaminantes principales que se generan en las actividades que se mencionaron anteriormente son, Monóxido de Carbono (CO), Óxidos de Nitrógeno (NO, NO₂, NO_x), Dióxido de Azufre (SO₂) y Material Particulado (PM); cabe resaltar que cada uno de ellos genera alteraciones tanto en el ambiente como en la salud humana.

No obstante, en este trabajo se le da mayor relevancia al **material particulado**, el cual es de lo más común, y se entiende como la mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas que se encuentran en el aire. Algunas de dichas partículas, ya sea el polvo, humo, hollín, son lo suficientemente grandes y se pueden ver a simple vista, pero existen otras que son tan pequeñas que solo se pueden percibir mediante el uso de instrumentos (EPA, 2023).

La contaminación por PM incluye **PM_{2.5}** y **PM₁₀**; El primero son partículas inhalables finas que tienen diámetro de 2.5µm y menores, mientras que el segundo son partículas inhalables que tienen diámetros de 10 µm y menores (EPA, 2023). La fuente de generación de estos contaminantes se puede encontrar en diferentes escenarios como obras de construcción, caminos sin terminar, incendios, entre otros. Su forma en la atmósfera se da como resultado de reacciones complejas de químicos, como el

dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno, que son contaminantes emitidos por centrales eléctricas, industrias y automóviles (EPA, 2023).

Con base en lo anterior, su relevancia en materia de calidad del aire se debe entre otras cosas a los daños causados en la salud pública ya que al estar compuestos de diferentes químicos y ser inhalables causan daños al ser humano desde problemas pulmonares hasta llegar al torrente sanguíneo, es por esto que es necesario implementar medidas para reducir los niveles de contaminación con el material particulado, pero también para el monitoreo; De esta forma a nivel mundial, por ejemplo, la OMS plantea directrices mundiales sobre la calidad del aire, allí se dan recomendaciones relacionadas con la gestión de dicho recurso.

Dado que, cada día la contaminación atmosférica y calidad del aire toma mayor relevancia, en Colombia, específicamente en Bogotá el monitoreo está a cargo de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (Secretaría Distrital de Ambiente, 2023).

RM CAB: Se encarga de vigilar las concentraciones de contaminantes criterio (material particulado de diámetro menor a 10 y 2.5 micras - PM10 y PM2.5, Ozono - O3, dióxido de azufre - SO2 y dióxido de nitrógeno - NO2 y monóxido de carbono - CO), de black carbón (o carbono negro) y variables meteorológicas (precipitación, temperatura, presión atmosférica, radiación solar, velocidad y dirección del viento), por medio de las veinte (20) estaciones instaladas en diferentes lugares de la ciudad. (Secretaría Distrital de Ambiente, 2023)

Las estaciones de monitoreo están conformadas por monitores, analizadores y sensores automáticos que recolectan datos periódicamente, ya sean diarios, semanales, mensuales, anuales o personalizados sobre el estado de la calidad del aire en Bogotá (Secretaría Distrital de Ambiente). En especial en este trabajo de grado se evaluó los datos de la estación de monitoreo de Bolivia, la cual tiene las siguientes características:

Tabla 2. Características generales de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá

Características	Sigla	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Altura	Localidad	Tipo de zona	Tipo de estación	Dirección
Bolivia	Bol	4°44'08.9"N	74°07'33.2"W	2574	0	Engativá	Suburbana	De fondo	Avenida Calle 80 # 121-9

Fuente: Secretaría Distrital de Ambiente, 2023.

De esta manera, se considera el tipo de zona como la distribución o densidad de la edificación. En el caso de la estación de Bolivia, se clasifica como suburbana, lo que significa que combina áreas urbanas (como los conjuntos residenciales), con zonas no urbanas, es decir, áreas verdes (como el Parque Juan Amarillo - Siete Canchas), cuerpos de agua (como el Humedal Juan Amarillo), bosques y otros elementos. Esto coincide con la descripción de la ubicación de la estación. Por otro lado, el tipo de estación varía en función de las emisiones, y en este caso, se clasifica como "De fondo", esto indica que las estaciones de este tipo están estratégicamente ubicadas de manera que los niveles de contaminantes medidos no se ven afectados por las calles de alto tráfico, sino que están influenciados por el patrón de vientos (Montoya,2014).

Teniendo en cuenta lo anterior, los datos que reportan de la RMCAB son los siguientes:

Tabla 3. Datos reportados por RMCAB

Contaminantes							Variables meteorológicas			
Nombre estación	PM10	PM2.5	O ₃	NO ₂	CO	SO ₂	V. Viento	D. Viento	Temperatura	Presión atm
Bolivia	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Fuente: Secretaría Distrital de Ambiente,2023.

Para la visualización de los datos recolectados por las estaciones existe un sitio web donde se proyectan valores asociados a concentraciones y demás parámetros representados por tablas y gráficas (Secretaría Distrital de Ambiente, 2023). Dichas representaciones también muestran los indicadores del IBOCA.

IBOCA: Índice Bogotano de Calidad del Aire y Riesgo en Salud, el cual define y orienta la activación de alertas y emergencias por contaminación del aire en la ciudad. (Secretaría Distrital de Ambiente, 2023)

El valor de IBOCA se relaciona con intervalos de concentración de contaminantes específicos, que se miden a nivel internacional como estándar para evaluar la contaminación y que se relacionan de forma simple con afectaciones a la salud y el ambiente. (Secretaría Distrital de Ambiente,2023)

Figura 8. Índice Bogotano de Calidad del Aire

Atributos del IBOCA				(5) Intervalos de concentración para cada contaminantes y tiempo de exposición del IBOCA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ⁽³⁾					
(1) Intervalos de valores adimensionales ⁽¹⁾	(2) Color	(3) Estado de calidad del aire	(4) Estado de actuación y respuesta	PM 10 (24h)	PM 2.5 (24h)	CO (8h)	SO2 (1h)	NO2 (1h)	O3 (8h)
0 - 50	Verde	Favorable	Prevención	0-54	0-12	0-5094	0-92	0-100	0-106
51 - 100	Amarillo	Moderada	Prevención ⁽²⁾	55-154	12.1-35.4	5095-10818	93-197	101-188	107-137
101 - 150	Naranja	Regular	Alerta Fase 1	155-254	35.5-55.4	10819-14253	198-485	189-677	138-167
151 - 200	Rojo	Mala	Alerta Fase 2	255-354	55.5-150.4	14254-17688	486-796	678-1220	168-206
201 - 300	Morado	Peligrosa	Emergencia ⁽³⁾	355-604	150.5-250.4	17689-34861	797-1582	1221-2349	207-392
301 - 500				425-604	250.5-500.4	34862-57703	1583-2681	2350-3853	-----

Fuente: Secretaría Distrital de Ambiente, 2023.

Ahora bien, los resultados de los datos registrados en las estaciones de monitoreo varían dependiendo de la ubicación y de los sitios o proyectos que se encuentren cerca de ellas, es decir, que existan zonas industriales, avenidas concurridas, zonas verdes, obras civiles, entre otras. Pues dichas actividades pueden generar una mayor concentración del PM o por el contrario que los contaminantes no se registran en valores muy altos.

Lo anterior hace referencia también a la existencia de ecosistemas o zonas verdes recreativas como es el **Parque Juan Amarillo - Siete Canchas** las cuales ayudan a la regulación, absorción, filtración entre otros de los contaminantes atmosféricos y de su concentración, pues gracias a sus servicios, se logran dinámicas que mejoran y ayudan a la calidad del aire, sin embargo, con los procesos de crecimiento y expansión urbana, dichos ecosistemas se pueden ver afectados (Guerra & Mancera, 2015).

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, la calidad del aire a nivel nacional está regido principalmente por la **Resolución 2254 de 2017**, encargada de establecer las normas y otras disposiciones para la gestión del recurso aire en todo el territorio nacional, asegurando un entorno saludable, reduciendo al mínimo la exposición para la salud humano por la exposición a los contaminantes atmosféricos (Ministerio de ambiente, 2017). Por otro lado, a nivel internacional existen directrices que identifican los niveles de calidad del aire al nivel global como es la **Guía de la OMS sobre la Calidad del Aire OMS 2021**, proviniendo información actualizada orientada en ayudar a reducir los niveles de contaminantes del aire protegiendo la salud mundialmente (OMS, 2021).

El Distrito Capital establece que las estrategias representan lineamientos para la **gestión ambiental**, dichas estrategias son acciones con el propósito de mantener el control, seguimiento, mitigación y/o prevenir problemáticas ambientales y forman parte integral del **Plan Ambiental Local**, el cual tiene la finalidad de la identificación, implementación y evaluación de medidas reguladoras específicas destinadas a gestionar las interacciones entre la sociedad y el ambiente (Alcaldía Local de Engativá, 2023).

7.5. Marco normativo y legal

En esta sección, es fundamental destacar los actos normativos más relevantes relacionados con el trabajo de grado y su investigación, ya que proporcionan un respaldo esencial para abordar y plantear cada aspecto a mejorar:

Tabla 4. Normativa colombiana

Normatividad	Entidad	Contenido
Resolución 2254 de 2017	Ministerio de Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial	Adopta la norma de calidad del aire dictando otras disposiciones, el nivel de inmisión para la gestión del recurso aire en el territorio nacional garantizando un ambiente sano minimizando la exposición sobre la salud humana.
Política de prevención y control de la contaminación del aire	Política de prevención y control de la contaminación del aire	Impulsar la gestión de la calidad del aire, a través de actividades agrupadas alrededor de metas que puedan ser medibles para proteger la salud y el bienestar humano.
Guía de Calidad del Aire OMS 2021	Organización Mundial de la Salud	Directrices sobre información actualizada para el mejoramiento y reducción de los contaminantes de la calidad del aire a nivel global en pro del cuidado de la salud humana.
CONPES 3943	CONPES	Política para el mejoramiento de la calidad del aire
Estrategia Nacional de Calidad del Aire	Ministerio de Ambiente	Define el mejoramiento de la calidad del aire con el objetivo de reducir el material particulado en áreas urbanas, garantizando la protección del ambiente y la salud pública.

7.6. Marco institucional

En esta sección, se presentan las entidades involucradas en el desarrollo de la investigación del trabajo de grado:

Tabla 5. Instituciones colombianas

Institución / Función/ Logo	
Alcaldía Mayor de Bogotá	 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.
Tiene la responsabilidad de liderar, orientar y vigilar la defensa y protección de los derechos constitucionales de los ciudadanos en todo el territorio distrital.	 BOGOTÁ HUMANANA
Red de Monitoreo de Calidad de Aire	 RMCAB Red Monitoreo de Calidad de Aire
Tiene la responsabilidad de generar información para evaluar y vigilar el estado de la calidad del aire con respecto a las concentraciones de los contaminantes criterios (PM10, PM2.5, Ozono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono) junto con variables meteorológicas (precipitación, temperatura, presión atmosférica, radiación solar, velocidad y dirección del viento), las cuales se ejecuta por medio de las veinte (20) estaciones instaladas en diferentes lugares de la ciudad.	
Secretaria Distrital de Bogotá	 BOGOTÁ Secretaría Distrital de Desarrollo Económico
Tiene la responsabilidad de guiar, supervisar y ejecutar cualquier plan, programa o proyectos que se ejecute en el Distrito Capital asegurando los derechos y responsabilidades de la comunidad.	
Secretaría Distrital de Ambiente	 SECRETARÍA DE AMBIENTE
Tiene la responsabilidad de gestionar, mantener y mantener las entidades del distrito o de autoridades ambientales para la ejecución de proyectos o programas que se enfoquen en el desarrollo sostenible, la protección y defensa del ambiente, ecosistemas y los recursos naturales.	
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	 MINAMBIENTE
Tiene la responsabilidad de garantizar el uso sostenible, planificación ambiental del territorio y definir políticas hacia la recuperación, conservación y protección del territorio.	

Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C

8. Metodología

En esta sección, se abordará la fase metodológica del trabajo de grado, la cual se dividió en dos secciones. La primera parte, se enfoca en el diseño metodológico abordando aspectos importantes para la investigación; Y una segunda parte, en donde se observa el plan de trabajo seguido para alcanzar cada objetivo específico.

8.1 Diseño metodológico

En este trabajo de grado se planteó una metodología con un alcance, enfoque y método de investigación, con el fin de alcanzar el cumplimiento de los objetivos planteados anteriormente. En su desarrollo, se realizó una revisión bibliográfica que aportó a la investigación, como son documentos, bases de datos de la Universidad El Bosque, Google académico y para delimitar la búsqueda se utilizó tesauros como: Calidad del aire, Contaminante atmosféricos, Normativa Vigente, entre otros.

8.1.1. Enfoque de la investigación

El presente trabajo está guiado por un enfoque mixto, ya que, se considera cualitativo porque se empleó la recolección y análisis de datos y búsqueda literaria para su interpretación, y cuantitativa porque estos datos hallados deben ser manejados para lograr resolver dichos objetivos planteados (Hernández, et. al., 2010).

8.1.2. Alcance de la investigación

Está guiado con un alcance descriptivo, puesto que permite mostrar datos pertinentes acerca de la generación de los contaminantes atmosféricos PM2.5 y PM10 y analizarlos, y también un alcance explicativo porque permite evaluar dichas causas e informar a la comunidad (Hernández, et. al., 2010).

8.1.3 Matriz metodológica por objetivos específicos

Teniendo en cuenta lo anterior, en la tabla 4 se evidencia la matriz metodológica donde incluye objetivos, actividades, técnicas e instrumentos y resultados esperados por objetivo

Tabla 6. Matriz metodológica

Objetivos			Actividades	Técnicas	Instrumentos	Resultado esperado
General	Específico					
Evaluar la concentración del material	Determinar el cumplimiento de la Resolución		Recolección de datos de las concentraciones	Comparar los datos recopilados	Excel Página Web de la	Indicar si hay o no un incumplimiento de la

<p>particulado (PM2.5 y PM10) para la gestión ambiental enfocada en la calidad del aire. Estudio de caso Parque Juan Amarillo-Siete canchas localidad de Engativá.</p>	<p>2254 de 2017 y las recomendaciones de la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021 en relación con la concentración de los contaminantes PM2.5 y PM10 registrada por la estación Bolivia de la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá.</p>		<p>es de PM2.5 y PM10 de la estación de monitoreo Bolivia.</p> <p>Procesamiento de los datos obtenidos.</p> <p>Revisión de la normativa nacional y la guía de la OMS.</p>	<p>dos con los límites establecidos por la normativa nacional y la guía.</p>	<p>RMCAB</p> <p>Resolución 2254 de 2017</p> <p>Guía de Calidad del Aire OMS 2021</p>	<p>resolución.</p> <p>Grado de cercanía a las recomendaciones de la OMS 2021.</p>
	<p>Analizar la influencia de los factores meteorológicos en las concentraciones de PM10 y PM2.5 en la zona de estudio.</p>		<p>Revisión bibliográfica</p> <p>Visita al Parque Juan Amarillo - Siete Canchas.</p>	<p>Análisis de la información.</p> <p>Observación directa</p>	<p>Base de datos de información de meteorología a trabajos o artículos relacionados con el tema.</p> <p>Datos RMCAB</p> <p>Registro fotográfico</p>	<p>Identificar qué factores meteorológicos están involucrados con la zona y su afectación positiva o negativa de las concentraciones de los materiales particulados.</p>

	Establecer patrones horarios en la concentración de PM2.5 y PM10 para la gestión ambiental, en la zona de estudio.		<p>Recopilación y procesamiento de los datos.</p> <p>Creación de gráficas anuales 2021-2022 de comportamiento de una semana típica de las concentraciones y calendario de comportamiento horario.</p> <p>Revisión del Plan Ambiental de la localidad de Engativá</p>	Análisis de los datos.	<p>Revisión bibliográfica</p> <p>Excel</p>	<p>Obtener patrones horarios de las concentraciones de PM2.5 y PM10</p> <p>Establecer estrategias a partir de la gestión ambiental.</p>
--	--	--	--	------------------------	--	---

8.1.4 Unidad de análisis

La unidad de análisis del presente trabajo de grado se centró en la ciudad de Bogotá, específicamente en la localidad de Engativá en el Parque Juan Amarillo - Siete Canchas en el barrio Ciudadela Colsubsidio, con el objetivo de evaluar la concentración del material particulado en el aire en la zona de estudio.

8.1.5 Población y muestra

Para esta investigación la muestra de población son la comunidad cercanos al Parque Juan Amarillo - Siete Canchas y habitantes del barrio Ciudadela Colsubsidio.

Para el análisis de información recolectado de la estación de monitoreo se tendrá en cuenta los datos de la estación BOL - Bolivia, recopilando la información de la siguiente manera:

Monitores de medición de PM10 y PM2.5 en la localidad de Engativá desde el 01 de enero de 2021 hasta el 31 de diciembre de 2021, posteriormente 01 de enero de 2022 hasta el 31 de diciembre de 2022, este rango de fechas se escogió teniendo en cuenta que en primer lugar la estación reporta datos desde el 16 de octubre de 2020, sin embargo, para efectos más similares de la comparación en los análisis se escogieron dichos ambos ya que se arrojaron los datos completos de este periodo. De la misma forma este rango se eligió ya que permite obtener el rango diario por hora de todos los días del año para plantear las relaciones y comparaciones planeadas.

Al descargar los reportes se obtuvieron 17.552 datos con mediciones diarias y por cada día distribuido en 24 horas de mediciones de PM10 y PM2.5, de esta forma los datos corresponden al reporte por hora de cada día registrada por la estación.

Figura 9. Consulta de monitoreo de PM10 y PM2.5 RMCAB estación Bolivia - Localidad de Engativá

Fuente: RMCAB, 2023
Figura 10. Estación de monitoreo Bolivia - Fuente IBOCA



Fuente: IBOCA, 2023

8.1.6 Limitaciones de la investigación

La investigación se desarrolló a través del análisis de datos de material particulado obtenidos de la Estación de Monitoreo RMCAB Bolivia, abarcando un período de 713 días en los años 2021 y 2022 para PM10 y 730 días para PM2.5. No obstante, es necesario resaltar que, a pesar de la amplitud de datos proporcionados por la estación, que se presentan en la (Figura 9), no se incluyeron registros de la dirección y velocidad del viento directamente de la estación Bolivia, pues aunque inicialmente la estación cuenta con las características para registrar los datos, no fue posible obtenerlos de allí, es por esto que a manera indicativa y para contar con los datos anteriormente mencionados y obtener la rosa de viento se procedió a recopilar estos registros a partir de la estación de monitoreo Las Ferias, la cual se encuentra de igual manera en la localidad de Engativá y es la más cercana a la estación de Bolivia, por lo cual los resultados que se presentaron para el apartado del viento, fue guiado por la mencionada estación.

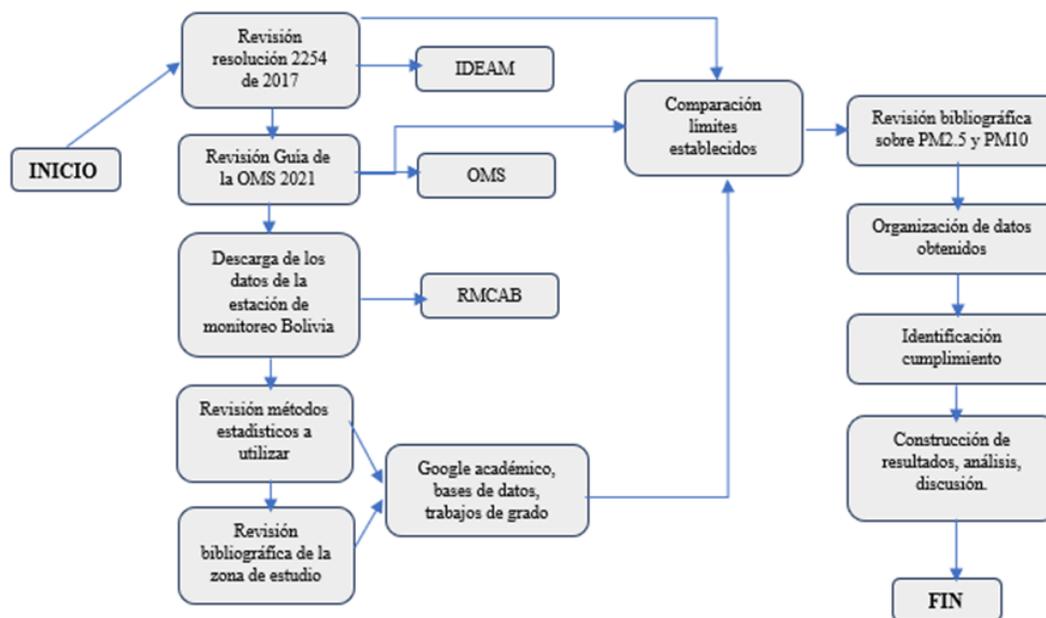
8.2. Plan de trabajo

A continuación, se describe el método que se realiza para darle cumplimiento a los objetivos específicos planteados para el trabajo de grado.

8.2.1 Metodología por objetivo

- **Método para el objetivo específico I:** Determinar el cumplimiento de la Resolución 2254 de 2017 y las recomendaciones de la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021 en relación con la concentración de los contaminantes PM2.5 y PM10 registrada por la estación Bolivia de la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá

Figura 11. Diagrama de la metodología objetivo específico uno



El primer objetivo específico se enfocó en una serie de pasos metodológicos para abordar de manera integral el análisis de la calidad del aire en la zona del Parque Juan Amarillo - Siete Canchas. Inicialmente, se llevó a cabo la recolección de datos de concentración de material particulado obtenidos por la estación de monitoreo Bolivia. Estos datos se relacionaron directamente con el cumplimiento de la Resolución 2254 de 2017 y el grado de cercanía a las recomendaciones de la Guía de la OMS sobre la Calidad del Aire 2021, la cual establece los estándares de calidad del aire aplicables.

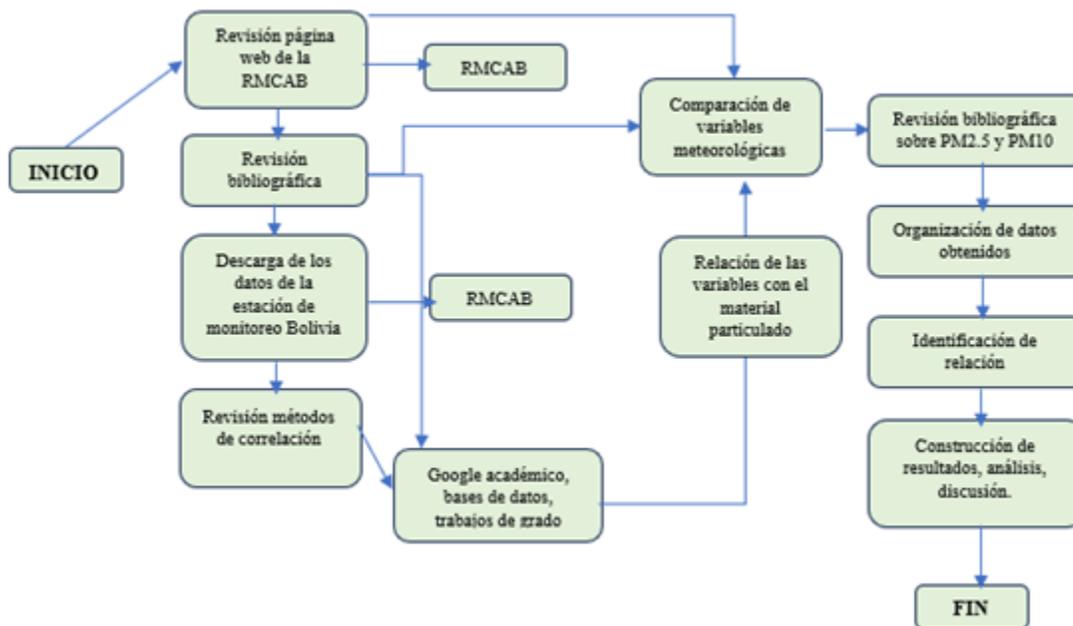
Una vez recopilados los datos, se procedió a realizar un análisis minucioso y exhaustivo con el objetivo de determinar si los niveles de los contaminantes criterio se ajustan a los límites establecidos por la mencionada resolución. Este análisis permitió identificar cualquier posible incumplimiento de los estándares de calidad del aire.

La interpretación de los datos resultantes fue fundamental en este proceso. Se buscó comprender cualquier discrepancia o irregularidad detectada, y se evaluaron las posibles consecuencias de tales inconvenientes o incumplimientos. Este análisis aportó información valiosa para comprender el impacto de la calidad del aire en la zona de estudio y sus posibles implicaciones para la salud pública y el medio ambiente.

En resumen, este objetivo específico se basó en una metodología estructurada que abarca desde la recolección de datos hasta su debida interpretación contribuyendo así a una comprensión integral de la calidad del aire y su relación con la normativa nacional y la guía de la OMS del 2021.

- **Método para el objetivo específico II:** Analizar la influencia de los factores meteorológicos en las concentraciones de PM10 y PM2.5 en la zona de estudio.

Figura 12. Diagrama de la metodología objetivo específico dos



Para llevar a cabo el segundo objetivo específico, se empleó una metodología que implicó, que en primer lugar se revisará cuáles variables meteorológicas se miden en la estación de monitoreo elegida, para esto se revisó la página oficial de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de Bogotá y con base en ello se eligieron cuáles serían las que se tendrán en cuenta para el desarrollo, a partir de esto se eligieron la dirección y velocidad del viento, la temperatura y precipitación, ya que la humedad relativa, la radiación solar y la presión atmosférica según la página web no se miden o no se tienen en cuenta.

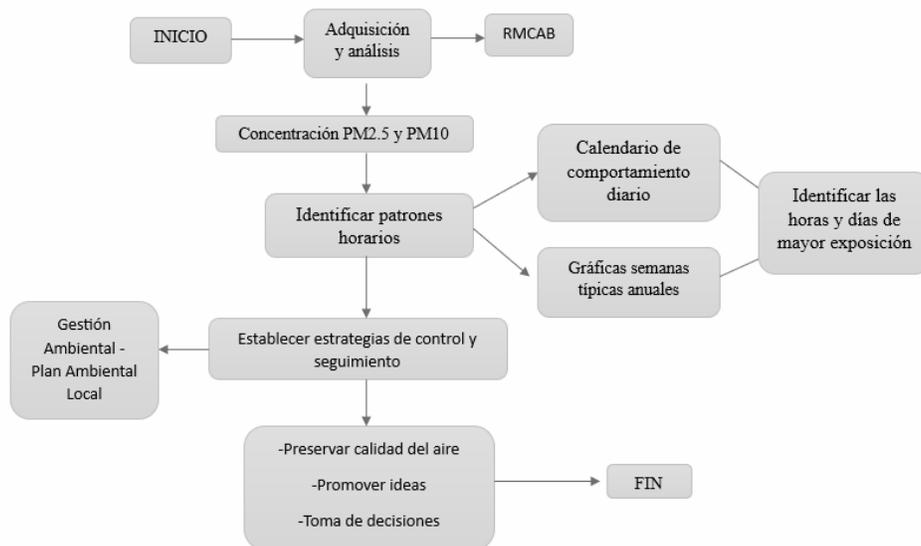
Una vez se plantearon las variables se procedió a descargar y analizar la información, sin embargo, se encontró que la estación no tiene reporte de variables meteorológicas, más que de la precipitación, por lo que, se revisó en primera instancia que significan cada una y a partir de esto, revisar los informes anuales de la RMCAB para revisar cómo se planteaban allí dichas variables en relación con la estación. Este análisis se realizó de forma comparativa con los resultados obtenidos en el primer objetivo para identificar alguna relación indirecta.

También se planteó desarrollar el coeficiente de correlación para la única variable que se mide en la estación actualmente, sin embargo, los datos no permiten plantear una relación significativa ya que la mayoría de los datos son 0mm o no se tomaron los datos ya que se presentan con tres guiones cuando no había registro (---) en cuanto a la precipitación, por lo que se comparó a lo largo del objetivo los reportes con lo encontrado.

Finalmente, se descargó la rosa de contaminantes para así entender el comportamiento de los contaminantes y de qué dirección proviene teniendo en cuenta la estación de monitoreo Bolivia, ya que la estación si reporta dicha rosa, más no la de viento por lo que para tener guía sobre este apartado se procedió a comparar y tomar como referencia lo suministrado por la estación de monitoreo Las Ferias.

- **Método para el objetivo específico III:** Establecer patrones horarios en la concentración de PM2.5 y PM10 para la gestión ambiental, en la zona de estudio.

Figura 13. Diagrama de la metodología objetivo específico tres



El tercer objetivo específico se enfocó en la adquisición y análisis de datos de PM2.5 y PM10, con el propósito de identificar patrones horarios en las concentraciones de material particulado.

En primer lugar, se recopilaron datos de PM2.5 y PM10 de la estación de monitoreo de calidad del aire cercana a la ubicación de estudio a lo largo de un periodo definido. Estos datos se organizaron en franjas horarias específicas a modo de calendario (Ver anexos 3 y 4).

Además se organizaron los datos teniendo en cuenta los días de la semana, por ejemplo para un día específico como el lunes se organizaron todos los datos de concentración de los lunes del año por horas desde la una de la mañana hasta las doce de la noche y así sucesivamente con los demás días, lo que permitió segmentar las concentraciones por horas y por días y a continuación, se generó una gráfica anual para el año 2021 y 2022 las cuales mostraron las concentraciones de material particulado, según una semana típica, teniendo en cuenta la hora del día.

Lo anterior, facilitó la identificación de tendencias y patrones horarios. Estos datos procesados se compararon con los informes anuales proporcionados por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), lo que ayudó a determinar si existen diferencias significativas en las concentraciones de PM2.5 y PM10 en momentos específicos de los años o si por el contrario la concentración es similar en cantidad y en los días y así se identificaron los momentos de mayor exposición a concentraciones elevadas de material particulado.

Finalmente, se propusieron estrategias de control y seguimiento, siguiendo el Plan Ambiental de la localidad y los procesos de gestión ambiental, con la consideración de la participación de la comunidad en la toma de decisiones relacionadas con la calidad del aire en la ubicación de estudio. Esta metodología proporcionó un enfoque completo y participativo para el logro de este objetivo.

9. Resultados y análisis de resultados

A continuación, se expondrán los resultados y análisis correspondientes a cada uno de los objetivos específicos, con el propósito de responder la pregunta de investigación y alcanzar el objetivo general del trabajo de grado.

9.1. Objetivo específico I: Determinar el cumplimiento de la Resolución 2254 de 2017 y las recomendaciones de la Guía de la OMS de la Calidad del Aire de 2021 en relación con la concentración de los contaminantes PM2.5 y PM10 registrada por la estación Bolivia de la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá.

Para el cumplimiento del objetivo se tuvo en cuenta la información publicada en la plataforma web de la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá D.C (RMCAB), en específico de la estación de monitoreo Bolivia, la cual fue clave para determinar la concentración de PM2.5 y PM10, por ello para realizar el análisis se recolectaron los datos en una serie de tiempo de 24 horas y mensual para los años 2021 y 2022, permitiendo evidenciar los 365 días del año. Dichos datos fueron comparados con los límites permisibles por la norma nacional: Resolución 2254 de 2017 y la Guía de la OMS de la Calidad del Aire de 2021, a continuación, se presenta una tabla con la información sobre cada límite que se tuvo en cuenta. (Tabla 7).

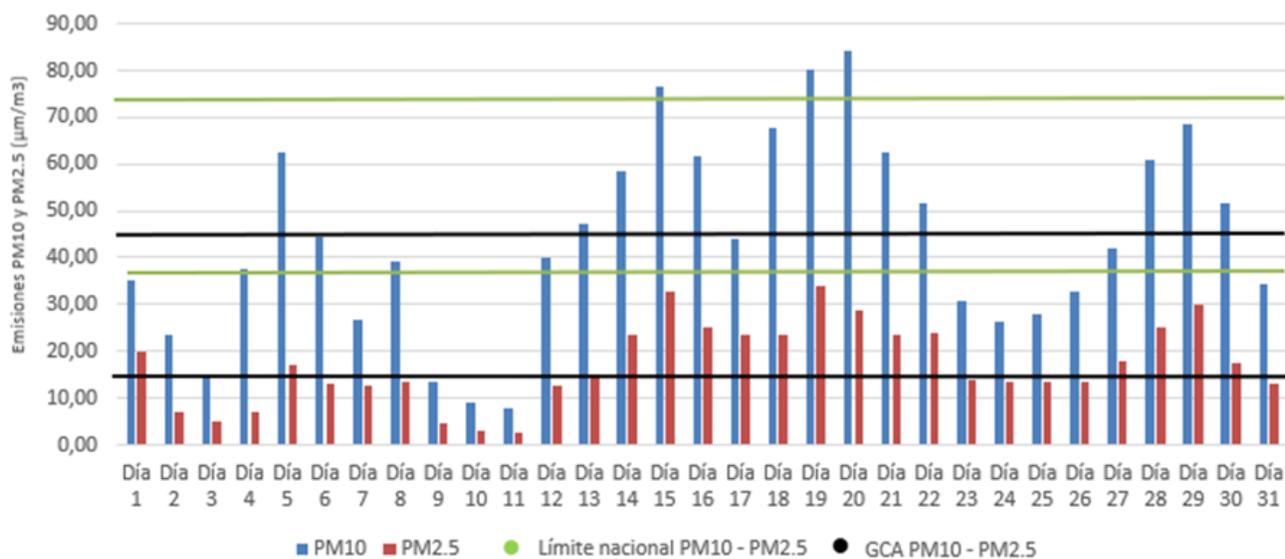
Tabla 7. Límite permisible de PM10 y PM2.5 para la normativa nacional y la Guía de la OMS de la Calidad del Aire de 2021

Resolución 2254/2017		OMS 2021	
Nivel Máximo Permisible (µg/m ³)		Nivel Máximo Permisible (µg/m ³)	
PM10 24h	75	PM10 24h	45
PM2.5 24h	37	PM2.5 24h	15

En relación con lo anteriormente expuesto, se procedió a iniciar con la recopilación de datos de la estación de monitoreo para el año 2021, teniendo en cuenta las condiciones mencionadas anteriormente, obteniendo como resultado gráficas tanto diarias como mensuales en donde se presentan las concentraciones del material particulado. Cabe destacar que para este año se tuvo en cuenta los 365 días, tanto para PM10 como para PM2.5 pues en cada día se obtuvo información, a continuación, se presentan las gráficas de los meses de enero, noviembre y diciembre ya que estos meses sobrepasan en algunos días los límites de concentración de 24 horas, adicional se debe resaltar que el color azul de las barras representa el PM10 y las barras rojas hacen alusión al PM2.5. Es conveniente mencionar que para ver a detalle mes a mes se puede consultar el Anexo 1 pues allí se encuentran todos los meses con sus respectivos días y concentraciones, las gráficas presentadas a continuación se escogieron teniendo en cuenta que corresponden a los meses en los cuales se presentó mayor incumplimiento de los límites en comparación a los demás.

De acuerdo con lo anterior se escogieron los meses de enero, noviembre y diciembre, como ejemplo para mostrar gráficamente, sin embargo, se aclara que el análisis se realizó para todos los meses.

Figura 14. Emisiones de PM10 y PM2.5 promedios 24h, para el mes de enero de 2021 y su comparación con la normativa nacional y la Guía de la OMS de la Calidad del Aire de 2021.



Como se pudo observar (Figura 14) las líneas verdes hacen referencia a los niveles de la Resolución 2254, en lo relacionado con el PM10 de 31 días del mes de enero 3 días excedieron el límite con concentraciones superiores a $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ correspondientes a viernes, martes y miércoles es decir días entre semana y el PM2.5 no fue excedido en ningún día. Mientras que, en comparación con las recomendaciones de la OMS, el PM10 sobrepasó las recomendaciones en 13 días de 31, alcanzando concentraciones de $84,29\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo el valor más alto en todo el mes y en cuanto al PM2.5 respecto a la Guía de la OMS sobre Calidad del Aire - 2021 se excedió en 16 días siendo $34\mu\text{g}/\text{m}^3$ el valor más alto.

Por otra parte, y tal como se indicó anteriormente, aunque no se presentan las gráficas de otros meses, las mismas pueden ser consultadas en el anexo 1², para el mes de febrero tanto para PM10 como para PM2.5 no se excedió el límite en ningún día y los valores de igual forma no se acercaron a las concentraciones máximas. Sin embargo, teniendo en cuenta el límite de la Guía de la OMS sobre Calidad del Aire - 2021 el PM10 se excedió en 9 días con $62\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el PM2.5 se excedió en 18 días con $27\mu\text{g}/\text{m}^3$. El mes de marzo por su parte no sobrepasa tampoco en ningún día los límites de la resolución, mientras que los límites de la OMS si se exceden en 6 días en el PM10 siendo $67\mu\text{g}/\text{m}^3$ el valor más alto y en PM2.5 se pasan 21 días del mes con valores de $34\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En el mes de abril se observó que los límites nacionales tampoco se sobrepasaron, sin embargo, teniendo en cuenta lo recomendado por la Guía de la OMS sobre Calidad del Aire - 2021 si, el PM10 fue sobrepasado por 4 días, siendo $51\mu\text{g}/\text{m}^3$ el valor más alto y en cuanto al PM2.5 el límite se sobrepasó en 9 días con $24\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo la concentración más alta. El mes de mayo por su parte, tuvo un comportamiento distinto a los meses evaluados hasta el momento, pues nuevamente no se exceden los límites permitidos por la resolución en ninguno de los contaminantes, pero los límites de la Guía de la OMS sobre Calidad del Aire - 2021 solo fueron excedidos un día en el PM10 y en el PM2.5, adicional a esto fue el mismo día en el que se excedieron los límites, con un valor de $47,64\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 y $18,33\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2.5 dicho día corresponde a un viernes.

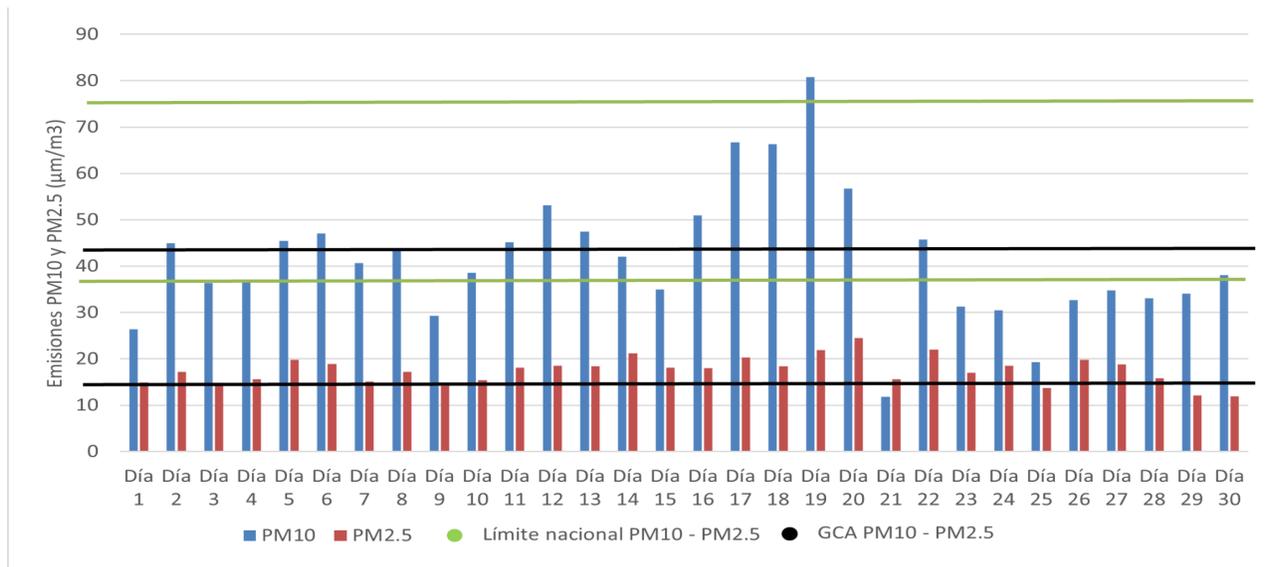
Para el mes de junio los valores de igual forma no fueron sobrepasados y en cuanto a los valores de la Guía de la OMS sobre Calidad del Aire - 2021 el PM10 se sobrepasó en 4 días con $48\mu\text{g}/\text{m}^3$ siendo el valor más alto y respecto al PM2.5, 9 días pasaron el límite con el valor de $26,33\mu\text{g}/\text{m}^3$ como concentración más alta.

² Las gráficas correspondientes a los meses de febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre de 2021 se encuentran en el anexo 1.

En el mes de julio, se presentó una situación similar al mes de mayo, pues no se excedieron los límites en la resolución 2254 de 2017 y las concentraciones no excedieron los $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ y de igual manera en el límite establecido por la Guía de la OMS sobre Calidad del Aire – 2021, en cuanto al PM10 no se sobrepasó lo establecido y en cuanto al PM2.5 solo se sobrepasó un día con $16,34\mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentración correspondiente al día 2 el cual es un viernes. En agosto los límites establecidos por la resolución, no se excedieron ni en PM10 ni en PM2.5, por otra parte, en cuanto a la Guía de la OMS sobre Calidad del Aire - 2021, para PM10 se sobrepasó en 2 días con $50,4\mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentración más alta y para PM2.5 se sobrepasó el nivel recomendado en 10 días siendo $19,33\mu\text{g}/\text{m}^3$ la concentración más alta. El mes de septiembre no sobrepasó los límites de la resolución ni en PM10 ni en PM2.5, por otra parte, el límite establecido por la Guía de la OMS sobre Calidad del Aire - 2021 en PM10 se sobrepasó en 4 días con una concentración de $49,73\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en cuanto al PM2.5 se pasó el nivel en 13 días siendo $22,49\mu\text{g}/\text{m}^3$ la concentración más alta.

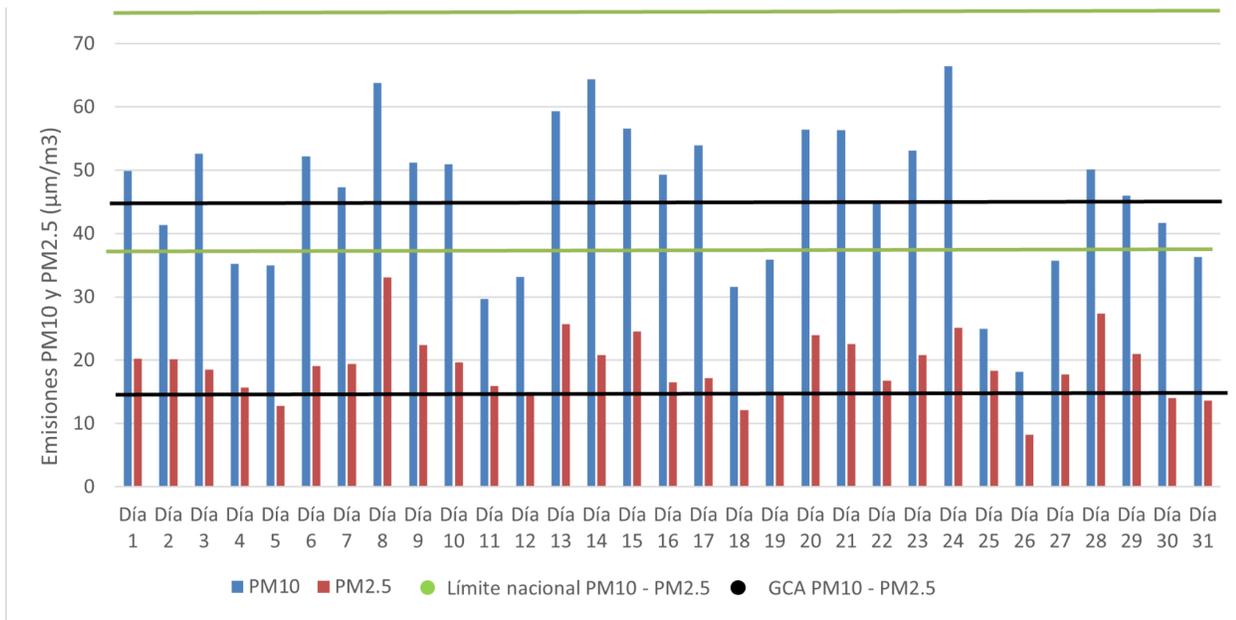
Para el mes de octubre de igual forma no se exceden los límites de la resolución, pero sí lo que recomienda la Guía de la OMS sobre Calidad del Aire - 2021 en cuanto al PM10 se sobrepasó en 2 días siendo $48,48\mu\text{g}/\text{m}^3$ la concentración más alta y en PM2.5 se sobrepasó 13 días siendo $26,22\mu\text{g}/\text{m}^3$ la concentración más alta.

Figura 15. Emisiones de PM10 y PM2.5 cada 24h durante el mes de noviembre de 2021 y su comparación con la normativa nacional y la Guía de la OMS sobre Calidad del Aire - 2021.



Como se puede observar (Figura 15), el mes de noviembre de 2021 por el contrario de los anteriores meses si sobrepaso los niveles de PM10 establecidos por la Resolución 2254 de 2017 en un día llegando a los 80µg/m³ de concentración y por el contrario el nivel de PM2.5 no se sobrepasó según esta resolución, pero en la Guía de la OMS sobre Calidad del Aire - 2021 ambos contaminantes si presentaron sobrepasos, en el caso de PM2.5 el nivel más alto fue de 24,47µg/m³ y fueron 24 días los excedidos respecto a lo aconsejado por la Guía de la OMS sobre Calidad del Aire - 2021.

Figura 16. Emisiones de PM10 y PM2.5 cada 24h durante el mes de diciembre de 2021 y su comparación con la normativa nacional y la Guía de la OMS sobre Calidad del Aire - 2021.



Finalmente, el mes de diciembre como se observó (Figura 16) no se sobrepasó el nivel establecido por la resolución ni en PM10 ni en PM2.5, pero si según lo propuesto por la Guía de la OMS sobre Calidad del Aire - 2021, en cuanto al PM10 fueron 18 días los que excedieron el límite que ellos proponen, siendo el día 24 el más alto en concentración con $66,41\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en cuanto al PM2.5 fueron 24 días los días que excedieron el valor que indica la Guía de la OMS sobre Calidad del Aire - 2021 con un valor de $33,03\mu\text{g}/\text{m}^3$ siendo el más alto de todos de concentración correspondiente al día 8.

Como se pudo observar los niveles de la resolución nacional es decir la 2254 de 2017 solo fueron excedidos en 2 meses los cuales fueron enero y noviembre en cuanto a PM10, mientras que en PM2.5 no se excedió en ningún mes del año, lo que lleva a que en general para PM10 se obtenga un 98,9 % de cumplimiento, y en PM2.5 un 100% respecto a dicha resolución. En comparación a lo que se recomienda en la Guía de la OMS sobre Calidad del Aire - 2021 en PM10 se obtuvo un 79,5% de cumplimiento y en PM2.5 un 56,7% se cumplió lo establecido.

Figura 17. Número excedencias año 2021

Meses	Número de excedencias			
	Resolución 2254 de 2017		Guía de la OMS sobre Calidad del Aire - 2021 (GCA)	
	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5
Enero	3	0	13	15
Febrero	0	0	9	18
Marzo	0	0	6	21
Abril	0	0	4	9
Mayo	0	0	1	1
Junio	0	0	4	9
Julio	0	0	0	1
Agosto	0	0	2	10
Septiembre	0	0	4	13
Octubre	0	0	2	13
Noviembre	1	0	12	24
Diciembre	0	0	18	24
% incumplimiento	1,1	0	20,5	43,3

Cabe destacar que en la figura 17, se presentaron los días en los cuales se excedieron los límites y de igual manera la correspondencia al porcentaje de cumplimiento; adicionalmente se logró interpretar el cumplimiento de los límites establecidos por la resolución tiene un alto porcentaje pues en este año fueron tan solo 4 días los que excedieron el nivel de PM10, dichos días se encuentran distribuidos en el mes de enero y noviembre; en cuanto al mes de enero cabe resaltar que es un mes con temporada seca, esto es relevante ya que durante dicha temporada suele haber menos humedad en el aire, y lluvias, lo que puede ocasionar que las partículas de polvo y otras partículas que estén suspendidas en el suelo sean más propensas a levantarse debido tanto al viento como a la actividad humana, por lo que, dicha falta de humedad puede hacer que estas partículas sean más ligeras y por ende más propensas a ser transportadas por el viento, además dicha temporada se asocia con condiciones meteorológicas más estables lo que puede llevar a una acumulación de contaminantes en la atmosfera en lugar de una dispersión adecuada, lo que puede resultar en concentraciones más altas, lo anterior concuerda con lo expuesto por Robles, Medina & Medina en el año 2019, estudiando la contaminación del aire por el material particulado y su relación con las enfermedades respiratorias, cuando determinan que la contaminación en temporada de clima seco generan mayor difusión del material particulado, esto se puede relacionar primero a que el día del año que tuvo el máximo reporte de concentración en PM10 fue el día 20 de Enero (miércoles) a las 5:00 pm horario, el cual es conocido como hora pico, es decir que es donde más afluencia de vehículos se encuentran, adicional a que generalmente las personas están retornando a sus hogares por lo que esto sube la actividad en general en la ciudad y por acción de los vientos generar dispersión en la zona de estudio.

Por otra parte, el cumplimiento del PM2.5 durante todo el año fue exitoso pues en ningún día en promedio del día excede lo permitido, adicional lo interpretado en el informe anual de la RMCAB presenta que se registraron altas concentraciones en el primer trimestre, con valores más altos en el mes de marzo, luego bajaron en el segundo trimestre hasta el mes de julio que tuvo los valores más bajos, y se empezaron a incrementar desde agosto hasta registrar los valores más altos en el mes de diciembre (RMCAB, 2022). Esto coincidió con el comportamiento de las concentraciones reportadas en la estación de Bolivia pues marzo fue el mes que obtuvo valores más altos en comparación con los demás meses y esto fue disminuyendo, siendo julio el mes que menos concentración tiene, sin embargo, en diciembre no presentó los valores más altos como indica el reporte, pero cabe destacar que esto es relacionado únicamente con el comportamiento registrado por la estación. Es pertinente mencionar que las variaciones en las concentraciones en el primer trimestre se pudieron ver influenciadas por la contaminación generada por incendios forestales, aunque también se evidenció un aporte por las lluvias que se presentaron principalmente en febrero, y de las restricciones por aumento en los casos de COVID-19 en la ciudad después de las celebraciones de final de año (RMCAB, 2022).

Los datos obtenidos comparados con el reporte anual presentado por la RMCAB del año 2021 demuestran la veracidad de los procedimientos realizados para la obtención del % de cumplimiento pues se reporta lo mismo, a su vez se identificó que la estación no excede el límite anual, perteneciendo de igual forma a las estaciones y en general a las localidades con menores concentraciones registradas. En general se observó que en la ciudad se incrementaron las concentraciones durante el primer trimestre, este patrón podría relacionarse con el hecho de que, durante el primer semestre del año, persistieron restricciones debido a la emergencia sanitaria de COVID-19. En contraste, durante el segundo semestre, estas restricciones se fueron levantando gradualmente a medida que las actividades presenciales volvían a la normalidad. Este cambio se tradujo en un aumento del tráfico, lo que, a su vez, contribuyó al incremento de las concentraciones de partículas en el aire durante el cuarto trimestre del año (RMCAB, 2022).

En relación con esto, se pudo asociar a que desde el mes de abril hasta octubre las concentraciones en lo que respecta a PM10 se mantuvieron por debajo de $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ en comparación con el primer trimestre y los últimos dos meses del año, en donde se pudo observar un crecimiento notable en las concentraciones y en cuanto a PM2.5 de igual forma en este periodo de tiempo mencionado anteriormente para PM10 se mantuvo por debajo de $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en el mes de diciembre fue donde su rango de concentración creció alcanzando niveles de $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ pero en general manteniéndose debajo de lo permitido en un rango de 24 horas. Una anotación que se debe mencionar es que la RMCAB reporta de igual manera que los niveles de PM2.5 entre el año 2020 y 2021 disminuyó y esto se puede atribuir a que, en primer lugar, en general las fuentes de emisión de contaminantes de la ciudad cambiaron y adicional a ello el fenómeno de la niña tuvo influencia, lo que pudo conllevar a la reducción de contaminantes en los primeros meses del año, ya que normalmente en dichos periodos del año se ven las concentraciones más altas (RMCAB, 2022).

Finalmente, se pudo evidenciar que las condiciones climatológicas interfieren en el comportamiento de los contaminantes y a su vez los fenómenos meteorológicos logran tener influencia de igual manera, adicional el cumplimiento para este año en cuanto a la normativa vigente fue aceptable, sin embargo, si se tuviera en cuenta lo recomendado por la Guía de la OMS sobre Calidad del Aire - 2021, los porcentajes de cumplimiento son más bajos, lo que conlleva a que se puede seguir trabajando en conjunto para lograr una mayor aproximación al cumplimiento de estos límites propuestos.

Para el año 2022, se realizó de igual forma una comparación de los datos registrados por (RMCAB) estos datos fueron representados gráficamente mes a mes para más información ver anexo 2, tal como se muestra en el año anterior y siguiendo de igual manera las condiciones iniciales.

De este modo, la cantidad de días que se tuvo en cuenta para el desarrollo del trabajo de grado fue de 348 días con respecto al contaminante PM10 equivaliendo a un 95% de un año de 365 días; y con respecto al contaminante PM2.5 se tuvo en cuenta 365 días equivaliendo a un 100% de un año de 365 días (Figura 18).

Figura 18. Porcentaje de días evaluados en cuanto a la concentración de PM10 y PM2.5 - Año 2022.

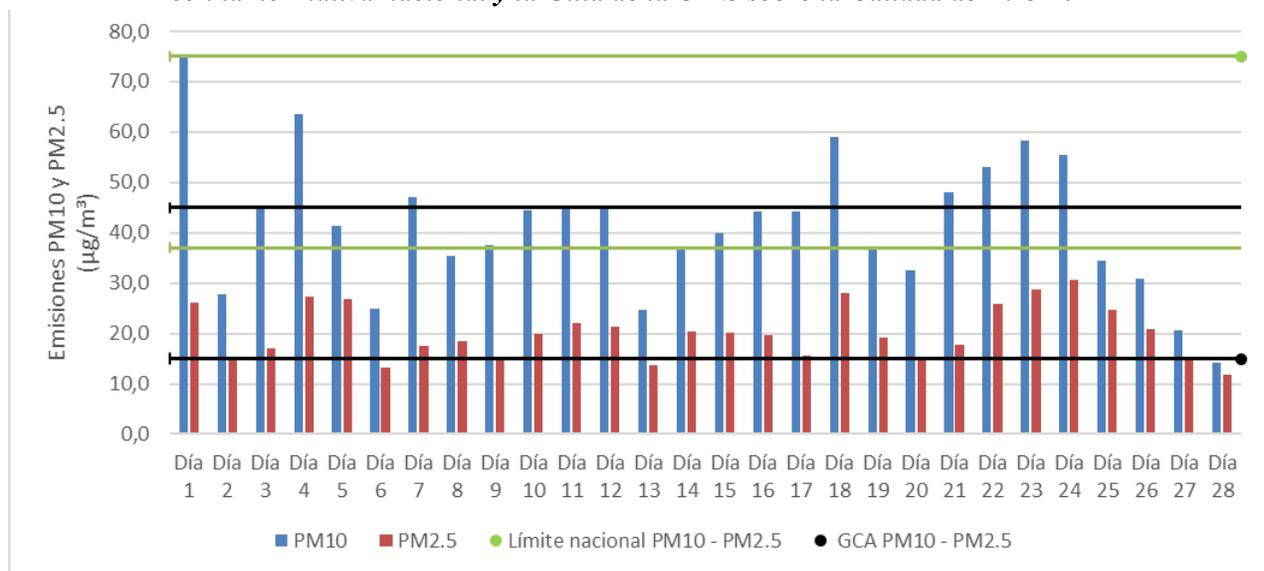
Mes	Día evaluados PM10	Día evaluados PM2.5	Total día mes	% PM10	% PM2.5
Enero	31	31	31	100	100
Febrero	28	28	28	100	100
Marzo	31	31	31	100	100
Abril	30	30	30	100	100
Mayo	30	31	31	96,77	100
Junio	17	30	30	56,67	100
Julio	31	31	31	100	100
Agosto	30	31	31	96,77	100
Septiembre	30	30	30	100	100
Octubre	29	31	31	93,55	100
Noviembre	30	30	30	100	100
Diciembre	31	31	31	100	100
Total	348	365	365	95	100

De acuerdo con lo anterior se escogieron los meses de febrero, junio y diciembre, como ejemplo para mostrar gráficamente, sin embargo, se aclara que el análisis se realizó para todos los meses.

Se evidenció que durante el mes enero del año 2021, se monitoreo el 100% de los días del mes, lo que equivale a 31 días de los contaminantes PM10 y PM2.5, se identificó que el material particulado PM10 tiene más presencia en la atmósfera a diferencia del PM2.5. el cual no sobrepasó el límite permisible nacional. Por otro lado, los días 2 ($13,4\mu\text{g}/\text{m}^3$), 3 ($13,0\mu\text{g}/\text{m}^3$), 11 ($12,0\mu\text{g}/\text{m}^3$), 12 ($11,8\mu\text{g}/\text{m}^3$), 13 ($14,1\mu\text{g}/\text{m}^3$), 15 ($12,4\mu\text{g}/\text{m}^3$), 19 ($13,3\mu\text{g}/\text{m}^3$), 20 ($8,7\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 30 ($13,6\mu\text{g}/\text{m}^3$) estuvieron debajo del grado sugerido por la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021; cabe resaltar que el PM10 y PM2.5 no excedieron el límite máximo permitido a nivel nacional.

Por otro lado, en la Figura 19, se evidenció que durante el mes Febrero del año 2022, se monitoreo el 100% lo que equivale a 28 días del mes, identificando que para PM10 únicamente el día 1 excede el límite de la normativa nacional con una emisión de $75,3\mu\text{g}/\text{m}^3$. Con respecto a la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021, el PM10 excede los días 4 ($63,5\mu\text{g}/\text{m}^3$), 7 ($47,1\mu\text{g}/\text{m}^3$), 18 ($59,1\mu\text{g}/\text{m}^3$), 21 ($48,1\mu\text{g}/\text{m}^3$), 22 ($53,0\mu\text{g}/\text{m}^3$), 23 ($58,4\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 24 ($55,4\mu\text{g}/\text{m}^3$), y en cuanto al PM2.5 de los días evaluados 9 no excedieron el límite sugerido.

Figura 19. Emisiones de PM10 y PM2.5 promedios 24h, para el mes de febrero de 2022 y su comparación con la normativa nacional y la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021



Durante el mes de marzo, la estación de monitoreo registró datos para los 31 días del mes, mostrando un patrón de comportamiento similar a los meses previos. En cuanto a los niveles de partículas PM10 y PM2.5, no se excedieron los límites establecidos a nivel nacional. Sin embargo, al comparar los resultados con los estándares sugeridos por la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021, se observó que en 10 de los días evaluados superan dichos límites. En particular, en el caso de PM2.5, se cumplió sólo 7 días específicos, con concentraciones de $6,3\mu\text{g}/\text{m}^3$, $10,5\mu\text{g}/\text{m}^3$, $11,4\mu\text{g}/\text{m}^3$, $9,6\mu\text{g}/\text{m}^3$, $13,8\mu\text{g}/\text{m}^3$, $15,5\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $14,75\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

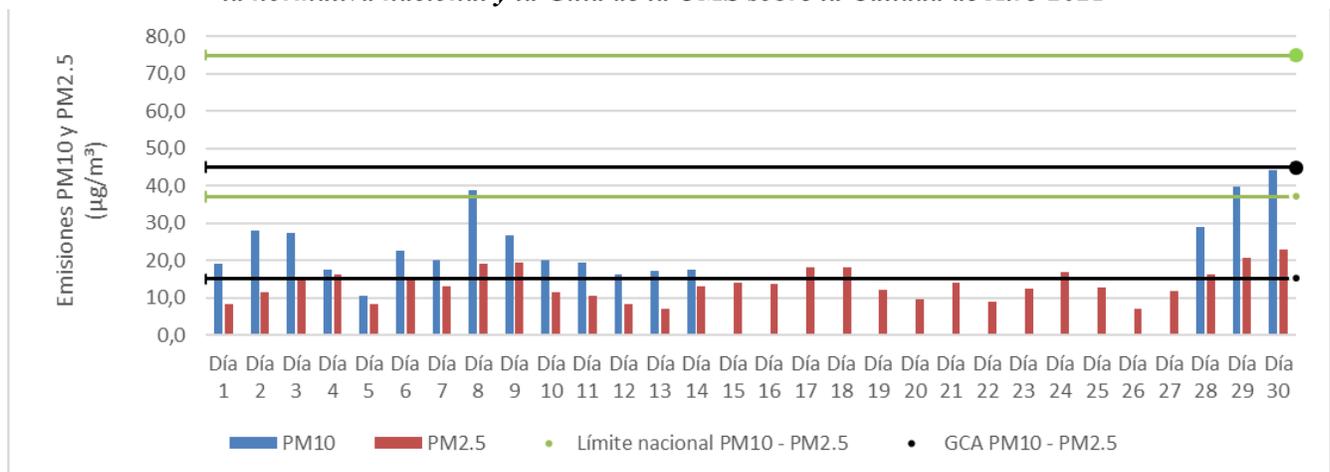
En relación con el mes de abril, se destaca que las concentraciones de PM10 y PM2.5 se mantienen en niveles bajos, ya que en ningún caso superan los $53\mu\text{g}/\text{m}^3$. No obstante, en lo que respecta al PM2.5, se observa un exceso en relación con el límite recomendado por la Guía de la OMS sobre la Calidad de

Aire-2021 durante la mayoría de los días del mes. De los 30 días analizados, únicamente en 11 de ellos se logró cumplir con dicho estándar (específicamente, los días 6, 7, 12, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 25 y 30). En cuanto al PM10, únicamente se observó la superación de los límites en los días 1 ($52,1\mu\text{g}/\text{m}^3$), 13 ($48,1\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 14 ($53,0\mu\text{g}/\text{m}^3$).

En el mes de mayo, se evaluó la calidad del aire durante los 31 días para el PM2.5, lo que representa el 100% del mes, y en el caso del PM10, se realizaron mediciones en 30 de los 31 días, lo que equivale al 96,77%, ya que no se contaron con datos de la estación de monitoreo Bolivia. Se evidenció una disminución en las emisiones en comparación con el mes anterior, y es relevante destacar que ninguno de los dos contaminantes excedió los límites establecidos a nivel nacional. Sin embargo, en relación con la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021, se observó que el PM10 sobrepasó el umbral recomendado en 4 días, con concentraciones de $55,2\mu\text{g}/\text{m}^3$, $46\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $45,2\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el PM2.5 excedió el estándar en 7 días, con valores de $17,2\mu\text{g}/\text{m}^3$, $19,0\mu\text{g}/\text{m}^3$, $17,2\mu\text{g}/\text{m}^3$, $17,2\mu\text{g}/\text{m}^3$, $20,2\mu\text{g}/\text{m}^3$, $19,5\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $17,5\mu\text{g}/\text{m}^3$, como se detalla en el Anexo 2.

Durante este mes, se efectuó un análisis de los 30 días de datos de PM2.5, abarcando el 100% de los días evaluados. En este período, se observó que los valores se mantuvieron dentro de los límites establecidos por la normativa nacional, con la excepción de los días 17 ($18,1\mu\text{g}/\text{m}^3$), 18 ($18,0\mu\text{g}/\text{m}^3$), 24 ($16,9\mu\text{g}/\text{m}^3$), 29 ($20,8\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 30 ($22,9\mu\text{g}/\text{m}^3$), que superaron lo recomendado por la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021. Por otro lado, en relación con el PM10, se contó con datos de 17 días, abarcando el 56,67% de los días del mes. Como se puede apreciar en la figura 20, únicamente el día 30 registró un pico de emisiones con un valor de $44,2\mu\text{g}/\text{m}^3$, cumpliendo así con ambas.

Figura 20. Emisiones de PM10 y PM2.5 promedios 24h, para el mes de junio de 2022 y su comparación con la normativa nacional y la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021



En el mes de julio, se observó que las emisiones continúan manteniendo un patrón de comportamiento similar al de los meses anteriores, caracterizado por concentraciones bajas. Al comparar los niveles registrados con los límites establecidos por la normativa nacional, se destacó que tanto el PM10 como el PM2.5 cumplen plenamente con dichos estándares. No obstante, al analizar los resultados en función con la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021, se encontró que el PM10 superó los límites recomendados en los días 7 (50,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 14 (60,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 29 (52,23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). En cuanto al PM2.5, se excedieron los estándares sugeridos en los días 14 (21,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 15 (20,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 16 (20,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 23 (19,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 29 (17,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Para el mes de agosto, se pudo identificar que los 30 días (96,77%) cuantificados por RMCAB de PM10 cumple con la normativa nacional y los lineamientos sugeridos por la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021 teniendo en cuenta que solamente hubo un pico de emisión el día 5 (46,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Por otro lado, PM2.5 se cuantificó los 31 días (100%) cumplen con los límites establecidos en la normativa nacional, pero con los 9 días no cumplen con el límite correspondiente.

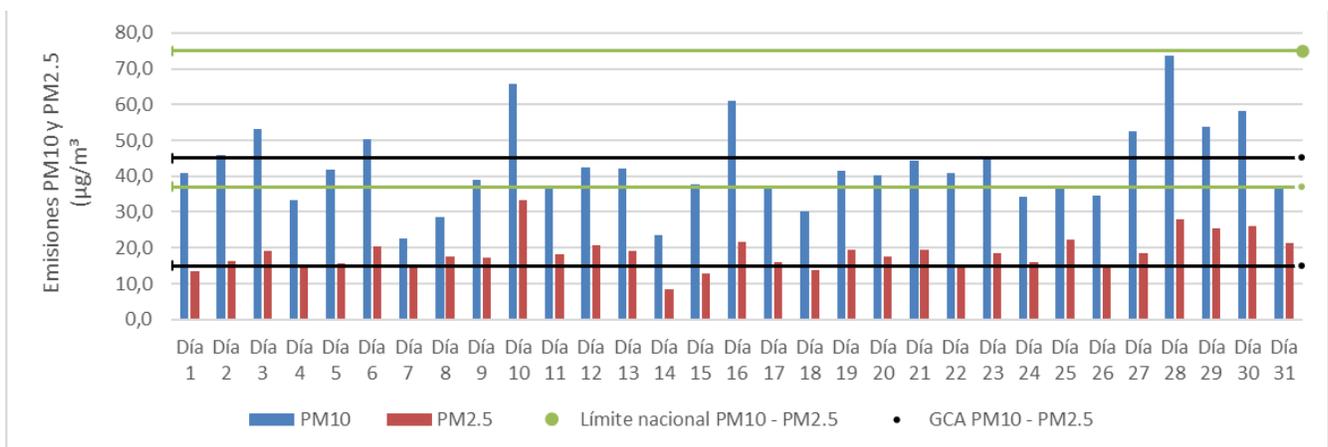
En el transcurso del mes de septiembre, se evidenció un aumento significativo en las emisiones a partir del día 12, este incremento tuvo un impacto en la calidad del aire, particularmente en lo que respecta a los valores de PM10 según las pautas de la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021. En ese contexto, se sobrepasaron los límites sugeridos durante los días 21 (55,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 27 (46,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 28 (49,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 29 (56,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 30 (52,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). En cuanto al PM2.5, solo se cumplieron los estándares en los días 16 (11,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 17 (11,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 25 (11,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 26 (13,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que el resto del mes se mantuvo por encima de dichos límites.

Durante el mes de octubre, se observó que los niveles de PM10 a lo largo de 29 días representó el 93,55% del mes, resultando un pico de emisiones de PM10 el día 13, con un valor de 65,20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, superando de este modo el límite establecido por la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021. En cuanto al PM2.5, se llevaron a cabo mediciones a lo largo de los 31 días, abarcando el 100% del mes, en este caso, se observó que se mantuvo dentro de los límites establecidos por la normativa nacional. Sin embargo, en 10 días, se sobrepasaron los valores recomendados por la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021 ya que excedieron los 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En el transcurso del mes de noviembre, se llevó a cabo una evaluación de los datos de los niveles de PM10 y PM2.5, abarcando la totalidad de los días, como se detalla en el Anexo 2, se observó un aumento en las emisiones, marcando un contraste con el comportamiento durante los meses de abril a agosto. En particular, el PM10, aunque se mantuvo dentro de los límites establecidos por la normativa nacional, incumplió con las directrices sugeridas por la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021 en los días 1 (56,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 4 (51,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 5 (52,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 11 (48,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 23 (61,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 24 (70,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 25 (55,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). De manera similar, en el caso del PM2.5, se mantuvo en conformidad con los límites nacionales, pero superó las recomendaciones 17 días de los 30 evaluados.

Por último, en la Figura 21 se identificó que, de los 31 días analizados, que corresponden al 100% del mes, ninguno de los valores de PM10 y PM2.5 supera los límites establecidos por la normativa nacional. En lo que respecta a las directrices de la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021, se constató que el PM2.5 cumple con los límites sugeridos en los días 1 (23,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 4 (17,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 5 (17,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 7 (14,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 14 (14,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 15 (9,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 18 (8,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 22 (14,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Por otro lado, en el caso del PM10, se observa que los días 10 (25,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 16 (37,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 27 (32,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 28 (28,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 29 (24,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 30 (28,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) incumplen presentando elevados picos de emisiones hacia la atmósfera.

Figura 21. Emisiones de PM10 y PM2.5 promedios 24h, para el mes de diciembre de 2022 y su comparación con la normativa nacional y la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021



Con base en el grado de conformidad con la normativa nacional (Resolución 2254/2017), según los datos recopilados a lo largo del año 2022, se pudo determinar que en el caso de PM10, el cumplimiento se registra en un 99,71% de los días y para PM2.5, se alcanza una tasa de cumplimiento del 100%. Por otro lado, al evaluar los resultados en relación con la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021 correspondientes al mismo año, se observó que las concentraciones promedio mensuales de PM10 tiene un grado de cercanía en un 77,87% y en cuanto a PM2.5, el grado alcanza un 59,18%. En la figura 22, se pudo evidenciar el número de veces que se incumple por meses y su porcentaje de cumplimiento.

Para mayor detalle de lo anterior ver anexo 2.

Figura 22. Número de excedencia año 2022

	PM10		PM2.5	
	Resolución 2254/2017	Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021	Resolución 2254/2017	Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021
Mes	No	No	No	No
Enero	0	13	0	22
Febrero	1	7	0	19
Marzo	0	10	0	25
Abril	0	19	0	3
Mayo	0	3	0	7
Junio	0	0	0	5
Julio	0	3	0	5
Agosto	0	1	0	9
Septiembre	0	5	0	4
Octubre	0	3	0	10
Noviembre	0	7	0	17
Diciembre	0	6	0	23
% incumplimiento	0,29	22,13	0	40,82

Considerando los resultados obtenidos a lo largo del año 2022, se aprecia un patrón de comportamiento similar entre los contaminantes PM10 y PM2.5. A pesar de ser dos fracciones distintas de partículas suspendidas en el aire, no mantienen una dependencia directa entre sí (OMS, 2022). No obstante, es relevante notar que en la mayoría de los meses prevalecen las emisiones de PM10 sobre las de PM2.5.

Esta tendencia podría estar influenciada por diversos factores, tales como las fuentes de emisión, las condiciones climáticas y la composición química de las partículas en suspensión, entre otros. De esta manera, el predominio de las emisiones de PM10 podría ser atribuido a una mayor circulación de estas partículas en el aire, acompañada por los factores mencionados. Es importante destacar que una mayor presencia de partículas PM10 podría interpretarse como un menor riesgo para la salud humana en comparación con las partículas más pequeñas, como el PM2.5. Esto se debe a que las partículas de menor tamaño tienen un impacto más perjudicial, ya que pueden ingresar con mayor facilidad en el sistema respiratorio e incluso alcanzar al torrente sanguíneo (CONPES, 2018).

Además, se evidenció un alto nivel de cumplimiento de la normativa nacional, la Resolución 2254/2017, la cual es la encargada de adoptar la norma de calidad del aire y otras disposiciones, entre estas, establecer los niveles o límites permisibles de contaminantes. Durante el transcurso de los doce meses del año 2022 se cumplió un 99% de los límites en la zona de estudio, lo que se significa que el estado del aire es bueno, y según la clasificación del ICA se encuentra en la categoría “buena - verde” (Figura 2) y en términos de exposición para la salud de la población, esta situación representa un riesgo bajo (Ministerio de Ambiente, 2017).

Mientras que, de acuerdo con la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021, durante el año 2022, se observó un cumplimiento inferior, para las partículas PM10, este cumplimiento se situó en un 78%, y para las PM2.5 fue del 59%, esto se pudo atribuir a la revisión sistemática y modificación de los niveles permisibles del 2005, ya que, permitió un mayor estudio sobre las fuentes de emisión y el impacto socio ambiental a nivel global. Por esto, al modificar los estándares la detección del incumplimiento a la norma es más notorio, fomentando la implementación progresiva de ajustes y programas para afrontar situaciones de alta concentración (WHO,2021).

La vegetación que está presente en la zona de estudio hace parte del factor biótico como es la fauna y la flora, representando un factor importante para la calidad del aire estos, ya que actúan como reguladores y filtros naturales de los contaminantes que están dispersos en el aire manteniendo un equilibrio ecológico (Secretaría de Ambiente,2022).

Entre las funciones destacadas, la fotosíntesis emerge como un proceso crucial para la regulación de los niveles de oxígeno en la atmósfera y la reducción de las concentraciones de contaminantes como señala Carril en su trabajo del 2011. Además, en esta zona, los árboles desempeñan un papel fundamental como auténticos filtros naturales, ya que sus hojas tienen la capacidad de atrapar partículas contaminantes suspendidas en el aire. La preservación de estos ecosistemas no solo contribuye a la conservación de la fauna en el parque y sus alrededores (Figura 23), sino también mantiene las funciones ecológicas que tienen un impacto positivo en la calidad del aire.

Además, como resultado del desarrollo urbanístico que incluyó la creación del Parque Juan Amarillo - Siete Canchas, se ha vuelto fundamental la protección del ecosistema para garantizar un aire saludable para la población. En este sentido, el Instituto Distrital de Recreación y Deporte implementó una estrategia que consiste en mantener una franja de protección alrededor de la masa arbórea. Esta medida promueve una alta biodiversidad, ayudando a controlar las actividades humanas excesivas (Mesa et al., 2017).

Figura 23. Cartel de Fauna en el Parque Juan Amarillo



Finalmente, según los informes anuales reportados por la RMCAB para el año 2021 los promedios para PM10 fue de $33.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ y para PM2.5 de $14.3\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para el año 2022 el PM10 $35,8\mu\text{g}/\text{m}^3$ y para PM2.5 $16.2\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por lo que la diferencia entre los promedios de ambos años es de $2.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 y de $1,9\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2.5, siendo el 2021 el año con menor promedio de PM10 y PM2.5, sin embargo, las diferencias entre ambos no representan un alto valor y sus porcentajes de cumplimiento en ambos años contó con más del 90% lo que permite inferir que en la zona no se presentan altos niveles de exposición a PM, este grado de cumplimiento se debe atribuir a diferentes factores entre ellos la ubicación del parque, ya que según la OMS el agrupamiento de las viviendas en zonas verdes y el fomento de vías peatonales mejoran la calidad del aire (Alcaldía Local de Engativá, 2019)

9.2. Objetivo específico 2: Analizar la influencia de los factores meteorológicos en las concentraciones de PM10 y PM2.5 en la zona de estudio.

La dispersión de contaminantes en la atmósfera está sujeta a la influencia de diversos factores, entre los cuales los meteorológicos desempeñan un papel de vital importancia, esto se debe a que los aspectos meteorológicos ejercen una influencia significativa en la evaluación de la calidad del aire, ya que afectan tanto la concentración como la composición de los contaminantes, y, en última instancia, los

impactos que estos pueden generar (IDEAM, 2023). Por otra parte, según la OMS la temperatura, humedad, precipitación, viento, radiación solar, entre ellas se puede estimar una correlación tanto entre ellas como con la concentración (García & Arias, 2021). De este modo, los factores que se quisieron analizar fueron los siguientes: temperatura, precipitación, viento. Sin embargo, cabe destacar que se quiso realizar la correlación entre las variables meteorológicas y dichas variables, pero se encontró que la estación en el periodo de la investigación no contó con los datos suficientes para desarrollar dicha correlación, adicional a esto respecto a la precipitación a pesar de que, si se mide, la mayoría de datos registraban 0,00 mm por lo que no se podía establecer una relación significativa. Por lo cual, a continuación, se relaciona la importancia de los mencionados factores meteorológicos en general en la concentración de los contaminantes, en especial del material particulado relacionado, de igual manera con lo establecido por los reportes anuales de la RMCAB.

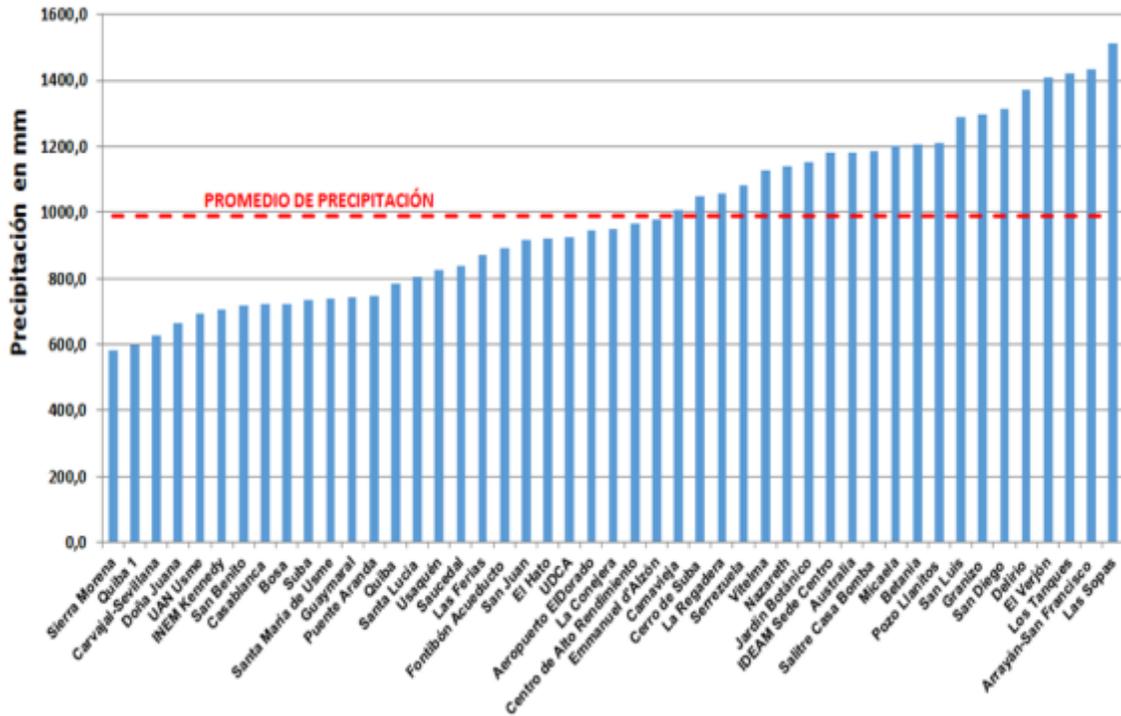
- **Precipitación**

Según la OMM, la precipitación se puede definir como el resultado líquido o sólido de la condensación del vapor del agua que cae al suelo (RMCAB, 2022). Adicionalmente, por la posición geográfica de Colombia y en especial por Bogotá encontrarse en la zona andina, presenta dos periodos abundantes de lluvia los cuales se conocen como invierno y otros periodos menos abundantes conocidos como verano. El primero se observa desde marzo hasta mayo y el segundo desde septiembre hasta noviembre (RMCAB,2022).

La precipitación tiene un papel importante en lo que respecta a la limpieza de la atmósfera cuando el tamaño o diámetro de las gotas es mayor al tamaño de las partículas contaminantes, ya que logra generar arrastre de dichas partículas lo cual contribuye a la descontaminación y más aún cuando hay tiempos de lluvias intensas.

En relación a ello, esto se puede relacionar con lo obtenido en el primer objetivo, pues como se pudo analizar los meses en los que había cumplimiento y menor concentración, por ejemplo, en el caso del 2021 el mes de mayo y julio fueron meses con menores rangos de concentración tanto de PM10 como de PM2.5 y en el año 2022 los meses corresponden a mayo y junio, esto se puede asociar a que sus bajas concentraciones en comparación con los demás meses se deban a las lluvias presentadas, entendiendo de igual forma que Bogotá no es una ciudad de Colombia en donde se presenten la mayor cantidad de lluvias en comparación con otras zonas del país (IDIGER, 2023). Sin embargo, como se puede observar en la figura 24, donde se presentó el promedio de lluvias de la ciudad presentado por zonas de la ciudad, según lo registrado en la estación Las Ferias, la cual es la más cercana a la estación Bolivia, sirve como guía para entender que como tal en la zona de estudio se tiene precipitación promedio entre 800 y 1000mm.

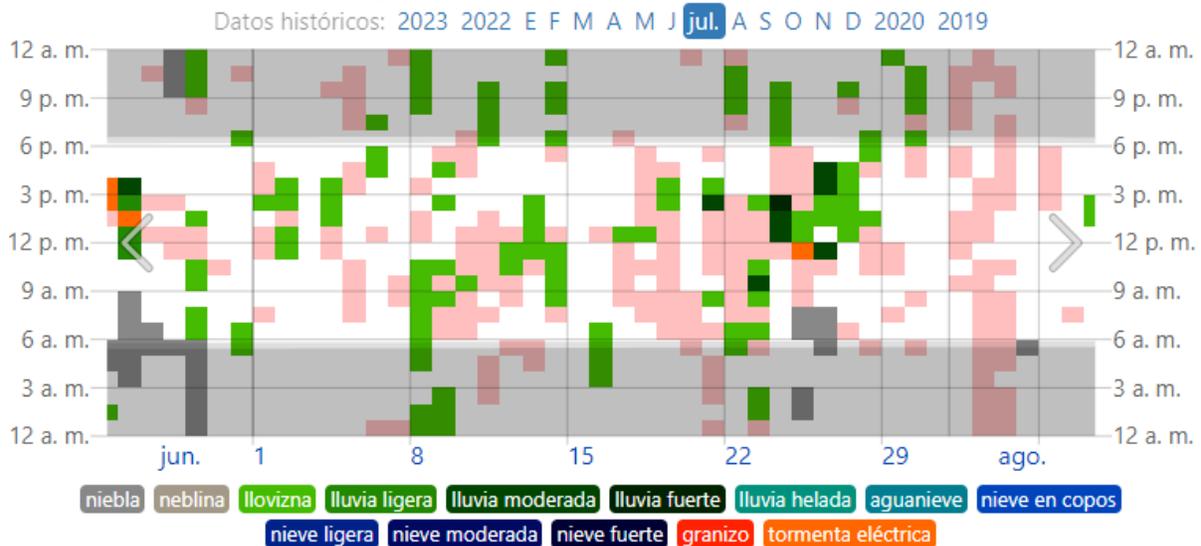
Figura 24. Promedio de precipitación en Bogotá



Fuente: IDIGER, 2023

Con base en lo anteriormente descrito, gracias a los reportes de la página web weatherspark, se logró observar datos históricos de lluvia en los años de estudio y gracias a ello se buscaron los registros de julio de 2021 (Figura 25) uno de los meses que tuvieron menor concentración de contaminantes y así comparar los episodios de lluvias.

Figura 25. Promedio de lluvias Julio 2021



Fuente: Weatherspark, 2023

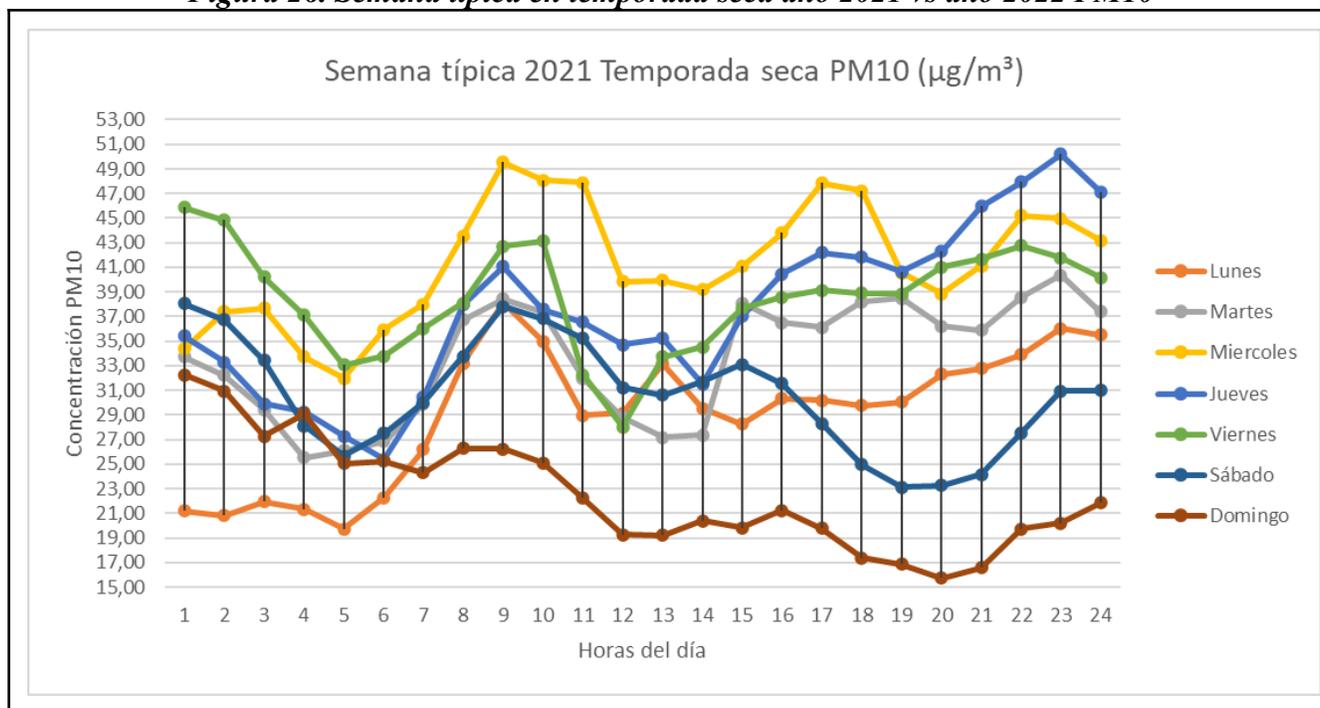
Al observar dicha imagen (Figura 25) se logró identificar que los días en los que se evidenciaron menores niveles de concentración están asociados con los días en los que hubo momentos de lluvia ligera, moderada y fuerte. Además, según la RMCAB, las lluvias que se dan en horas de la tarde, gracias a su intensidad, probablemente sean las que más contribuyen a la limpieza de la atmósfera (RMCAB, 2022).

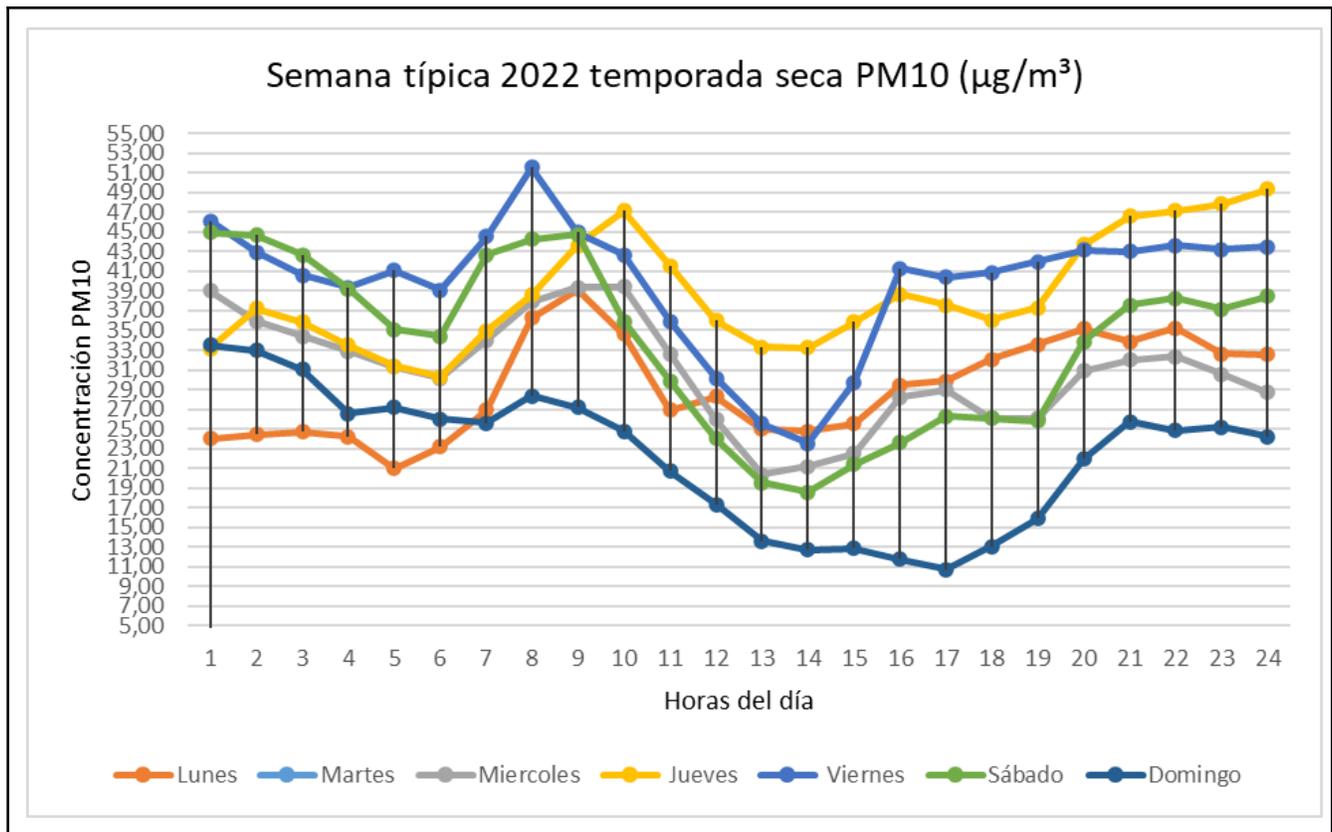
En relación con la precipitación, se logró comprender su incidencia en el material particulado lo cual coincide con lo planteado por Blanco, Gafaro & Rojas, 2015 cuando en su estudio de *Influencia del efecto barrido en la relación PM2.5/PM10 en la localidad de Kennedy, Bogotá*. Reportan que las lluvias son representativas en cuanto al PM por otra parte Mariño E, en el 2020, en su trabajo de grado titulado *Estableciendo la relación entre eventos de precipitación y concentración de material particulado en la ciudad de Bogotá*. concluye que la precipitación y las concentraciones principalmente de PM2.5 se condicionan por la hora del día en la que llueva, lo anterior se relaciona con lo establecido por la RMCAB, pues arrojó que en las horas de la noche y la madrugada cuando se presenta precipitación, dicha es la que genera ese efecto de limpieza, mientras que la lluvia de la mañana tardía y tarde, no es tan beneficiosa para la calidad pues según sus resultados las concentraciones de PM2.5 suelen incrementar. Esto permite inferir que la precipitación si tiene un efecto, pero que la limpieza que genera puede verse alterada para su eficacia en los momentos del día, probablemente por la zona de estudio en la que se evalúe y las actividades industriales que se presenten y como tal las características propias del lugar, por lo cual es una variable que se debe tener en cuenta al momento de relacionar las concentraciones e indagar si cambia la dinámica al ser PM10 o PM2.5 o si por el contrario con ambos contaminantes se comporta igual.

Por último, dado que la estación de monitoreo Bolivia mide el parámetro de precipitación durante el período de investigación, se llevó a cabo una comparación entre los años 2021 y 2022 teniendo en cuenta las estaciones del año. Como se mencionó previamente, Bogotá experimenta tanto una temporada de lluvias como una temporada seca. Con el fin de comprender cómo varía el comportamiento de las concentraciones de material particulado (PM10 y PM2.5) en función de estas estaciones, se generaron gráficos que ilustran la variación en las concentraciones entre las dos temporadas.

De esta manera, en la figura 26 se pudo observar la comparación de los años 2021 y 2022 ambos en temporada seca, dicha temporada corresponde a los meses de enero, febrero, julio y agosto logrando representar el comportamiento del PM10 en lo que sería una semana típica en dicha época.

Figura 26. Semana típica en temporada seca año 2021 vs año 2022 PM10





Como se pudo identificar para el año 2021, en temporada seca las concentraciones mínimas reportadas se dan a partir de las 20:00 pm con una concentración de 15,74µg/m³ en el día domingo, siendo en general y en comparación con los demás días de las semanas, el que representa las menores concentraciones en el año, y por el contrario el día miércoles fue el que más se destacó para este año con los más altos valores de concentración alcanzando su mayor concentración a las 9:00 am con un valor de 49,53µg/m³. En general, de siete días a la semana se pudo evidenciar que tres de dichos días (lunes, miércoles, sábado) alcanzaron su máxima concentración a las 9:00 am, dos de los días (viernes, domingo) a la 1:00 am y los dos días faltantes (martes, jueves) en horas de la noche ambos a las 23:00 pm. Adicional a ello, el rango de las concentraciones en temporada seca para este año se mantuvo entre 15,00µg/m³ y 50,18µg/m³ siendo el valor más alto en una semana promedio de esta temporada.

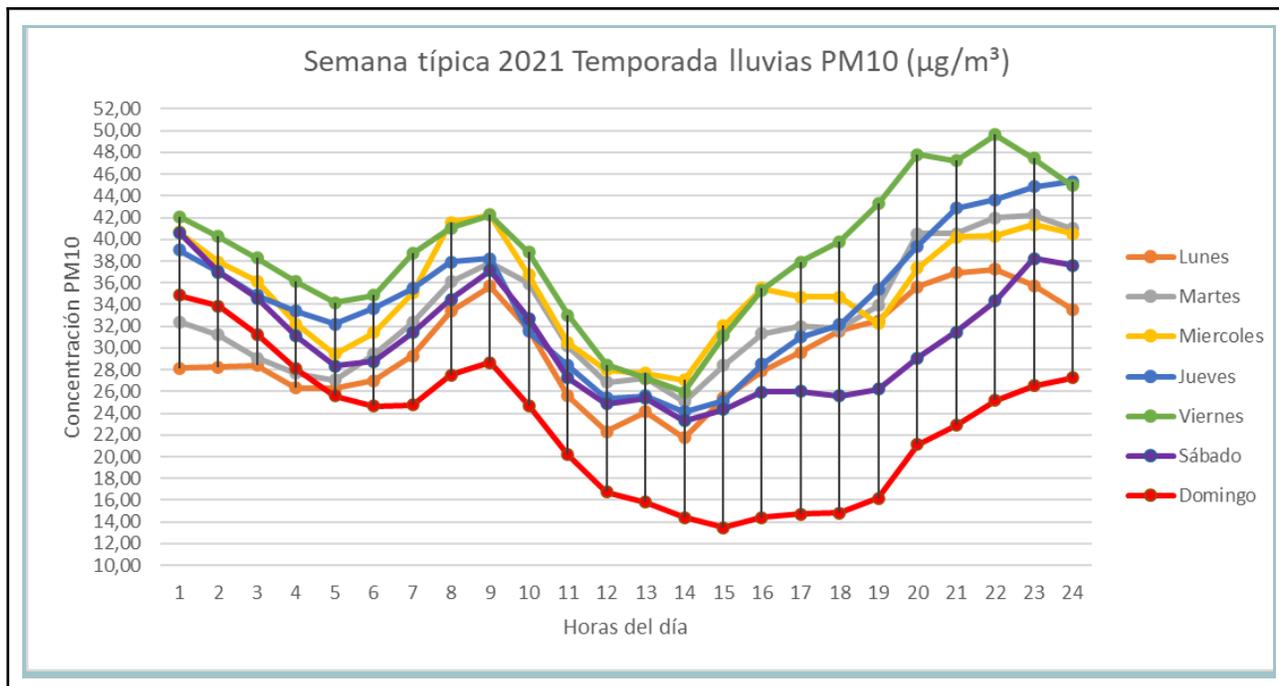
En comparación con el año 2022, el rango general comenzó con la concentración entre 13,00µg/m³ y 53,00µg/m³ lo que de primera mano permitió evidenciar un leve aumento en las concentraciones, siendo el domingo el día que nuevamente reveló los menores valores en general y los días martes, jueves, viernes y sábado presentaron concentraciones constantes a lo largo de las horas del día sin destacar un día como el que tuvo los mayores picos de concentración pues dichos días se mantuvieron similares y para el día lunes y miércoles si se logró observar menores valores en comparación con los demás.

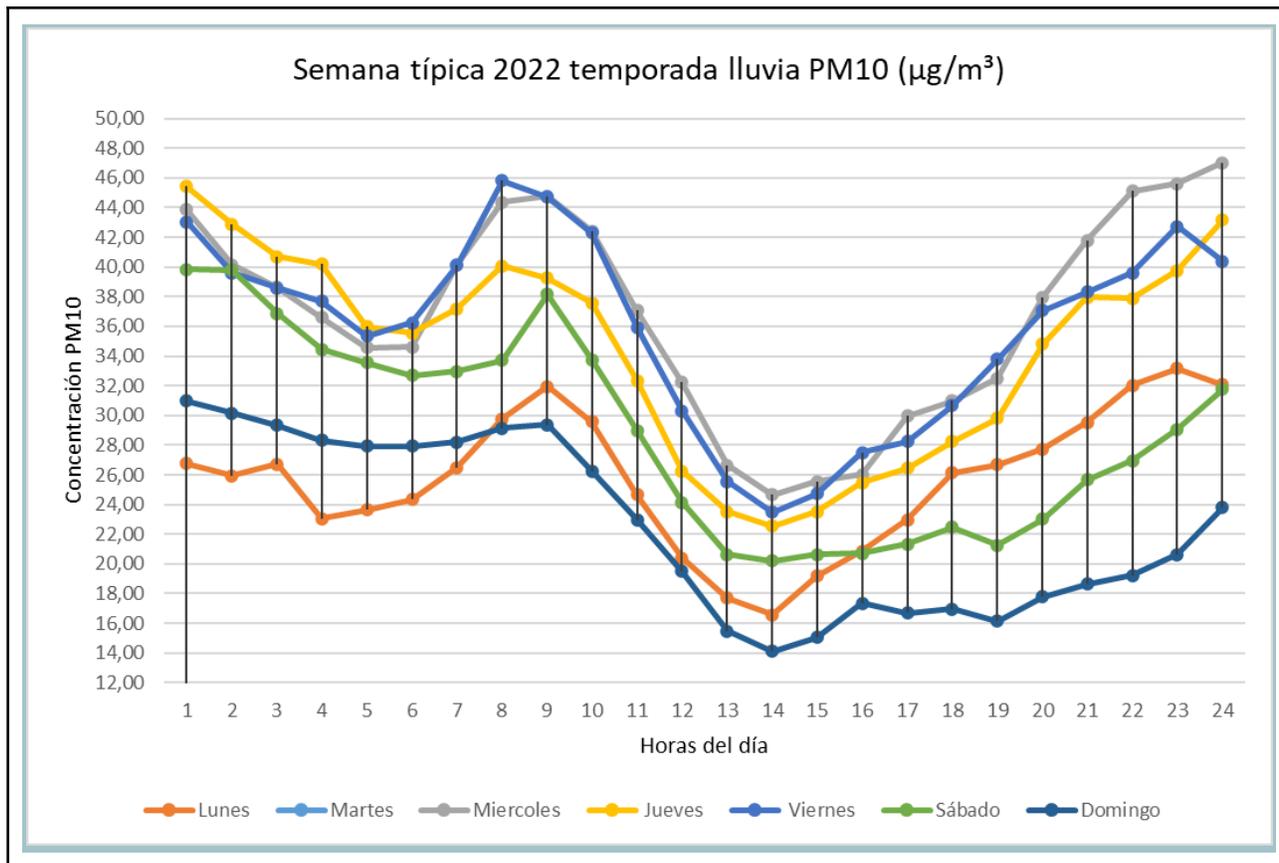
En ambos años se logró evidenciar que no hay tendencia a que las concentraciones se acumulen en un rango de horas del día en mayores concentraciones pues a lo largo del día, se evidenció que hay ciertos picos en las horas de la madrugada desde la 1:00 am pero a partir de dicha hora las concentraciones

presentaron una disminución hasta las 5:00 am y desde esa hora aumentan alcanzando las máximas concentraciones de 9:00 am a 11:00 am y luego de 12:00pm a 2:00 pm se estabilizan en menores valores, pero a partir de las 3:00 pm vuelven a subir las concentraciones del material particulado. Este comportamiento no solo se dio en el año 2021 si no también en el año 2022.

En contraste con esto, en la figura 27, se observó el comportamiento de las concentraciones de igual manera para ambos años, pero en temporada de lluvias correspondiente a los meses de enero, marzo, abril, mayo, junio, septiembre, octubre, noviembre y diciembre.

Figura 27. Semana típica en temporada lluviosa 2021 vs 2022 PM10



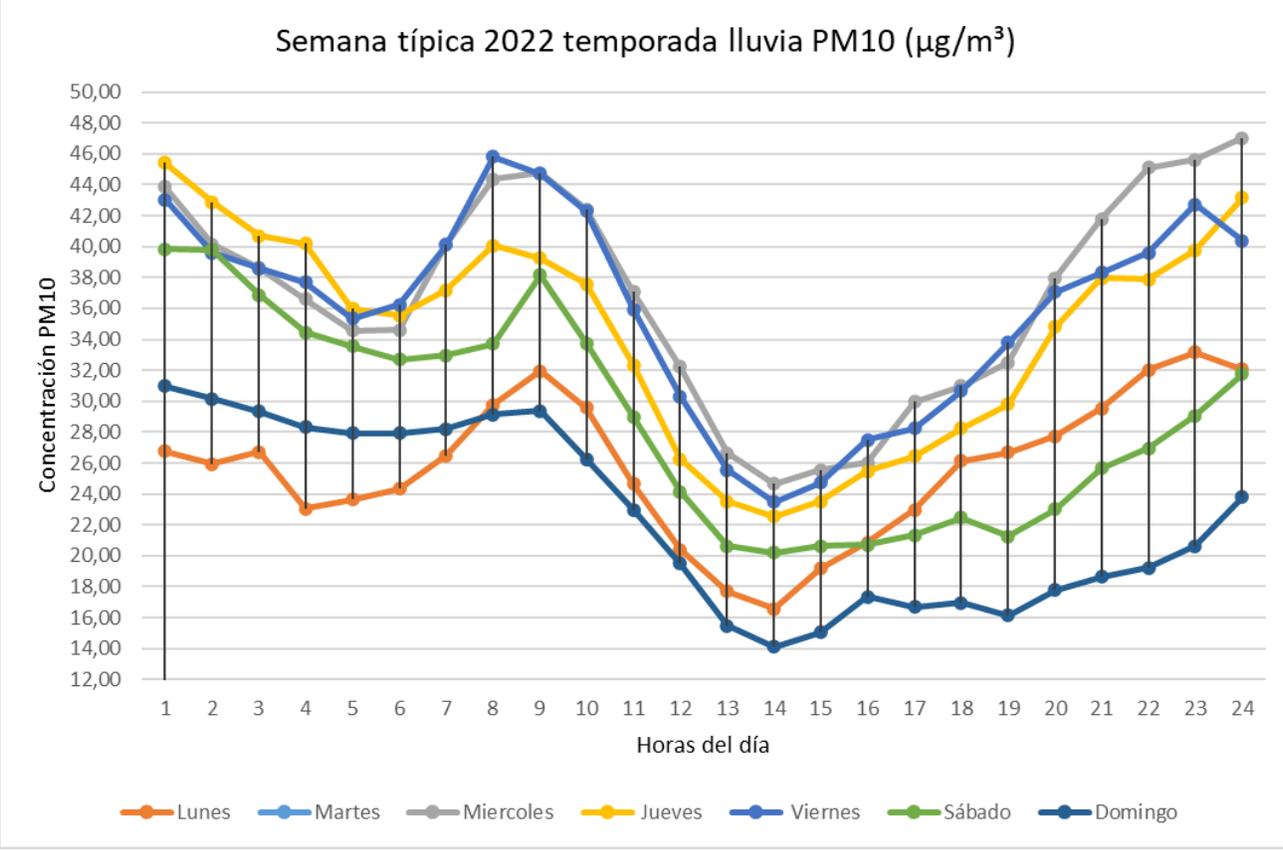
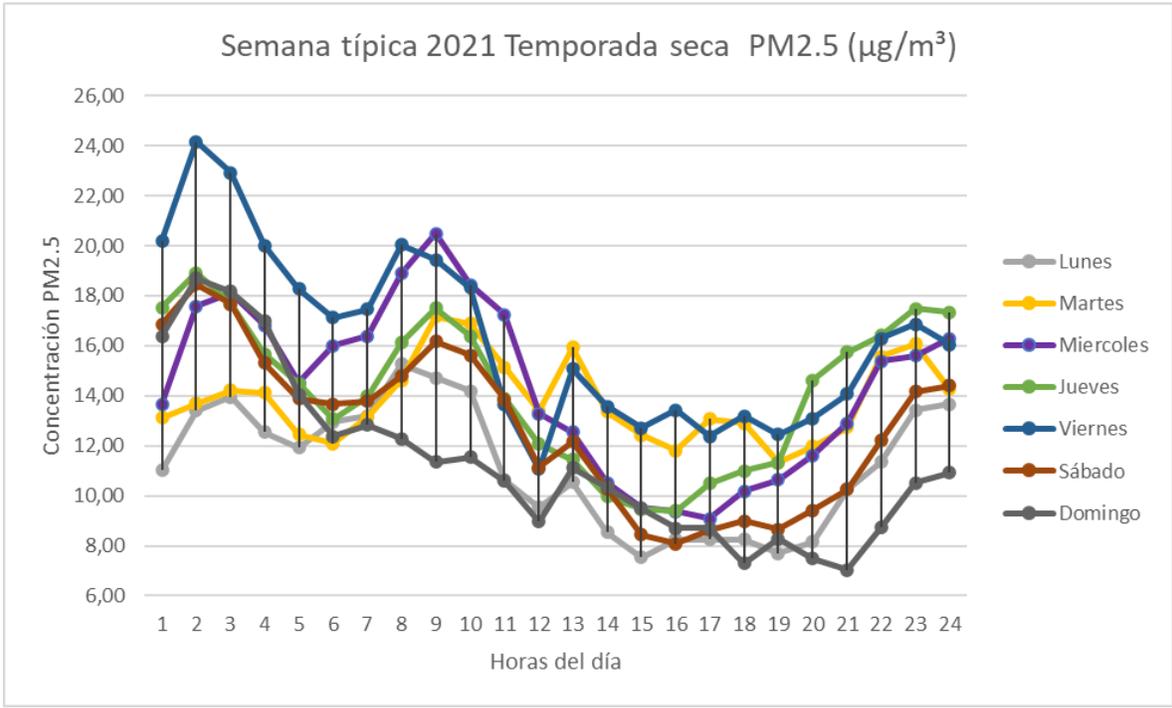


Como se identificó, en esta temporada para el año 2021 y 2022 nuevamente el domingo es el que menor concentración presenta y los días con mayor concentración para ambos años son los viernes y miércoles.

Adicionalmente, se pudo identificar que la tendencia es similar a la presentada en la temporada seca, sin embargo, se logró observar que las concentraciones de los días son más homogéneas en temporada de lluvias que en temporada seca, pues las gráficas de ambos años presentaron mayor similitud en temporada de lluvias, ya que en los meses secos se presentaron más picos y más discrepancias en la tendencia y no mostraron una uniformidad como sí sucedió en los meses de lluvia.

Por otro lado, se pudo observar la comparación en el mismo periodo de investigación en temporada seca, pero en representación del comportamiento del PM2.5 (figura 28)

Figura 28. Semana típica en temporada seca año 2021 vs año 2022 PM2.5



Como se pudo identificar en los periodos de investigación presentaron comportamientos similares para PM2.5 y PM10, en la temporada seca el lunes presentó mayor concentración con un valor de $28\mu\text{g}/\text{m}^3$ en un rango de horario entre las 24:00 pm y 2 am, mientras que los domingos las concentraciones disminuyen entre las 12:00 pm y las 20:00pm, es decir, en la jornada de la tarde a comparación con los demás días de la semana.

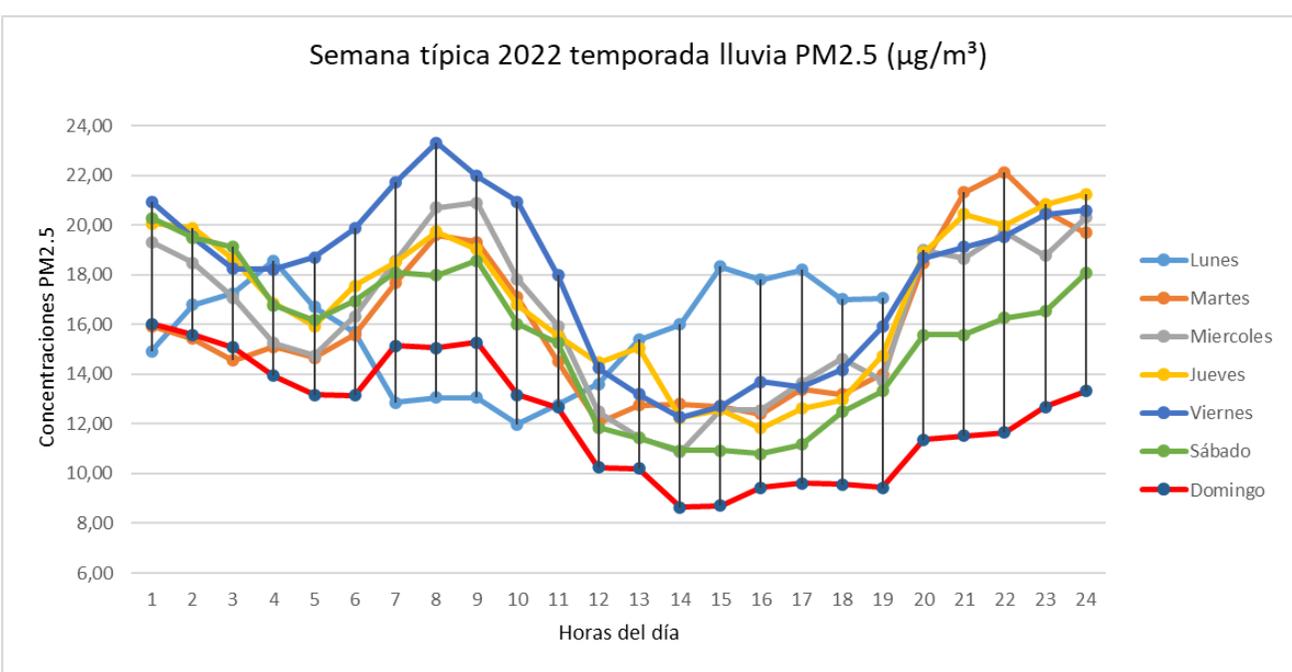
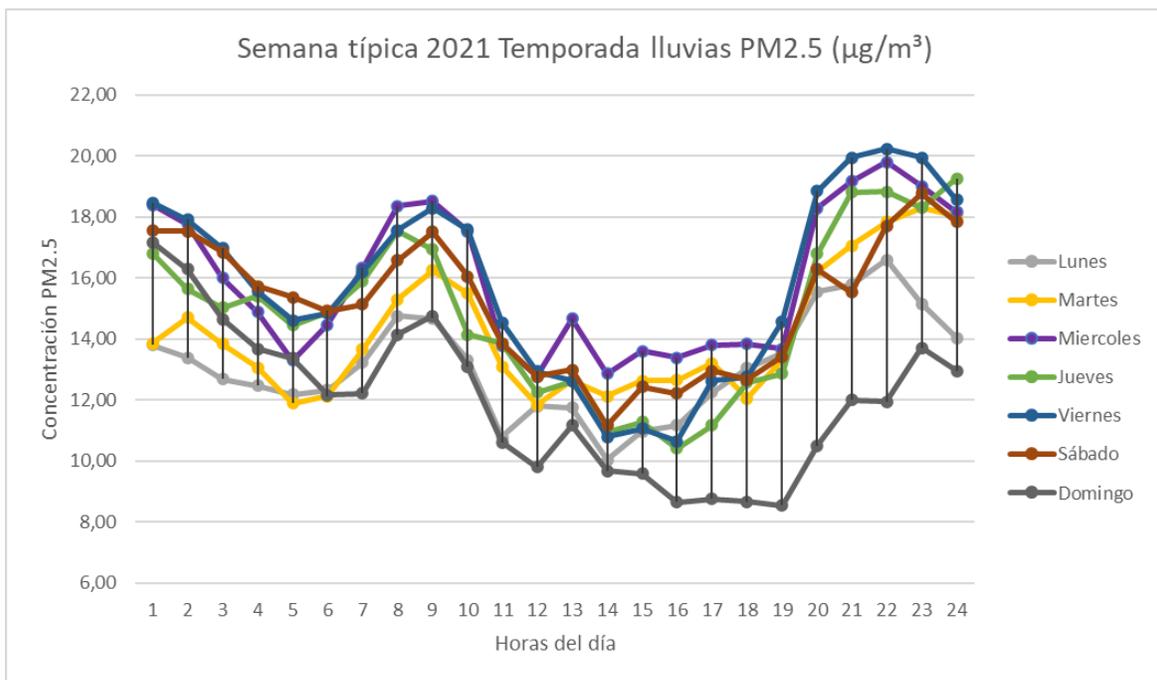
Para el año 2021, el rango general comenzó con la concentración entre $8,00\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $26,00\mu\text{g}/\text{m}^3$ donde en las primeras horas del día las concentraciones son altas en especial los miércoles y viernes donde alcanzaron un pico de $24\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $20\mu\text{g}/\text{m}^3$, en comparación con el domingo y lunes mantienen las concentraciones menores de $12\mu\text{g}/\text{m}^3$. En general los siete días de la semana, tienden a disminuir las concentraciones en la jornada de la tarde (12:00 pm – 22:00 pm) en un rango de concentración entre $8\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $17\mu\text{g}/\text{m}^3$ después vuelven aumentar.

En cuanto al año 2022, el rango general se mantuvo, pero los días lunes sábado y jueves tienen picos a las 8:00 y a las 24:00 pm mientras que los domingos siguen manteniendo bajas concentraciones teniendo como máximo $17\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los siete días de la semana disminuyen en una hora exacta a la 1:00 pm con el transcurso del día va aumentando, siendo el lunes con mayor pico a la hora 24:00 pm, jueves y sábados comparten la misma concentración a pesar de que en el día su comportamiento no es igual y se repite que el domingo y miércoles son los días que al final del día mantienen bajas sus concentraciones.

En ambos años se logró evidenciar un comportamiento similar, puesto que entre la 1:00 am y las 9:00 am sus concentraciones son altas, pero disminuyen después de las 11:00 am volviendo aumentar en la noche aproximadamente a las 22:00 pm.

En contraste con esto, en la figura 29, se observó el comportamiento del PM2.5 de igual manera para ambos años, en la temporada de lluvias correspondiente a los meses de enero, marzo, abril, mayo, junio, septiembre, octubre, noviembre y diciembre.

Figura 29. Semana típica en temporada lluviosa 2021 vs año 2022 PM2.5



Como se identificó, en esta temporada para el año 2021 y 2022 nuevamente el domingo es el que menor concentración presenta y los días con mayor concentración para ambos años son los miércoles, jueves y viernes.

Adicionalmente, se pudo identificar que la tendencia no es similar a la presentada en la temporada seca, puesto que los picos se presentan repetitivamente dos veces por día, es decir, para ambos años se observó que tienden a presentar picos a las 9:00 am disminuyendo gradualmente en el rango entre las 10:00 am y las 19:00 pm volviendo a presentar un pico a las 23:00 y en la temporada seca solo había un ligero pico en horas de la madrugada.

-Temperatura

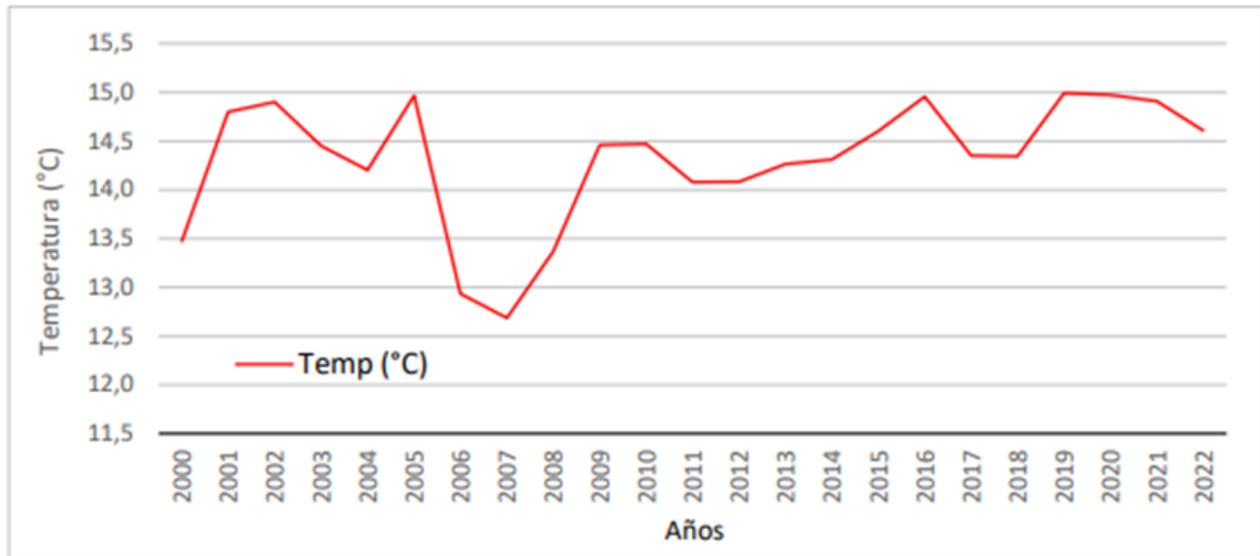
La temperatura es una propiedad de la materia que juega un papel esencial en la calidad del aire. Indica la cantidad de energía interna presente en un lugar y momento específico (RMCAB, 2022). Su relevancia radica en su influencia en la dispersión de contaminantes en la atmósfera varía a lo largo del día, alcanzando temperaturas más bajas durante la noche y la madrugada. Con la llegada del sol, el calentamiento del suelo transfiere calor al aire, lo que provoca un aumento de la temperatura, alcanzando su punto máximo alrededor del mediodía y las tres de la tarde. Este calentamiento del aire genera convección térmica, lo que, a su vez, favorece la dispersión de contaminantes en la atmósfera (RMCAB, 2022).

Sin embargo, existen fenómenos como la inversión térmica. Esta se produce cuando las capas más bajas del aire son más frías que las capas superiores, lo que impide que el aire ascienda y, en consecuencia, dificulta la dispersión de contaminantes. En otras palabras, se crea una especie de tapa de aire caliente que atrapa los contaminantes (Benavides & Mojica, 2019).

Las variaciones climáticas, especialmente en regiones tropicales, desempeñan un papel importante. Durante el día, se forman corrientes convectivas que ayudan al ascenso de masas de aire, lo que puede romper inversiones térmicas y reducir episodios de contaminación, generalmente observados en horas tempranas, especialmente en los meses de enero y febrero (RMCAB, 2022). Esto se relaciona con los datos recopilados en el presente estudio.

En el análisis de los datos recopilados, se observó que las concentraciones más altas se produjeron entre las 22:00 pm y las 4:00 am, lo que confirma la influencia de los patrones mencionados anteriormente. Es importante destacar que no todas las estaciones de monitoreo miden la temperatura, pero según los informes de la RMCAB, la estación Bolivia sí lo hace. Sin embargo, esta discrepancia en los datos puede complicar la comprensión y la integración de la información proporcionada por la estación. Así que a continuación se presenta un histórico de la temperatura de la ciudad en lo corrido de los años, en donde se evidenció que el año 2022 respecto al 2021 descendió la temperatura promedio.

Figura 30. Histórico de temperatura para la ciudad de Bogotá



Fuente: RMCAB, 2023

En un estudio previo realizado por Armenta et al. (2021), titulado "Análisis de la variación de la concentración de PM2.5 en la ciudad de Guanajuato", se relacionó el PM2.5 con la temperatura. En este estudio, se compararon tres años, y se observó que, dos de ellos con temperaturas similares mantuvieron las concentraciones de PM2.5 constantes. Sin embargo, en el tercer año, cuando la temperatura aumentó significativamente, las concentraciones de PM2.5 también se incrementaron. Esto destaca la relación directa entre la temperatura y el aumento de concentraciones.

- Rosa de contaminantes

La rosa de contaminantes desempeña un papel crucial al proporcionar información sobre la dirección del viento, debido a que permitió un análisis desde una perspectiva vectorial, lo que permitió observar cómo se mueven los contaminantes en un plano horizontal. Sin embargo, es importante destacar que el viento también tiene un papel fundamental en la dispersión de los contaminantes en la zona de estudio para mostrar cómo se distribuye; esto puede tener un impacto negativo, ya que puede transportar contaminantes de otras fuentes alterando la calidad del aire (SDA,2022).

Como se puede apreciar en las Figuras 31 y 32 durante el periodo 2021-2022, la dirección del viento para PM10 reveló que la mayor parte de los vientos proviene del norte-noreste (NNE) a aproximadamente 22.5°, seguido por el nor-este (NE) a unos 45° y, en menor medida, del este-noreste (ENE) a alrededor de 67.5°. En cuanto a PM2.5, la orientación de los vientos es similar, predominando nuevamente desde el norte-noreste (NNE) y el norte (N).

Figura 31. Dirección anual de los vientos años 2021 -2022 del contaminante criterio PM10.



Fuente: RMCAB,2023

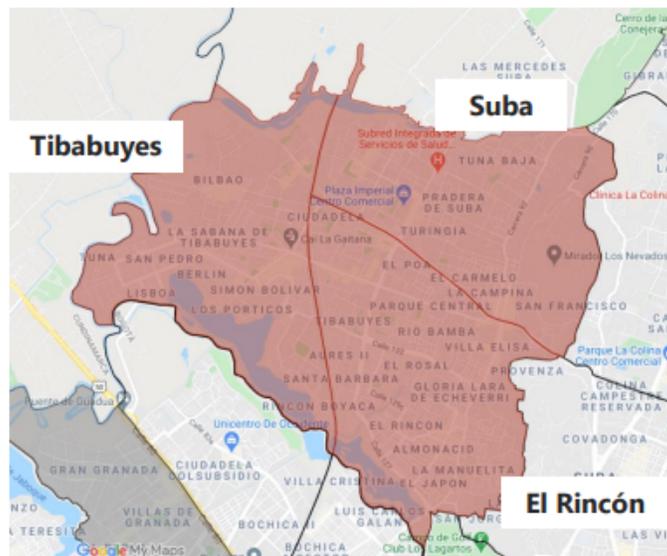
Figura 32. Dirección anual de los vientos años 2021 -2022 del contaminante criterio PM2.5.



Fuente: RMCAB,2023

Desde una perspectiva geográfica, los vientos predominantes en la zona provienen de dos Unidades de Planeamiento Zonal (UPZ): la UPZ 71 Tibabuyes y la UPZ 28 El Rincón, ambas ubicadas en la localidad de Suba (ver Figura 33). En su mayoría, estas zonas están ocupadas por barrios residenciales donde la actividad industrial, que podría generar un impacto significativo, es escasa. Es importante destacar que la estación de monitoreo Bolivia se encuentra situada en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre (PTAR). Sin embargo, gracias a la rosa de contaminantes, se pudo identificar que las emisiones generadas en esta ubicación no afectan significativamente la calidad del aire de la zona de estudio. No obstante, esta instalación puede contribuir a otros tipos de contaminación, como la contaminación auditiva y la emisión de olores ofensivos. Además, es posible que las concentraciones de PM2.5 y PM10 varíen debido al constante tráfico en la Avenida Calle 80, que es una de las principales rutas de salida de Bogotá D.C.

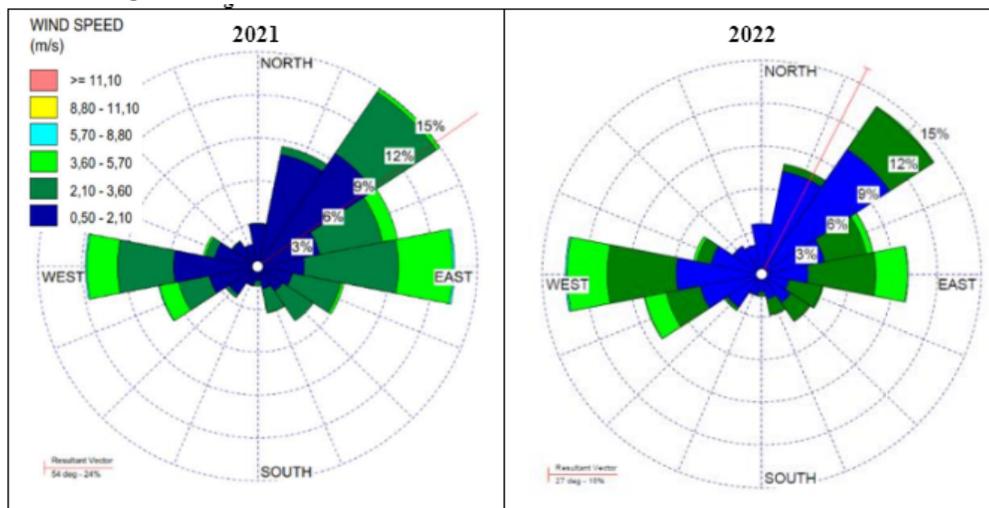
Figura 33. Cartografía cierre por UPZ localidad de Suba



Fuente: Alcaldía local de Suba, 2021.

Cabe resaltar que no hay registro de la rosa de vientos en la estación de monitoreo Bolivia, por lo tanto, se tomó en cuenta la rosa de vientos reportada de la estación de monitoreo Las Ferias (Figura 34), se observó que la velocidad del viento para los dos periodos (2021 y 2022) oscila entre 0,5 m/s y 5,7 m/s predominando la mayor parte toda del nor-este (NE) en un 15% del tiempo. De este modo, comparando con la rosa de contaminantes coincide con la dirección del viento y se puede estimar que puede mantener la misma velocidad anteriormente mencionada.

Figura 34. Rosa de vientos de la estación de monitoreo Las Ferias.



Fuente: RMCAB,2021-2022.

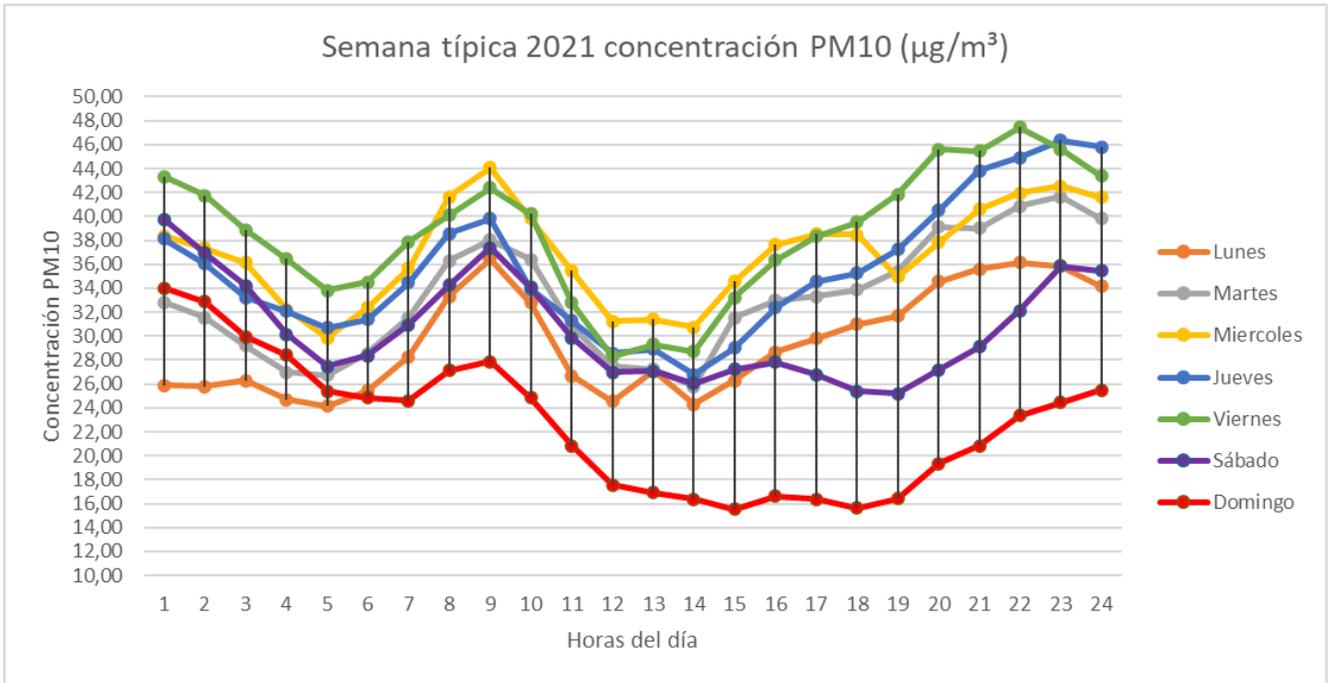
9.3. Objetivo específico 3: Establecer patrones horarios en la concentración de PM2.5 y PM10 para la gestión ambiental en la zona de estudio.

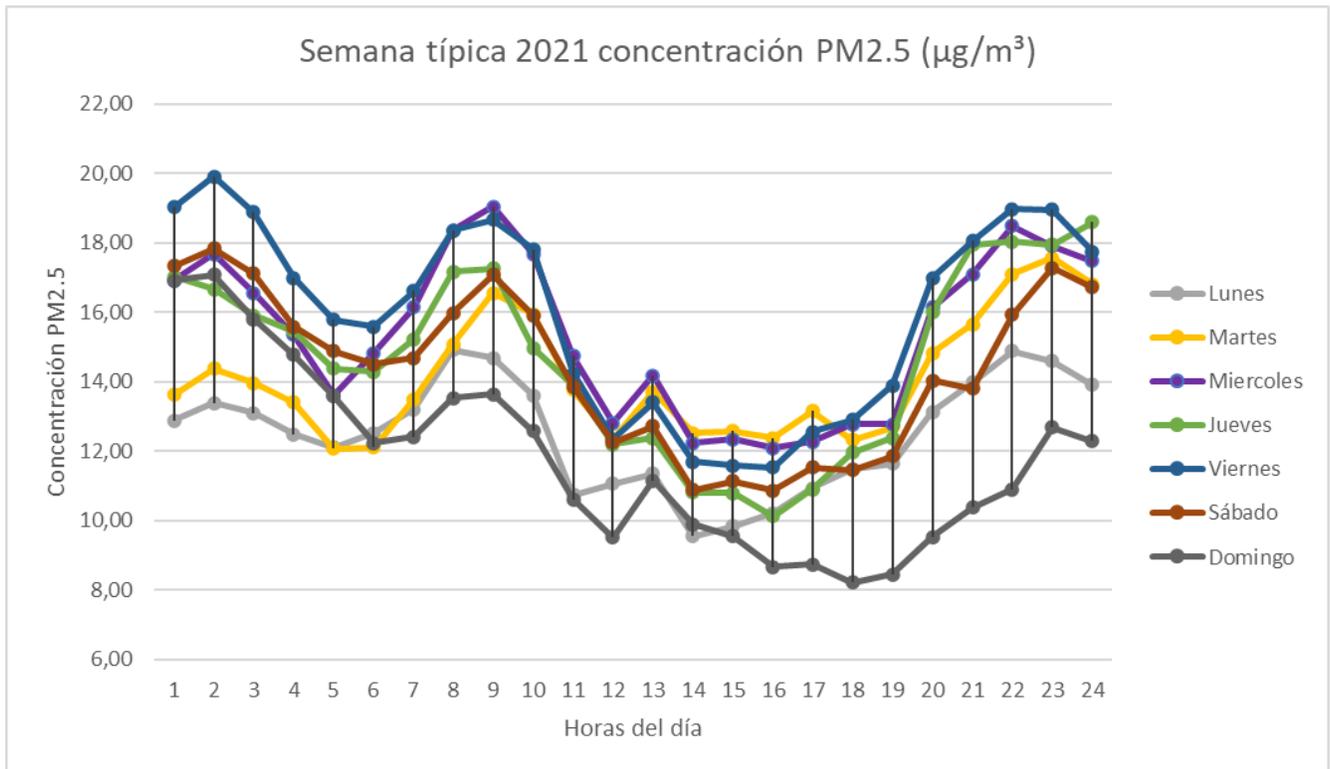
Inicialmente para el desarrollo de este objetivo se tuvo en cuenta la información recopilada en el primer objetivo, la cual, por medio de su procesamiento permitió obtener las horas de más alta concentración por día.

Con base en ello, se procedió a organizar estos hallazgos en calendarios uno para PM10 y otro para PM2.5 y así se organizó mejor dichos patrones que se lograron obtener, esto a modo calendario, estos fueron importantes para la realización de las gráficas del comportamiento de las concentraciones anualmente en los días de la semana, donde se pudo observar las horas pico en la jornada de la mañana o en la jornada de la tarde durante el periodo de la investigación (ver en los anexos 3 y 4).

Por otra parte, para la identificación del comportamiento del PM10 y PM2.5 en los días de la semana se realizaron gráficas que permitieron identificar patrones horarios en las concentraciones de manera anual. A continuación, en la figura 35 se presentó la gráfica correspondiente a una semana típica en el año 2021 para el contaminante PM10 y PM2.5

Figura 35. Semana típica 2021 concentraciones PM10 y PM2.5





En el análisis de los datos de concentración para el año 2021, se obtuvieron 365 datos horarios para cada uno de los contaminantes PM10 y PM2.5. Al observar los patrones de concentración para PM10 en enero, se destacó que, en 16 de los 31 días, las concentraciones más altas se registraron en las horas de la tarde. Sin embargo, no se observó un patrón fijo en la semana, ya que varió según el día. Para PM2.5 en enero, se encontró que 24 días tuvieron las concentraciones más altas en horas de la mañana, con la mayoría de los picos ocurriendo durante la madrugada.

En febrero, 17 días presentaron concentraciones más altas en horas de la tarde para PM10, mientras que 16 días mostraron concentraciones matutinas para PM2.5. En marzo, al igual que en febrero, se observó que la concentración más alta para PM10 ocurrió en la mañana, en 17 días, y para PM2.5, se registraron 22 días con picos de concentración matutina. En abril, en PM10, las horas con mayores concentraciones se distribuyeron de manera más uniforme, sin predominio claro en la mañana o la tarde, para PM2.5, se observó un patrón similar.

En mayo, junio y julio, PM10 siguió el patrón de concentraciones más altas en la tarde, mientras que PM2.5 mostró un patrón similar al de marzo. En agosto, se destacó un patrón interesante para PM2.5, donde durante la tercera semana, la mayoría de los días presentaron picos de concentración a las 2:00 de la mañana. Esto también se repitió en septiembre para PM2.5.

En octubre, PM10 mostró una predominancia de concentraciones más altas en horas de la tarde en 21 días, y para PM2.5, 17 días mostraron un patrón similar. En noviembre, 19 días registraron concentraciones más altas en la tarde para PM10, y 18 días para PM2.5. En diciembre, las

concentraciones más altas prevalecieron en la tarde tanto para PM10 como para PM2.5.

Además, se observó que los datos de los lunes se caracterizaron por un aumento en las concentraciones de la mañana, con picos notables entre las 9:00 y las 10:00 de la mañana y entre la 1:00 y las 2:00 de la madrugada. Sin embargo, las concentraciones de la tarde mostraron una mayor variabilidad, sin un patrón claro.

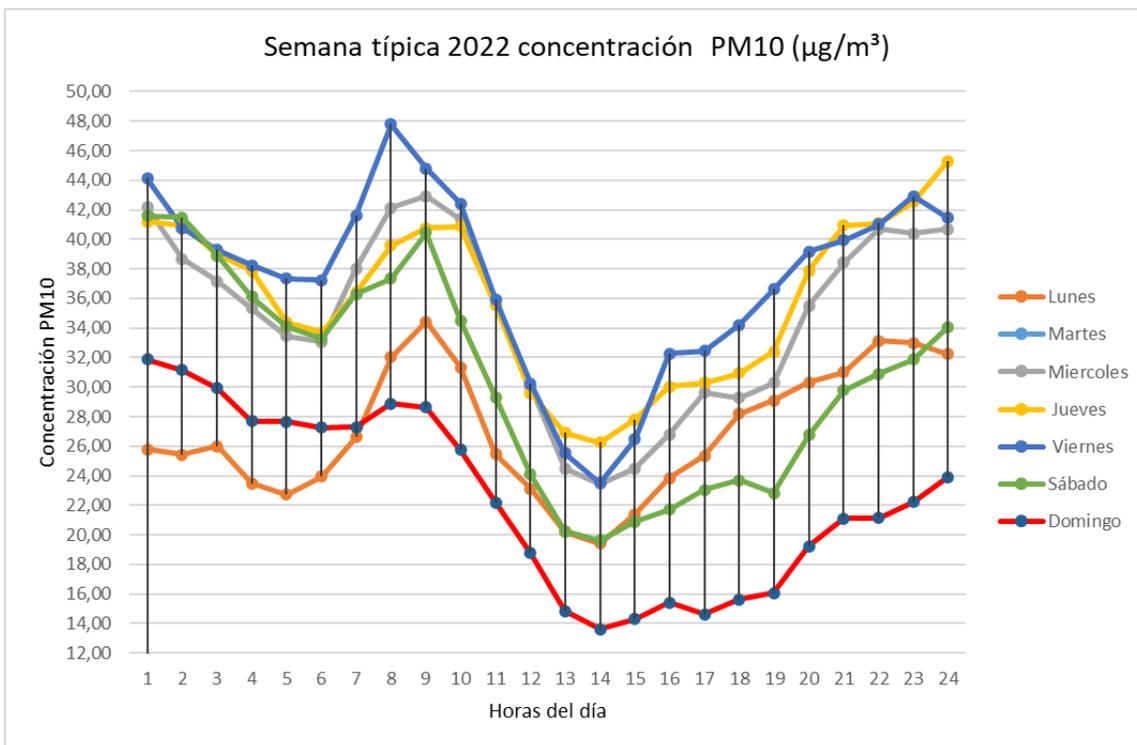
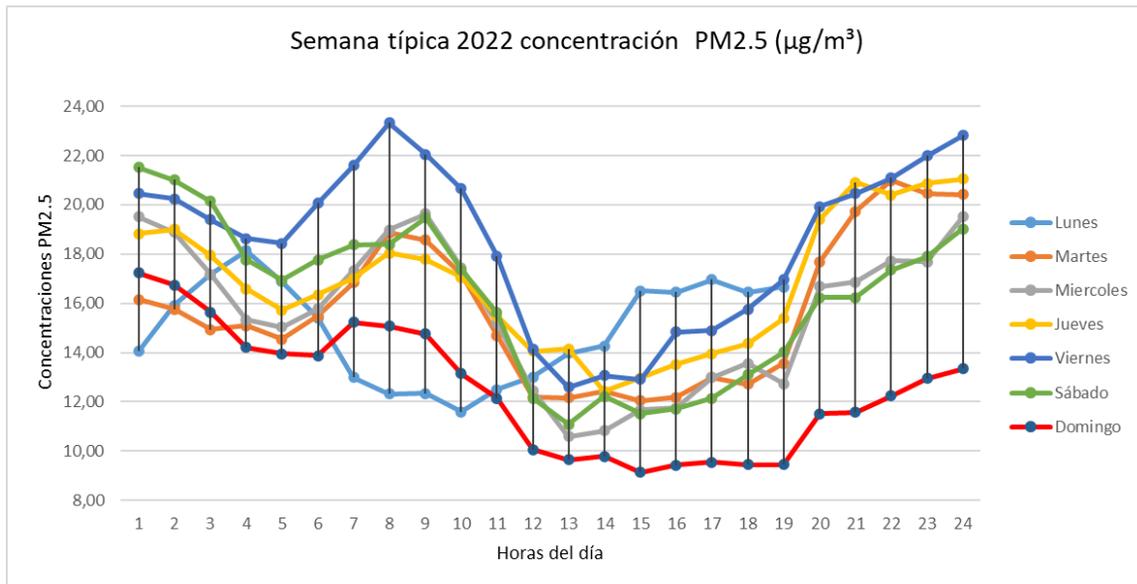
De esta forma y en relación con lo que dice la RMCAB, explica que las concentraciones aumentan desde las 7:00 am y el pico más alto se da entre las 8 y 9 de la mañana lo que concuerda con lo encontrado en los patrones horarios en las concentraciones de PM10 y PM2.5 a lo largo del año, las estaciones con tendencias atípicas hay una influencia notable del comportamiento del tráfico en las vías principales de la ciudad (RMCAB, 2022) Esto se podría relacionar ya que cerca de la zona se encuentra la avenida 80, finalmente las horas con menor recurrencia de horas más altas para este año fueron las 5 y 6 de la mañana.

En concordancia con lo anterior, el PM10 en una semana presentó similitud en días que en general son laborales, es decir de lunes a sábado hay uniformidad en los patrones de concentración, mientras que el domingo evidenció claramente ser el día en el que menos exposición a este material particulado se pudo tener, esto se pudo asociar a que el domingo las actividades industriales y en general la actividad de la población disminuye.

Los días en los que se pudo analizar que hay un ligero aumento de las concentraciones desde las 5:00 pm hasta las 24:00 pm fueron los días jueves y viernes, lo que se pudo inferir en que dichos días son en los que se tienden a realizar actividades en horas de la noche de ocio y esparcimiento, por lo que esto pudo interferir en ese leve aumento en comparación con los demás días, además respecto al PM2.5 se pudo interpretar una diferencia significativa en la tendencia que marcó en la gráfica, lo que quiere decir que mientras que en PM10 no se logró identificar un período en el que se estabilizaron las concentraciones en PM2.5 si, en el rango de horas desde las 14:00 pm hasta las 18:00 pm las concentraciones se mantuvieron y a partir de las 19:00 pm comenzaron a aumentar hasta las 24:00 pm lo cual permitió distinguir que en horas de la noche y la madrugada para el PM2.5 se presentaron rangos de concentración más altos y similares.

A continuación, en la figura 36 se presentó la gráfica correspondiente a una semana típica en el año 2022 para el contaminante PM10 y PM2.5.

Figura 36. Semana típica 2022 concentraciones PM10 y PM2.5



Como se puede apreciar en la figura anterior en el año 2022, se observa que PM10 tiene un comportamiento más dinámico que el de PM2. Durante los primeros cuatro meses del año, las concentraciones aumentan gradualmente en las horas de la tarde, repitiendo franjas horarias desde la 13:00 pm hasta las 23:00 pm. En contraste, las concentraciones no son tan elevadas en las horas de la mañana. Sin embargo, se aprecia un patrón diferente en los picos durante los fines de semana, ya que tienden a ocurrir en horas matutinas, especialmente los domingos, en un rango horario que va desde las

2:00 am hasta las 10:00 am.

En cuanto a la semana típica del contaminante PM_{2.5}, el domingo es el que presentó un comportamiento de disminución en su concentración, ya que, en el transcurso del día empezando con un valor de 32µg/m³ y finalizando con 24µg/m³, mientras que los días jueves y viernes son los que alcanzan mayores picos a las 8:00 am y 23:00 pm, por ende, son días de mayor exposición al contaminante.

Los meses de mayo a septiembre tienen un comportamiento parecido al que se presenta en el informe anual reportado, puesto que el patrón horario muestra que inicia aproximadamente en la madrugada a las 2:00, después hay un incremento en la mañana entre las 8 y 11 oscilando al medio día hasta las 17 p.m., posteriormente se presenta un leve aumento entre las 17 pm y 23:00 p.m. estabilizan al final de la noche (RMCAB,2022).

En cuanto a la semana típica del contaminante PM₁₀, se observa un incremento en las concentraciones durante la mañana, específicamente entre las 6:00 a.m. y las 10:00 a.m. disminuyendo para las horas de la tarde. Estas concentraciones se mantienen relativamente estables hasta la noche, cuando experimentan un crecimiento, posiblemente debido a la hora pico, es decir, al aumento del tráfico en el horario de 6:00 pm a 10:00 pm. Luego, estas concentraciones disminuyen gradualmente hasta llegar a la madrugada.

Por otro lado, para los meses de octubre a diciembre, los picos de concentraciones están orientadas al horario de la tarde y en aumento, asociadas a eventualidades que se presentan a fin de año y a la temporada climática que presenta la ciudad de Bogotá.

En relación con los patrones horarios, se propuso por medio de la gestión ambiental estrategias orientadas al seguimiento y control que contribuyan a preservar la calidad del aire y al mismo tiempo mitigar o prevenir aumentos en las concentraciones de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}). Al mismo tiempo, dentro de la gestión ambiental se pudo encontrar una rama que hace referencia a la gestión ambiental comunitaria la cual promueve ideas colectivas que ayudan a orientar a las autoridades ambientales para solucionar problemáticas y la toma de decisiones relacionadas con la contaminación (Alcaldía Local de Engativá, 2023).

A continuación, se plasmaron las estrategias adaptadas al parque Juan Amarillo - Siete canchas, guiadas por el Plan Ambiental Local de Engativá.

❖ *Estrategia 1*

Incentivar a las autoridades ambientales y locales para la divulgación de información sobre los horarios de exposición al material particulado.

Lugar de interés:

Parque Juan Amarillo - Siete canchas

Responsables:

Alcaldía Local de Engativá
Secretaría de Ambiente
Juntas de acción comunal
Equipo de trabajo

Objetivo:

Promover la sensibilización pública sobre los horarios de exposición al material particulado (PM2.5 y PM10) mediante la colaboración de autoridades ambientales y locales coordinando una agenda pública para convocar reuniones, mesas de diálogo u otros espacios donde los líderes ambientales y demás comunidad discutan temas en conjunto de interés como es la calidad del aire y facilitando la toma de decisiones.

Resultados esperados:

El propósito de esta estrategia es:

- Colocar señalizaciones informativas en lugares estratégicos dentro del parque, para recordar a las personas sobre los horarios de mayor concentración de PM2.5 y PM10 a los que están expuestos los usuarios esto con autorización y aprobación de las entidades encargadas de la divulgación.
- Organizar conferencias, seminarios o talleres relacionados con la calidad del aire y acompañado de la participación de expertos en el campo para compartir conocimientos y experiencias aplicando el campo pedagógico de la educación ambiental.
- Crear una plataforma en línea o una aplicación móvil que permita a los residentes y visitantes acceder fácilmente a la información actualizada sobre horarios de exposición al material particulado.

❖ Estrategia 2

Incentivo para la investigación en Calidad del Aire en la localidad de Engativá.

Lugar de interés:

Parques públicos de la localidad de Engativá

Responsables:

Alcaldía Local de Engativá
Secretaría de Ambiente
Equipo de trabajo

Objetivo:

Proponer la investigación académica y de campo, con el propósito de ampliar el conocimiento acerca de las cuestiones ambientales relacionadas con la calidad del aire. Esto es fundamental debido a la presencia de ecosistemas significativos, que no solo son relevantes para la población local, sino también para toda la ciudad, como es el caso del Humedal Juan Amarillo y otros.

Resultados esperados:

El propósito de esta estrategia es:

- La identificación de áreas de investigación prioritaria en este caso los parques públicos de la localidad de Engativá
- Promover la inclusión y destacar la relevancia de emprender investigaciones centradas en la calidad del aire y su relación con otros recursos naturales, también se espera que esto conduzca a una mayor inversión en investigación académica y a la generación de nuevos conocimientos que pueda respaldar la toma de decisiones y acciones para mantener un control y seguimiento continuo.
- Facilitar el acceso a datos ambientales y recursos necesarios para la investigación, como información de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, estaciones de monitoreo y equipos de medición, entre otros.
- Organizar conferencias, seminarios o talleres relacionados con la calidad del aire y la investigación ambiental acompañado de la participación de expertos en el campo para compartir conocimientos y experiencias.
- Establecer plataformas para la publicación y difusión de resultados de investigación. Esto puede incluir la creación de un repositorio en línea en la página oficial de la Alcaldía local de Engativá donde los investigadores puedan compartir sus resultados.
- Dichas investigaciones sean una línea base para la formulación o modificación de políticas y medidas de gestión ambiental orientadas a temas de calidad del aire.

10. Conclusiones

- La realización de este trabajo de grado ayudó a establecer una línea base sólida, la cual recopiló datos con un enfoque coordinado para llevar a cabo investigaciones relacionadas con la calidad del aire en el área de estudio. En relación con lo anterior esto apoya la toma de decisiones y la implementación de estrategias de gestión de la calidad del aire. Por lo tanto, es fundamental que las autoridades ambientales y otros actores interesados trabajen en conjunto para la protección del ambiente en el área de estudio.
- La metodología fue una herramienta que se diseñó y se aplicó permitiendo obtener una recopilación de información sobre los contaminantes PM2.5 y PM10 para posteriormente organizarlos y procesarlos. Se llevaron a cabo diferentes etapas que incluyeron, la comparación con la normativa y las recomendaciones de la Guía de la OMS sobre la Calidad de Aire-2021, la influencia de factores meteorológicos y la identificación de patrones horarios. Además, ha sentado las bases para la formulación de estrategias de control y seguimiento ambiental que buscan mantener y mejorar la calidad del aire en el Parque Juan Amarillo - Siete Canchas.
- En lo que respecta a los resultados obtenidos en el marco del objetivo específico uno, cabe destacar que ambos años se enmarcan en la categoría favorable, representada por el color verde en las escalas de IBOCA para PM10, mientras que las de PM2.5 se sitúan en una categoría moderada. Además, es relevante señalar que el cumplimiento de la normativa en ambos años es cercano al 100%, indicando que se está respetando ampliamente lo establecido por las regulaciones nacionales. En cuanto a las diferencias entre los promedios de concentración a lo largo de los dos años, estas son relativamente pequeñas, oscilando entre 1 y 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto sugiere que el comportamiento de las concentraciones se mantuvo constante en estos periodos. No obstante, se observó que, al comparar con los límites propuestos por la Guía de la OMS

sobre la Calidad de Aire-2021 (GCA), los porcentajes de aproximación a lo sugerido disminuyen. Es crucial tener en cuenta que la GCA tiene una relación significativa entre la exposición a partículas finas (PM2.5) y la mortalidad prematura, lo que pone de manifiesto la necesidad de ser cautelosos en lo que respecta a la salud de la población.

- La cooperación entre países es fundamental para abordar los impactos generados por la calidad del aire y garantizar un ambiente saludable y seguro para la población, dado que la contaminación del aire no respeta fronteras y constantemente habrá una exposición a la salud humana.
- En relación con el objetivo específico dos, se ha logrado demostrar que la meteorología ejerce una influencia significativa en el comportamiento de las concentraciones de material particulado, tal como se evaluó en los años 2021 y 2022. Para el desarrollo de este apartado se enfocó especialmente en los siguientes factores meteorológicos, precipitación, temperatura y viento. Aunque se debe destacar que, lamentablemente, no fue posible considerar la influencia de la velocidad y dirección del viento debido a la falta de datos específicos disponibles en la estación de monitoreo, pues en ningún rango de tiempo se reportan. El análisis de estos tres factores meteorológicos ha reforzado la comprensión de la importancia de los componentes abióticos en un estudio de calidad del aire. Además, ha subrayado cómo la falta de información sobre ciertos parámetros, como la velocidad y dirección del viento, puede dificultar la capacidad de pronosticar, prevenir y mitigar posibles eventos. En conclusión, este estudio resalta la necesidad de considerar factores meteorológicos como parte integral de la investigación en calidad del aire y la importancia de contar con información detallada y precisa para abordar eficazmente los desafíos relacionados con la contaminación del aire en la zona de estudio.
- Siguiendo las gráficas de PM10 en temporada seca y temporada de lluvia en relación con el comportamiento anual a nivel semanal de este contaminante, se concluyó que las concentraciones en la temporada seca presentaban una mayor variabilidad en comparación con el comportamiento anual. Las tendencias no eran tan definidas como las que se observaban en el promedio anual de los años. Por otro lado, en la temporada de lluvias, en relación con el comportamiento de una semana típica a lo largo del año, se observaron tendencias y patrones que coincidían de manera más notable en comparación con la temporada seca. Esto sugería que la similitud se relacionaba con el hecho de que la temporada de lluvias, al ser el período más extenso del año, destacaba y modificaba significativamente las concentraciones de PM10 en contraste con la temporada seca.
- En cuanto al PM2.5, es relevante destacar que las concentraciones en los años 2021 y 2022 mostraron un comportamiento más notable en comparación con el PM10 en ambos años. Además, se observó que, durante la temporada seca, las concentraciones se mantenían en un rango similar, pero experimentaron variaciones significativas a lo largo del día en comparación con el promedio anual. Por otro lado, en las temporadas de lluvias, nuevamente se pudo observar un comportamiento similar en ambos años en comparación con el promedio anual.

Esto sugería una mayor estabilidad en las concentraciones de PM_{2.5} durante las temporadas de lluvias en contraste con las fluctuaciones más pronunciadas en la temporada seca.

- Dado que no se pudo obtener los datos necesarios para construir la rosa de vientos en la investigación, se optó por usar la rosa de contaminantes, como herramienta de decisión, y confirmar el comportamiento con la rosa de vientos de la Estación Las Ferias. Este factor desempeña un papel crucial al proporcionar una representación gráfica de cómo se distribuyen los contaminantes en el aire. Esta aproximación permitió obtener información indirecta que contribuyó a llenar la brecha de conocimiento dejada por la falta de datos de la rosa de vientos. La rosa de contaminantes se convirtió en una herramienta para comprender la procedencia de los contaminantes en el área de estudio.
- En el proceso de identificación de los momentos del día con las mayores concentraciones de material particulado (PM₁₀ -PM_{2.5}), se evidenció que las horas con las concentraciones más elevadas en general abarcaban desde las 22:00 PM hasta las 2:00 AM, con un segundo pico de concentración que se presentaba entre las 7:00 AM y las 9:00 AM. Por lo tanto, se dedujo que los mejores momentos para visitar el parque y reducir la exposición al material particulado se situaban en el intervalo de las 12:00 PM a las 2:00 PM, ya que en las demás franjas horarias se volvía a registrar un aumento en las concentraciones. Adicionalmente, se observó de manera consistente en todas las gráficas que los días domingo presentaban las concentraciones más bajas en comparación con los otros días de la semana. Por tanto, los domingos se perfilan como los días ideales para disfrutar de una exposición reducida al material particulado, mientras que los días con mayor exposición solían concentrarse en los miércoles, jueves y viernes.
- El objetivo específico tres permitió formular estrategias destinadas a preservar y mejorar la calidad del aire en la zona de estudio. Gracias a la información de estos patrones y la comprensión de cómo se comportan los contaminantes a lo largo de una semana típica anual para los dos periodos de investigación, se pudo identificar los días y, particularmente, las horas críticas en las que tanto la comunidad local como el entorno ambiental están más expuestos a la contaminación del aire. Este enfoque brindó la oportunidad de replantear estos patrones horarios como una base sólida para el desarrollo de estrategias efectivas. Estas estrategias tienen como objetivo mejorar el control y seguimiento de la calidad del aire en la zona. Además, han sido concebidas para proporcionar información valiosa tanto a las autoridades pertinentes como a la comunidad en general. Esto promueve la idea de que dichas estrategias sean utilizadas para implementarlas en un plan de gestión ambiental enfocado en el sector.
- El trabajo de grado permitió aplicar un enfoque interdisciplinario de la ingeniería ambiental como lo son la meteorología, la ecología y la gestión ambiental, enriqueciendo significativamente la comprensión de este tema complejo, permitiendo una visión integral que facilitó la comprensión de la interacción de diferentes factores asociados a la concentración de material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) en especial en la zona de estudio.

11. Recomendaciones

- Dado que esta investigación se soporta en años base posteriores al 2020, se sugiere que este trabajo sirva de motivación para futuros estudios relacionados con la estación y otras áreas de la localidad, con históricos más amplios en el tiempo.
- Se sugiere que en la estación de monitoreo Bolivia, se asegure la recopilación de datos de variables meteorológicas para evitar vacíos significativos en la información.
- Es crucial considerar que, aunque existe un plan local ambiental para la localidad, la implementación de estrategias aumenta la efectividad de un instrumento vital para la planeación ambiental. En consecuencia, se recomienda fortalecer la contribución de ideas que impulsen la ejecución efectiva de estos planes.

12. Referencias Bibliográficas

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos - EPA. (2023). Conceptos básicos sobre el material particulado (PM por sus siglas en inglés). Recuperado en 13 de septiembre de 2023. <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles#PM>

Alcaldía Local de Engativá. (2020). Diagnóstico Local Alcaldía Local de Engativá. Tomado de: https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/documento_tecnico_pdl-engativa.pdf

Alcaldía Local de Engativá, (2023). Plan Ambiental Local. Observatorio Ambiental de Bogotá. Tomado de: https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=23570

Arango, D. (2019). Humedales, aliados del aire en Bogotá. Plaza Capital. Recuperado en 12 de septiembre de 2023. <https://plazacapital.co/zona-eco/3831-humedales-aliados-del-aire-en-bogota#:~:text=Los%20humedales%20capturan%20el%20di%C3%B3xido,soporta%20esa%20producci%C3%B3n%20de%20ox%C3%ADgeno.>

Aránguez, Emiliano, Ordóñez, José María, Serrano, Javier, Aragonés, Nuria, Fernández-Patier, Rosalía, Gandarillas, Ana, & Galán, Iñaki. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Revista Española de Salud Pública*, 73(2), 123-132. Recuperado en 12 de Septiembre de 2023, de [http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57271999000200003&lng=es&tlng=pt.](http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57271999000200003&lng=es&tlng=pt)

Arciniegas Suárez, César Augusto. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable pm10. Luna Azul, (34), 195-213. Retrieved October 21, 2023, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742012000100012&lng=en&tlng=es.

Armenta M., D., Chávez M. Isabel C, I. C., Gutiérrez T. Victoria J, V. J., Velázquez S., E. Y., Mendoza P., L. E., Esquivel L., M. I., Zamorategui, M. A., & Delgado G., X. (2021). Análisis de la variación de la concentración de PM 2.5 en la ciudad de Guanajuato; Gto. JÓVENES EN LA CIENCIA, 10. Recuperado a partir de <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3280>

Arrieta-Fuentes, A J. (2016). Dispersión de material particulado (PM10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. Ingeniería Investigación y Desarrollo, 16(2), 43-54. <https://doi.org/10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5445>

Benavides, M & Mojica, V. (2019). Análisis de la influencia de los techos verdes en la variación de la concentración del material particulado (PM10) en condiciones diurnas en Bogotá. Universidad el Bosque.

Blanco-Becerra, L, Gáfarro-Rojas, A y Rojas-Roa, N. (2015). *Influencia del efecto barrido en la relación PM2.5/PM10 en la localidad de Kennedy de Bogotá, Colombia.*

Carril, E. P. U. (2011). Fotosíntesis: aspectos básicos. Reduca (Biología), 2(3).

CONPES. (2018). CONPES 3943: Política para el mejoramiento de la calidad del aire. Bogotá, D.C. Departamento Administrativo de la Presidencia de la República.

Chaparro Santoyo, J. D. (2021). Diagnóstico de la incidencia del PM2.5 en la salud de los habitantes de la localidad de Engativá y propuesta de prevención y mitigación de los impactos adversos de la contaminación del aire en la salubridad de la zona. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11349/26672>.

Escobar, J. (2018). Reporte Humedales: Humedal Tibabuyes - Juan Amarillo. Recuperado de: <https://humedalesbogota.com/2020/01/20/reporte-humedales-humedal-tibabuyes-juan-amarillo/>

García, F & Arias, K. (2021). Evaluación de la carga de material particulado PM2.5 a los que están expuestos los receptores humanos en la ladrillera Santa Ana Clay y sus alrededores en el municipio de Cogua Cundinamarca. Universidad el Bosque. https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/7341/Garcia_Granados_Willfran_Fabian_2021.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Hernández, R.; Fernández, C. & Baptista, P. (2010). Metodología de la investigación. Recuperado de https://www.esup.edu.pe/descargas/dep_investigacion/Metodologia%20de%20la%20investigacion%205ta%20Edicion.pdf

IDEAM. (2023). Contaminación atmosférica. Recuperado en 13 de septiembre de 2023. <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/contaminacion-atmosferica>

IDIGER. (2023). Caracterización climatológica de Bogotá, como un aporte al fortalecimiento de la red hidrometeorológica de Bogotá. Tomado de: <https://www.idiger.gov.co/documents/20182/558631/Caract+Climatol%C3%B3gica+-+Bogot%C3%A1+%281%29.pdf/b5dbcea1-d291-40a0-8ee8-71ca322edcab>

Jardín Botánico de Bogotá, D. C. (2023). PEDH Tibabuyes. Disponible en: <https://jbb.gov.co/generacion-de-conocimiento/pedh-tibabuyes/#Biodiversidad>

Mariño Pinzon, E. (2020). Estableciendo la relación entre eventos de precipitación y concentración de material particulado en la ciudad de Bogotá. Universidad de los Andes.

Mesa, D., Aguirre, C., Castañeda, D., Madrigal, S. (2017). Parque Colsubsidio – Parque Juan Amarillo. Instituto Distrital de Recreación y Deporte, Alcaldía de Bogotá. Disponible en: <https://www.caucearquitectura.com/parque-juan-amarillo-1>

Ministerio de Medio Ambiente. (2017). Resolución 2254 de 2017. Normas de calidad del aire y gestión del recurso aire en el territorio nacional, 2.

Montes, T. V., & Jerez, C. A. R. (2021). Efectos de la vegetación en cañones urbanos en relación con la contaminación atmosférica generada por material particulado. *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*, 46.

Mora, s. a. s. (2022). Análisis de la calidad de aire (pm10) influenciada por la obra civil en la parroquia tarqui de guayaquil, 2022 (doctoral dissertation, universidad agraria del ecuador).

RM CAB. (2021). Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá Año 2021. Tomado de: http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/informe%20anual%202021_.pdf

RM CAB. (2022). Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá Año 2021. Tomado de: <http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/Informe%20anual%202022.pdf>

Robles Morales, E. G., Medina Escudero, A. M., & Medina Escudero, C. S. (2019). La contaminación del aire por el material particulado y su relación con las enfermedades de tipo respiratorio en la población de Cerro de Pasco (2010 y 2016). *Industrial Data*, 22(1), 173-179.

Montoya, C. (2014). Clasificación Estaciones de Monitoreo de Calidad del Aire. Área metropolitana del valle de aburrá. Universidad Pontificia Bolivariana. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Estudios-calidad-del-aire/Informe-caracterizacion-estaciones-2014.pdf>

Observatorio Ambiental de Bogotá. (2022). Red de Monitoreo de Calidad del Aire. Tomado de: <https://oab.ambientebogota.gov.co/red-de-monitoreo-de-calidad-del-aire/>

ONU. (2022). ¿Cómo se mide la calidad del aire? Recuperado en 13 de septiembre de 2023. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/como-se-mide-la-calidad-del-aire>

Organización Mundial de la Salud OMS. (2022). Contaminación del aire ambiente (exterior). Recuperado en 13 de septiembre de 2023. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Organización Panamericana de la Salud OPS. (2016). Calidad del aire. Recuperado en 13 de septiembre de 2023. <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>

Pacheco, Patricio R., Parodi, María C., Mera, Eduardo M., & Salini, Giovanni A. (2020). Variables meteorológicas y niveles de concentración de material particulado de 10 μm en Andacollo, Chile: un estudio de dispersión y entropías. *Información tecnológica*, 31(6), 171-182. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000600171>

Pinto Herrera, L. C., & Méndez Espinosa, J. F. (2015). Evaluación del impacto en calidad del aire, asociado a resuspensión de material particulado por la pavimentación de la vía principal de Caracolí - Ciudad Bolívar, Bogotá D.C. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/325

Pomares Zambrano, L. (2021). Influencia de las zonas verdes urbanas y de viario público en la calidad del aire de Sevilla: una visión desde el bienestar social. (Trabajo Fin de Máster Inédito). Universidad de Sevilla, Sevilla.

RAMSAR. (1997). Servicios de los ecosistemas de humedales - introducción. Recuperado en 12 de septiembre de 2023. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/services_00_s.pdf

Rodríguez-Camargo, L. A., Sierra-Parada, R. J., & Blanco-Becerra, L. C. (2020). Análisis espacial de las concentraciones de PM_{2.5} en Bogotá según los valores de las guías de la calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud para enfermedades cardiopulmonares, 2014-2015. *Biomédica*, 40(1), 137-152.

Russi, D., ten Brink, P., Farmer, A., Badura, T., Coates, D., et al. (2013). *The economics of ecosystems and biodiversity for water and wetlands*. London and Brussels: IEEP; Gland: Ramsar Secretariat

Secretaría Distrital de Salud. Observatorio de Salud de Bogotá-SaluData. Disponible en <https://saludata.saludcapital.gov.co/osb/>.

Secretaría Distrital de Ambiente. IBOCA. Disponible en <http://iboca.ambientebogota.gov.co/publicaciones/175/que-es-el-iboca/>

Secretaría Distrital de Ambiente (SDA). (2022). Informe anual de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de Bogotá D.C. Disponible en: <http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/Informe%20anual%202022.pdf>

Speake, M. A., Carbone, M. E., & Spetter, C. V. (2020). Análisis del sistema socio-ecológico del estuario Bahía Blanca (Argentina) y su impacto en los servicios ecosistémicos y el bienestar humano. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, (73), 121-145.

Tarazona, P. (2018). Evaluación de la calidad de aire por emisiones de material particulado (PM₁₀) en la vereda Mochuelo-Alto Bogotá DC.

Torres, C. (2019). Estrategias de recuperación y conservación de la zona de amortiguamiento del humedal Juan Amarillo, intervenida por el “proyecto parque Juan Amarillo”, en área de influencia de los barrios cortijo y ciudadela Colsubsidio de la localidad de Engativá. [Ingeniero Ambiental]. Bogotá: Universidad del Bosque.

Weatherspark. (2023). El clima y tiempo promedio de Colombia. Tomado de: <https://es.weatherspark.com/y/23310/Clima-promedio-en-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>

World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization.

13. Anexos

13.1. Gráficas de emisiones de PM10 y PM2.5 cada 24h durante los años 2021-2022 y su comparación con la normativa nacional y la GCA.

Anexo 1. Año 2021 (Archivo Excel)

Anexo 2. Año 2022 (Archivo Excel)

13.2 Semanas típicas anuales 2021-2022 y los calendarios del comportamiento diario de las concentraciones PM2.5 y PM10

Anexo 3. Año 2021 (Archivo Excel)

Anexo 4. Año 2022 (Archivo Excel)