



**Análisis de las concentraciones de PM 2.5 en relación con la cobertura vegetal
en las comunas de Medellín, año 2024.**

Jeeferson Fernandez Sierra

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título Especialista en
Sistemas de información geográfica.

Asesor (a): Juan Sebastián Grisales

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Sistemas de Información Geográfica
Manizales,
Año 2025

Cita	(Fernandez Sierra, 2025)
Referencia	Fernandez Sierra, J. (2025). <i>Análisis de las concentraciones de PM2.5 en relación con la cobertura vegetal en las comunas de Medellín, año 2024</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como [mencionar herramientas utilizadas, por ejemplo, ChatGPT, Grammarly, Turnitin, Copilot, Gemini, entre otras], de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

Fondo Editorial: <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
1. planteamiento del problema.....	12
1.1. Antecedentes	14
2. Justificación	18
3. objetivos.....	19
3.1. Objetivo general	19
3.2. Objetivos específicos.....	19
4. Hipótesis	20
4.1 Hipótesis de trabajo.....	20
4.1.1. Hipótesis.....	20
5. Marcos de referencia.....	21
5.1. Marco teórico	21
5.1.1 Contaminación por material particulado (PM2.5)	21
5.1.2 Evaluación de la variabilidad espacial del PM2.5	21
5.1.3 sensores remotos y cobertura vegetal urbana.....	22
5.1.4 Evaluación de la cobertura vegetal mediante NDVI.....	22
5.1.5 Relación de NDVI-PM2.5 mediante método Spearman.....	23
5.2. Marco Normativo y legal	24
6. Metodología.....	26
6.1. Enfoque metodológico	26
6.2. Tipo de estudio	26
6.3 Procedimiento.....	26

6.3.1 Recolección de información secundaria por medio de plataformas como el servicio geológico de los Estados Unidos (USGS), las estaciones del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA) y el portal Geomedellín de la Alcaldía de Medellín.	26
6.3.2 Tratamiento y preprocesamiento de información.	29
6.3.3 Calculo del índice de vegetación de diferencia normalizada anual NDVI, a partir de herramientas de teledetección para el año 2024.	30
6.3.4 Análisis de la variabilidad espacial de las concentraciones de PM2.5 en las comunas de Medellín durante el año 2024.	31
6.3.5 Establecer la relación espacial entre las concentraciones de PM2.5 y NDVI mediante el uso de técnicas estadísticas y SIG.....	32
7. Resultados	33
7.1. Recolectar información secundaria por medio de la plataforma del servicio geológico de los Estados Unidos (USGS), las estaciones del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA) y el portal Geomedellín de la Alcaldía de Medellín.....	33
7.1.1 Recolección de datos del servicio geológico de los Estados Unidos (USGS).....	33
7.1.2 Recolección de datos de las estaciones del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá	34
7.1.3. Recolección de datos del portal Geomedellín de la Alcaldía de Medellín	35
7.2. Calcular el índice de vegetación de diferencia normalizada anual NDVI, a partir de herramientas de teledetección para el año 2024.....	37
7.3. Analizar la variabilidad espacial de las concentraciones de PM2.5 en las comunas de Medellín durante el año 2024.....	40
7.4. Establecer la relación espacial entre las concentraciones de PM2.5 y el NDVI mediante el uso de técnicas estadísticas y SIG	42
8. Discusión.....	45
9. Conclusiones	47
10. Recomendaciones.....	48
Referencias	49

Lista de tablas

Tabla 1. Características de imágenes utilizadas (Landsat 8 y landsat 9)	33
Tabla 2. Características de estaciones de PM2.5 usadas para la interpolación IDW	34
Tabla 3. <i>Tabla de atributos de mapa base de Medellín distribuido por comunas</i>	36
Tabla 4. <i>Tabla de atributos de mapa base de Medellín distribuido por comunas</i>	39
Tabla 5. <i>Valores promedio de PM2.5 y cobertura vegetal urbana por comunas de Medellín, año 2024</i>	42

Lista de figuras

Figura 1 <i>Localización del área de estudio. Fuente: propia elaboración (2025)</i>	12
Figura 2 <i>Visualización de proceso de descarga de imágenes satelitales desde el portal USGS</i> .	27
Figura 3 <i>Visualización de proceso de descarga de datos desde el portal del SIATA</i>	28
Figura 4 <i>Visualización de proceso de descarga de datos de forma desde el portal Geomedellín</i>	29
Figura 5 <i>Visualización de imágenes satelitales cortadas al área de estudio del proyecto</i>	34
Figura 6 <i>Visualización de mapa de delimitación de Medellín por comunas</i>	36
Figura 7 <i>Porcentajes de cobertura vegetal por comunas de Medellín, 2024</i>	38
Figura 8 <i>Distribución espacial de las Concentraciones de PM2.5 por Comunas en Medellín, 2024</i>	40
Figura 9 <i>Concentración promedio anual de PM2.5 por comunas de Medellín con límites normativos de referencia</i>	42
Figura 10 <i>Asociación entre concentraciones de PM2.5 y porcentajes de cobertura vegetal por comunas de Medellín, 2024</i>	43

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AE:	Autocorrelación Espacial
AMVA:	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
EPA:	Environmental Protection Agency
GI:	Greenness Index (Índice de verdor)
GWR:	Regresión Geográficamente Ponderada
IND:	Inverse Distance Weighting
NDVI:	Normalized Difference Vegetation Index
OMS:	Organización mundial de la salud
OPS:	Organización Panamericana de la salud
PM:	Material Particulado
PM 2.5:	Material Particulado de 2.5 μ m
SIATA:	Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá
USGS:	Science for a changing world

Resumen

El objetivo principal de esta investigación fue determinar cuál es la asociación entre las concentraciones de material particulado PM 2.5 y la cobertura vegetal en las comunas de Medellín durante el año 2024. El proceso se llevó a cabo mediante el uso de instrumentos de teledetección y sistemas de información geográfica, calculando el índice de diferencia normalizada (NDVI) a partir de la previa recolección de imágenes satelitales Landsat 8 y Landsat 9. Para determinar la variabilidad espacial del contaminante PM2.5 en las 16 comunas de la ciudad de Medellín, se aplicó el método de interpolación IDW con el software Q gis. Adicionalmente, se empleó el modelo de correlación de Spearman para determinar la asociación entre ambas variables.

Los resultados evidenciaron que las mayores concentraciones de PM2.5 se situaron en las comunas céntricas de la ciudad (La Candelaria, Laureles-Estadio), adicionalmente, estas comunas presentan porcentajes de vegetación considerablemente bajos. En contraste, la cobertura vegetal presenta una distribución desigual entre las comunas, con mayor concentración en áreas periféricas de Medellín. Sin embargo, la asociación realizada con método de correlación Spearman arrojó una relación negativa y débil (-0,091), demostrando que a pesar de que se presenta una correlación inversa, esta no es influyente por si sola, por lo que se deben considerar otros elementos como flujo vehicular, densidad poblacional, usos de suelo, topografía, tipo de vegetación, entre otros factores que pueden incidir en la variabilidad espacial del PM2.5.

Abstract

The main objective of this research was to determine the association between PM 2.5 particulate matter concentrations and vegetation cover in the municipalities of Medellín during the year 2024. The process was carried out using remote sensing instruments and geographic information systems, calculating the normalized difference index (NDVI) from previously collected Landsat 8 and Landsat 9 satellite images. To determine the spatial variability of PM2.5 pollution in the 16 districts of the city of Medellín, the IDW interpolation method was applied using QGIS software. Additionally, Spearman's correlation model was used to determine the association between the two variables.

The results showed that the highest concentrations of PM2.5 were found in the central districts of the city (La Candelaria, Laureles-Estadio), which also have considerably low percentages of vegetation. In contrast, vegetation cover is unevenly distributed among the districts, with higher concentrations in the outskirts of Medellín. However, the Spearman correlation method yielded a weak negative relationship (-0.091), demonstrating that although there is an inverse correlation, it is not influential on its own, so other elements must be considered, such as traffic flow, population density, land use, topography, and vegetation type, among other factors that may influence the spatial variability of PM2.5.

Introducción

La contaminación del aire es un reto que afrontan las principales ciudades del mundo debido a la afectación que causa sobre la salud de las poblaciones y los ecosistemas, estipulándose un valor de emisión anual de todos los contaminantes atmosféricos de aproximadamente 42,000 millones de toneladas. En cuanto al material particulado PM2.5, hay que mencionar que es un agente tóxico de cuidado ya que puede ocasionar enfermedades cardiovasculares y respiratorias, en una magnitud tal que para el año 2021 se ha estimado un valor cercano a 8.1 millones de decesos relacionados con la inhalación de aire con niveles altos de estas partículas, cifras más elevadas que las establecidas por la organización mundial de la salud (OMS, 2021).

Medellín, posee una topografía compleja que dificulta la dispersión de los contaminantes emitidos desde las fuentes fijas y móviles debido a su gran cantidad de montañas, además, anualmente afronta periodos de contingencias ambientales reflejándose en la mala calidad del aire e incremento de los valores de PM2.5. En contraste, en distintas investigaciones se ha reconocido a la cobertura vegetal urbana como factor que puede incidir positivamente en las condiciones medioambientales de las ciudades, ayudando en la regulación climática y disminución de contaminantes atmosféricos (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2024).

Teniendo en cuenta lo mencionado en el anterior apartado, este proyecto tiene como objetivo determinar cuál es la asociación entre las concentraciones de material particulado PM2.5 y la cobertura vegetal en las comunas de Medellín durante el año 2024; además, mediante el uso de herramientas de sistemas de información geográfica y teledetección se busca calcular el índice de vegetación de diferencia normalizada anual NDVI, determinar la variabilidad espacial del PM2.5 teniendo en cuenta los datos arrojados por las distintas estaciones de PM2.5 fijas y establecer la relación entre las variaciones espaciales de las concentraciones del contaminante con el índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI para cada comuna.

Los resultados del estudio aportarán en el entendimiento de los impactos generados por el contaminante PM2.5 en la salud ambiental de cada una de las comunas de Medellín, asimismo, se tendrán herramientas para la toma de decisiones y políticas encaminadas a la mejora medio ambiental de la ciudad.

1. planteamiento del problema

Medellín, capital del departamento de Antioquia se encuentra situada en la zona nororiental de Colombia sobre la cordillera de los Andes y dentro del valle de Aburrá, en el cual también están los municipios de Caldas, Envigado, Bello, Copacabana, Girardota, Barbosa, La Estrella, Sabaneta e Itagüí. La ciudad se caracteriza por tener una topografía con gran cantidad de montañas y su área urbana es de aproximadamente 111,6 kilómetros cuadrados. Esta urbe posee una temperatura promedio de aproximadamente 24°C y se compone de dieciséis comunas y 5 corregimientos (Alcaldía de Medellín, 2025).

En la siguiente figura se observa la ciudad de Medellín con su distribución comunal, situada dentro del Valle del aburrá y el departamento de Antioquia.

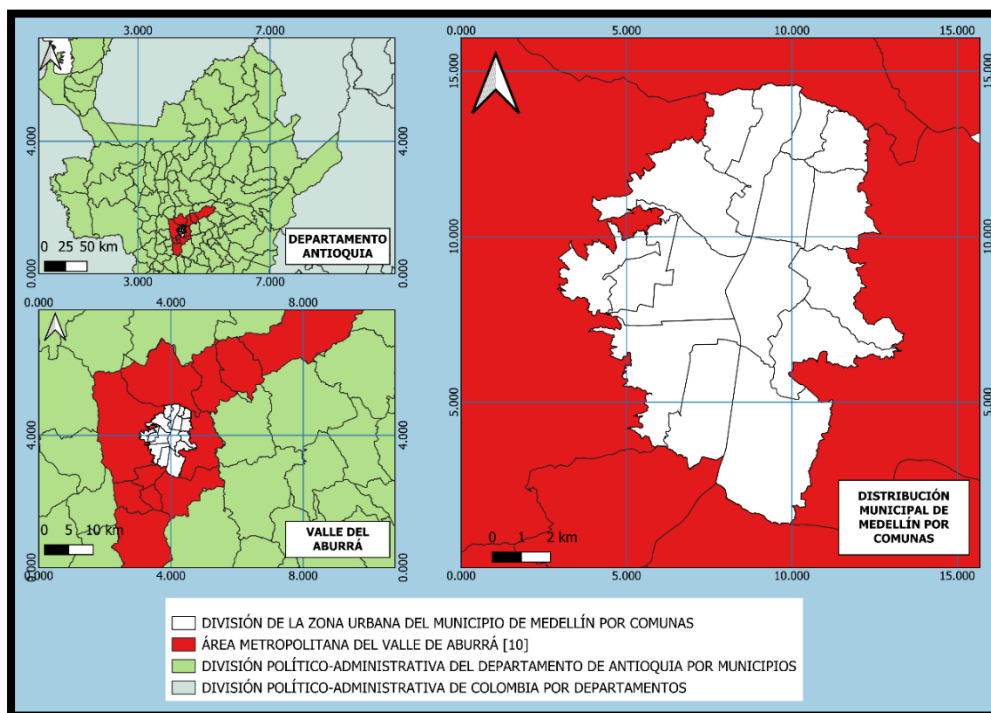


Figura 1 Localización del área de estudio. Fuente: propia elaboración (2025)

La Organización Mundial de la Salud indica que la contaminación del aire hace referencia a la presencia de agentes en la atmosfera que alteran sus características naturales, esta problemática ambiental es producida por fuentes emisoras como los equipos de combustión doméstica, flujo vehicular, actividades industriales e incendios forestales (OMS, 2021).

Se destacan contaminantes peligrosos para la salud pública como CO₂, O₃, NO₂, SO₂ y, especialmente, las partículas suspendidas. Dentro del último grupo se encuentra incluido el material particulado (PM), que puede clasificarse en PM₁₀ y PM_{2.5}.

La extensa exposición a PM_{2.5} se ha relacionado con morbilidades de carácter cardiovascular, respiratorias e incrementos en tasas de mortalidad. El informe del estado del aire global del año 2024 muestra un promedio internacional de exposición al PM_{2.5} de 31,3 µg/ m³, valores que exceden considerablemente los estándares máximos recomendados para la protección de la salud humana. En el mismo informe se indica que la contaminación atmosférica es el segundo máximo factor de riesgo de muerte, principalmente en población infantil menor a 5 años (Health Effects Institute ,2024).

Debido a los impactos negativos que ocasiona el PM_{2.5} en la salud humana y medio ambiente, resulta de gran importancia analizar la función que cumple la cobertura vegetal urbana en su regulación por lo que Gómez Isaza manifiesta que “los árboles son testigos del estado de salud del ambiente y pueden ser usados como fuente de información por investigadores que requieran consultar los cambios de las condiciones climáticas, del aire, del suelo o del agua de la región a la que pertenecen” (Gómez Isaza, 2023). Adicional a esto, la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura indica la importancia de la gestión de la cobertura vegetal urbana y zonas periféricas a centros urbanos (FAO, 2024).

En Medellín, a pesar de que desde los entes competentes se han desarrollado estrategias de mejora de zonas verdes como el Plan Maestro de Espacios Públicos Verdes Urbanos y los corredores verdes, la cantidad de áreas de vegetación distribuidas a lo largo de las comunas de la ciudad sigue siendo punto de preocupación, ya que se presentan reducciones de 5,9 m² por habitante en 2006 a 4,8 m² en 2022. El no implementar estrategias más certeras para mitigar esta problemática implicaría en una proyección al 2032 de 4,1 m² por habitante, un descenso evidente (El Espectador, 2023).

De igual manera, el crecimiento urbano acelerado que ha vivido Medellín en las últimas décadas ha traído consigo una notoria disminución de sus zonas verdes, una situación que podría

estar estrechamente ligada al aumento en los niveles de contaminación del aire, especialmente por PM2.5. Si bien se han impulsado estrategias como la arborización urbana para enfrentar esta problemática, aún existe poca evidencia sobre qué tan efectivas han sido estas acciones a nivel local, particularmente en las diferentes comunas de la ciudad (Ramírez Cadavid, 2024). De igual manera, un estudio realizado por en la ciudad de Medellín, respalda la teoría de que las zonas con coberturas vegetal pueden beneficiar en la disminución de contaminantes atmosféricos (Parra Ospina, Caicedo Zapata y García Salazar, 2024).

Dado que el PM2.5 representa un riesgo significativo para la salud pública, se debe atender como prioridad en comprender como la cobertura vegetal urbana estimada mediante índice de vegetación por NDVI, puede influir en su distribución espacial. En este contexto, se plantea la siguiente pregunta de investigación.

¿Cuál es la asociación entre las concentraciones de material particulado PM 2.5 y la cobertura vegetal en las comunas de Medellín durante el año 2024?

1.1. Antecedentes

A medida que se avanza en los años, distintas ciudades a nivel mundial se han visto expuestas a efectos negativos debido al acelerado crecimiento poblacional, especialmente en los que respecta a la calidad del aire. Medellín no ha estado al margen de esta situación, ya que posee parque automotor considerable y una expansión acelerada que ha incidido en el incremento de contaminantes atmosféricos, entre estos, el pm2.5.

En el marco de la búsqueda de respuestas, varios estudios se han centrado en la relación entre los árboles y el aire, como por ejemplo en una investigación desarrollada por Velásquez Ciro se analizó cómo el arbolado urbano en el Valle de Aburrá ayuda a eliminar partículas contaminantes como el PM2.5 y como resultado se determinó que la vegetación cumple un papel funcional clave en la calidad del aire. También, se encontró que incluso pequeños aumentos en la cobertura vegetal urbana del orden de un 1 % pueden generar mejoras proporcionales en la

capacidad de limpiar el aire, gracias a factores como el área foliar de los árboles (Velásquez Ciro, 2019).

Además de la vegetación, las condiciones climáticas también tienen un papel importante ya que algunas situaciones, como las inversiones térmicas o los días sin viento, favorecen que los contaminantes se acumulen en la atmósfera. En este sentido, investigadores como Herrera y Hoyos desarrollaron un estudio centrado en la caracterización de la capa límite atmosférica, considerando la mezcla y dispersión de agentes contaminante; además, identificaron que una mayor presencia de vegetación podría ayudar a dispersar mejor esos contaminantes, haciendo que la ciudad sea más resistente frente a esos episodios críticos de contaminación generados periódicamente (Herrera-Mejía y Hoyos, 2019).

Las tecnologías actuales también han facilitado estos análisis, ya que con el uso de imágenes satelitales y herramientas de análisis espacial ha sido posible entender mejor cómo se relacionan la vegetación y la calidad del aire, como se presenta en un estudio de Pérez-Carrasquilla y colegas, en el cual se enfocaron en desarrollar un pronóstico predictivo de las concentraciones promedio de PM_{2.5} en el valle del Aburrá, para ello aplicaron modelos de aprendizaje automático basados en vegetación, datos de satélites y pronósticos mundiales, mostrando como resultado que el NDVI es un regulador de la contaminación atmosférica y concluyendo que este resulta ser una herramienta muy útil para predecir el comportamiento del aire en contextos urbanos (Pérez-Carrasquilla et al., 2023).

En un estudio realizado en Asia, cuyo objetivo fue explorar la asociación entre la cobertura vegetal y la variación espacio-temporal del contaminante PM_{2.5} en Beijín, China mediante la recopilación de información de 112 estaciones de medición de contaminantes, aplicación de metodología NDVI para determinar la cantidad de cobertura vegetal y análisis de correlación de rango para estas dos variables de interés, se encontró como resultado que durante el invierno, cuando la contaminación tiende a empeorar por causa de la estabilización atmosférica, las zonas con vegetación robusta y densa tienden a registrar valores bajos de PM_{2.5} (Jin et al., 2022).

En Bucarest, Rumanía se ejecutó un análisis espacio-temporal de los efectos de la contaminación atmosférica en las zonas verdes de la ciudad, cuya investigación abarcó desde el año 2020 hasta el 2024, donde se aplicó el método de estimación de cobertura vegetal NDVI para determinar la cobertura vegetal existente. Los resultados arrojaron correlación negativa respecto a las concentraciones de material particulado inferior a 2.5 micras y 10 micras. No obstante, como información importante para nutrir el presente ítem de antecedentes, se identificó que las zonas con mayor cantidad de áreas verdes fueron justamente las que presentaron los valores de concentración atmosférica con mayor inferioridad (Zoran et al., 2025).

El continente americano no ha quedado al margen del desarrollo de este tipo de investigaciones, ya que en Quito, Bonilla y sus colaboradores se enfocaron en investigar sobre la variación espaciotemporal de la cobertura vegetal en la ciudad y su asociación con la calidad del aire, haciendo uso de imágenes ópticas de satélites y utilizando modelos de regresión lineal. Como resultado, lograron evidenciar que las zonas con más árboles tienen una mejor calidad del aire, dichos resultados se determinaron a partir de la cuantificación de cambios y transiciones de coberturas vegetal usando herramientas de teledetección como imágenes ópticas Spot y la clasificación basada en objeto (Bonilla-Bedoya et al., 2021).

Lo mismo se observó en São Paulo, donde se analizaron los contaminantes PM10 y PM2.5 respecto a su relación con las zonas verdes, presentando relación inversamente proporcional. Los autores elaboraron una investigación en la que incluyeron datos de calidad del aire e imágenes satelitales, además, ejecutaron procedimientos de modelación para hallar el grado de asociación entre las variables de estudio. Los resultados arrojaron que las áreas de la ciudad donde se encuentra vegetación de alta densidad inciden positivamente en la disminución de material particulado, respecto a otras áreas con menor cobertura vegetal (Diniz Oliveira et al., 2025).

Para finalizar, Escobedo, Kroeger y su equipo de trabajo, proponen un marco más amplio sobre el papel de los bosques y zonas verdes en las ciudades. desarrollaron un análisis y una revisión bibliografía exhaustiva teniendo presente diferentes características de la vegetación como longitud de hojas tamaño de espacio ocupado, etc, y factores que pueden incidir en su función de regulador y mitigador de contaminantes atmosféricos. Según su análisis, aunque el impacto puede

variar dependiendo del lugar, es claro que la vegetación funciona como una barrera natural contra los contaminantes, incluyendo el PM2.5 (Escobedo et al., 2011).

Con los antecedentes presentados en los anteriores párrafos se consolida la idea de investigación respecto a la posible relación existente entre los niveles de concentración de PM2.5 medidos por las estaciones meteorológicas fijas del valle del Aburrá y la cobertura vegetal urbana de la ciudad de Medellín, Antioquia. Además, el uso de herramientas como el índice NDVI, la teledetección y los sistemas de información geográficas permiten desarrollar un mejor análisis de la situación.

2. Justificación

Entre las mayores preocupaciones ambientales en la ciudad de Medellín y Valle de Aburrá en general se considera la presencia del PM2.5, este se caracteriza por ser de los contaminantes criterios con mayor relevancia en el territorio. Además, una investigación local indica que este contaminante es el que con mayor frecuencia supera los estándares máximos estipulados por la Organización Mundial de la Salud, de tal manera que para el año 2018 se calculó la emisión de aproximadamente 432 toneladas de PM2.5 sobre el Valle de Aburrá, dejando en evidencia la dimensión de la problemática (Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Universidad Pontificia Bolivariana, 2019).

Además, partiendo de la magnitud del impacto que puede generar este contaminante en el entorno, en el presente trabajo se buscó recolectar elementos que contribuyan en el entendimiento de su asociación con la cobertura vegetal urbana perteneciente a la ciudad de Medellín, mediante el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográficas (SIG), para aportar insumos técnicos, para la toma de decisiones en gestión ambiental y políticas públicas que promuevan una visión ecológica en la ciudad. Además, la asociación entre las variables mencionadas anteriormente sigue siendo un tema poco abordado a nivel de comunas.

En ese sentido, la presente investigación aborda una problemática importante dentro del ámbito de la salud pública y ambiental, particularmente desde su enfoque ecológico. También, permite el fortalecimiento de las habilidades para el análisis y la comprensión de distintos fenómenos ambientales, y contribuir desde el ejercicio académico y saber científico.

3. objetivos

3.1. Objetivo general

Determinar cuál es la asociación entre las concentraciones de material particulado PM 2.5 y la cobertura vegetal en las comunas de Medellín durante el año 2024.

3.2. Objetivos específicos

- Recolectar información secundaria por medio de plataformas como el servicio geológico de los Estados Unidos (USGS), las estaciones del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA) y el portal Geomedellín de la Alcaldía de Medellín.
- Calcular el índice de vegetación de diferencia normalizada anual NDVI, a partir de herramientas de teledetección para el año 2024.
- Analizar la variabilidad espacial de las concentraciones de PM2.5 en las comunas de Medellín durante el año 2024.
- Establecer la relación espacial entre las concentraciones de PM2.5 y el NDVI mediante el uso de técnicas estadísticas y SIG.

4. Hipótesis

4.1 Hipótesis de trabajo

La hipótesis planteada para el presente trabajo se encuentra enfocada en la existencia de una correlación inversamente proporcional entre las concentraciones de material particulado PM2.5 estipulados mediante interpolación en las comunas de Medellín, respecto a la cobertura vegetal urbana determinada mediante el índice NDVI, ósea, que a mayores niveles de concentraciones de PM2.5 habría menor cobertura vegetal.

4.1.1. *Hipótesis nula*

Una hipótesis nula es que no se determine una correlación estadísticamente representativa entre las concentraciones de PM2.5 y la cobertura vegetal urbana en las comunas de Medellín para el año 2024.

4.1.1.1 Hipótesis alterna

Relación estadísticamente significativa entre las dos variables de estudio en donde se espera encontrar una correlación de carácter negativa.

4.1.1.2 Variables

La variable independiente es la concentración de PM2.5 interpoladas espacialmente para cada comuna, según la información por las estaciones de medición de calidad del aire del SIATA. Como variable dependiente está el porcentaje de cobertura vegetal de cada comuna estimado mediante el NDVI correspondiente a imágenes de tipo Landsat 8 y Landsat 9. La asociación entre ambas variables se analizó utilizando el método estadístico Spearman.

5. Marcos de referencia

5.1. Marco teórico

5.1.1 Contaminación por material particulado (PM2.5)

El material particulado PM2.5 es la fracción más pequeña de todos los contaminantes del aire, además, estas partículas son problemáticas porque representan una materia en el aire que puede ser inhalada y generar riesgos para la salud de las poblaciones (OMS, 2021).

Las fuentes de PM2.5 pueden llegar al aire directamente (por ejemplo, de los gases de escape de los vehículos, procesos industriales y productos de la quema de madera) o formarse a través de reacciones atmosféricas entre NOx y NOz, esto depende de muchos otros factores en la ciudad como la distribución del tráfico, la morfología, la población, condiciones meteorológicas, entre otros (EPA, 2021).

La ciudad de Medellín posee alta densidad de montañas ya que está dentro de la Cordillera del Valle de Aburrá lo cual provoca que los episodios de alta concentración de PM2.5 sean periódicos y estén vinculados a las inversiones térmicas, un fenómeno meteorológico que impide la dispersión de contaminantes en la atmósfera (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2024).

5.1.2 Evaluación de la variabilidad espacial del PM2.5

Para medir la calidad del aire se han establecidos redes de monitoreo como las del sistema de alerta temprana de Medellín y el valle del Aburrá (SIATA), este se encarga de realizar mediciones en tiempo real de contaminantes ambientales, entre ellos el PM2.5. Sin embargo, en entornos urbanos los monitoreos suelen verse limitados a las mediciones ejecutadas por la cantidad de estaciones disponibles, por lo que para evaluar la variabilidad espacial del contaminante sobre un territorio se pueden utilizar distintos métodos, uno de ellos la interpolación representada en mapas, estas suelen ser estrategias utilizadas para determinar la distribución de los contaminantes sobre toda el área urbana con base a información arrojada por fuentes de datos previamente

conocidos, estas son metodologías ampliamente utilizadas en el ámbito atmosférico y muy bien referenciadas en la determinación del pm2.5 (Azizi y Ariffin, 2021).

Existen distintos métodos de interpolación utilizables como kriging, spline, Tin, IDW (Ponderación del Inverso de la Distancia) entre otros; este último es uno de los más utilizados y consiste en asignar valores a puntos desconocidos respecto a datos de referencias situados en otros lugares, en este proceso se define que los lugares más aledaños a las áreas de interés poseen mayor influencia respecto a los que se encuentran en lugares más remotos (Yekkehkhany y Safari, 2021).

5.1.3 sensores remotos y cobertura vegetal urbana

Mediante el uso de sensores remotos se puede recolectar datos de diferentes espacios de gran magnitud sin necesidad de realizar trabajos que requieran contacto físico, ya que esta disciplina se fundamenta en la instalación de sensores en aeronaves tripuladas, no tripuladas o en satélites. Asimismo, este tipo de tecnologías se aplican para monitores ambientales, determinación de áreas urbanas, cambios en el uso del suelo y cobertura de la tierra, entre otros múltiples usos (Campbell y Wynne, 2011).

A nivel ambiental, uno de los usos de los sensores remotos y que se aplica en entornos urbanos es en la determinación de la cobertura vegetal, usando imágenes satelitales de plataformas como Sentinel o en el presente estudio de los satélites Landsat 8 y Landsat 9, con libre acceso y con cumplimiento de características esenciales para determinar el porcentaje de cobertura vegetal como las bandas de infrarrojo cercano y rojo visible (USGS, 2024).

En el contexto urbano, los activos verdes como la vegetación, los cinturones verdes, los parques y otros espacios con presencia de árboles ayudan a enfriar y proporcionar confort humano, son un factor en la adsorción de materiales como PM2.5, además, ayudan a bajar las temperaturas de la ciudad no solo a través de la evapotranspiración y la sombra refrescante, sino también interceptando algunos contaminantes del aire y transformando otros (Nowak et al., 2013).

5.1.4 Evaluación de la cobertura vegetal mediante NDVI

Aunque su uso ha evolucionado con el tiempo, el análisis de la cobertura vegetal ha sido reconocido desde décadas atrás por su relevancia en estudios ambientales. En la actualidad, continúa siendo una herramienta fundamental para la evaluación de dinámicas territoriales y procesos de planificación urbana y ecológica. La verificación del NDVI se logra con diversas formas de vegetación, se calcula fácilmente a partir de las reflectancias roja y de infrarrojo cercano (NIR), también, los valores de NDVI pueden oscilar entre -1 y +1 donde valores cercanos a +1 son indicativos de vegetación saludable, mientras que aquellos alrededor o por debajo de 0 indican vegetación escasa, suelo árido, entornos urbanos y agua (NASA Earthdata, 2025).

Su ventaja radica en el hecho de que es una metodología sencilla que se puede adaptar a diferentes situaciones, que van desde pequeñas explotaciones agrícolas hasta grandes áreas urbanas. No obstante, para Medellín, el NDVI derivado de su imagen satelital Landsat sirve como un monitoreo que sigue una escala espaciotemporal específica (por ejemplo, vegetación urbana) y proporciona una base para medidas de cobertura verde. El índice también se ha utilizado para investigar la relación entre la cobertura vegetal y la eliminación de contaminantes atmosféricos (Wang et al., 2019).

5.1.5 Relación de NDVI-PM2.5 mediante método Spearman

existen distintos métodos de correlación de variables como Pearson, Kendall, correlación de Moran, Canónica, Spearman, entre otro, sin embargo, para el desarrollo del presente trabajo se utilizó el coeficiente de correlación Spearman, el cual es una medida no paramétrica que evalúa la fuerza y dirección de la relación monotónica entre dos variables cuantitativas u ordinales, basándose en los rangos de los datos en lugar de sus valores originales. Este coeficiente varía entre -1 y 1, donde valores cercanos a 1 representan una correlación positiva perfecta, valores cercanos a -1 indican una correlación negativa perfecta y valores cercanos a 0 sugieren ausencia de correlación monotónica (JSTOR Daily, 2025).

A diferencia del coeficiente de Pearson, Spearman no requiere que los datos sigan una distribución normal ni que la relación sea estrictamente lineal, lo que lo hace especialmente adecuado para datos ambientales que suelen presentar distribuciones sesgadas o valores atípicos.

Esto es relevante al relacionar variables como el NDVI y las concentraciones de PM2.5, donde se espera que la asociación pueda ser monotónica pero no necesariamente lineal (Koldasbayeva y Zaytsev, 2025).

5.2. Marco Normativo y legal

Considerando la normativa legal encargada de regir temas de calidad del aire, salud ambiental y la salud pública, el siguiente apartado aborda diferentes leyes, normas, políticas, entre otras, a nivel local, nacional e internacional que tienen relación con el caso de estudio.

A nivel internacional, se resalta el convenio sobre la diversidad biológica establecido por la Organización de las Naciones Unidas en 1992, el cual se enfoca en la promoción de medidas encaminadas a la sostenibilidad y plantea que la conservación de la diversidad biológica debe desarrollarse mediante esfuerzos comunes. En el acuerdo de París celebrado en el año 2015 se determina el compromiso de cada país participante a contribuir en la mitigación de los gases de efecto de invernadero, comprometiéndose en la disminución de los grados centígrados por debajo de 2. En el año 2022, la Organización Mundial de la Salud recomienda límites de calidad del aire correspondientes a cinco contaminantes, entre estos el PM2.5.

En el ámbito nacional el tema de protección de recursos naturales inicia a tomar gran relevancia desde el año 1974, cuando la Presidencia de la República estableció el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. En el año 2011, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible crea la Política Nacional de la Salud ambiental, la cual se enfoca en la prevención de las enfermedades respiratorias desde de la promoción de la intersectorialidad. En la Resolución 2254 de 2017 se estipulan los niveles máximos permitidos de distintos contaminantes criterios teniendo en cuenta su exposición poblacional horaria, diaria y anual.

Localmente, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá ha impulsado distintas directrices encaminadas a la protección del medio ambiente, entre estas se resaltan: la creación de la Política

Metropolitana de Biodiversidad (2014), el plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire (PIGECA) (2017) y el plan Maestro del Sistema de Espacio Público Metropolitano Verde (2020).

6. Metodología

6.1. Enfoque metodológico

Esta investigación utilizó un enfoque cuantitativo que enfatiza los datos y la información en forma numérica. Mediante esta estrategia se evaluaron las relaciones entre factores como el índice NDVI y las concentraciones de PM2.5 de las estaciones de monitoreo de PM2.5 de la ciudad de Medellín. La investigación se abordó desde una perspectiva objetiva, a fin de comprender estos fenómenos mediante el uso de estructuras matemáticas y herramientas estadísticas que disminuyen la influencia subjetiva del investigador, permitiendo así una evaluación clara y rigurosa de la hipótesis planteada (Hernández Sampieri, Fernández-Collado y Baptista Lucio, 2014).

6.2. Tipo de estudio

Se llevó a cabo un estudio ecológico, utilizando como unidad de análisis las comunas de la ciudad de Medellín, Antioquia, para evaluar los niveles de concentración de PM2.5 emitidos por estaciones fijas monitoreadas por el sistema de alerta temprana del Valle de Aburrá en relación con la cobertura de vegetación urbana. También, es una investigación exploratoria debido a que existe poca información sobre esta relación en comunas; el estudio buscó generar herramientas que sirvan para próximas investigaciones más específicas.

6.3 Procedimiento

6.3.1 Recolección de información secundaria por medio de plataformas como el servicio geológico de los Estados Unidos (USGS), las estaciones del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA) y el portal Geomedellín de la Alcaldía de Medellín.

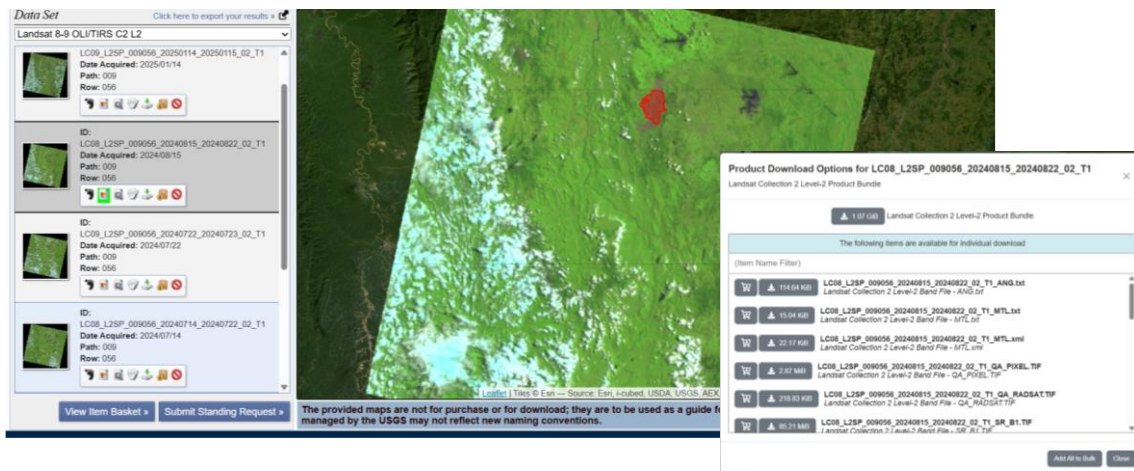
Las imágenes satelitales landsat 8 y landsat 9 de Medellín se obtuvieron de la plataforma Earth explorer, del servicio geológico de los Estados Unidos (USGS). Esta herramienta brinda

información científica sobre la tierra permitiendo realizar búsquedas, visualización y posterior descarga de información.

Inicialmente, se realizó una vinculación al portal mediante creación de usuario y contraseña, después en el icono de carga shapefile/Kdm se descargó el shapefile de Medellín previamente seleccionado para la delimitación del área de interés de la imagen satelital, se seleccionó el rango de fecha, se eligió la cobertura de nubosidad de la imagen con un porcentaje máximo del 30% (pero el porcentaje de nubosidad para Medellín es inferior), después en la pestaña de conjunto de datos se escogió satélites landsat y una vez realizada la selección anterior se señaló la opción Landsat 8–9 OLI/TIRS C2 L2 para generar la descarga inmediata.

La figura 2 presenta el proceso de descarga de una imagen satelital directamente desde el portal del sistema geológico de los Estados Unidos.

Figura 2 Visualización de proceso de descarga de imágenes satelitales desde el portal USGS



La información correspondiente al contaminante PM2.5 se obtuvo del portal del Sistema de alerta temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA). Este es un proyecto de tecnología y ciencia del área metropolitana del valle de Aburrá y la alcaldía de Medellín que proporciona información en tiempo real sobre variables de calidad del aire, meteorológicas e hidrológicas de gran parte del departamento de Antioquia.

El orden del proceso es: creación de usuario y contraseña mediante correo electrónico, inicio de sesión e ingreso a interfaz calidad del aire y estaciones meteorológicas, selección de icono de descargas, ingreso de rango de fechas, elección entre estaciones disponibles, escogencia de variable a descargar y oprimir descargar. Se repitió el anterior procedimiento para la descarga de la información correspondiente a cada estación de PM2.5 de interés.

En la figura 3 se puede observar como es el proceso de descarga de datos de las estaciones meteorológicas del SIATA, directamente desde su portal.

The screenshot shows the SIATA portal interface. At the top, there are two tabs: "Estaciones Calidad de Aire" (selected) and "Estaciones Meteorológicas". Below the tabs, there is a "Motor de descarga" section with a text input field asking "¿Cuál es el propósito de tu descarga? Cuéntanos mínimo con 10 palabras." and two date input fields labeled "** Desde:" and "Hasta:". Below this, there is a section titled "Elige la variable que quieres consultar:" with a horizontal menu of variables: "Todas", "PM2.5", "PM10", "NO", "NO2", "NOx", "Ozono", "CO", and "SO2". The "PM2.5" variable is selected. Below the menu is a search input field labeled "Buscar (n):". The main section is titled "Selección estación(es):" and contains a list of stations with checkboxes next to their names:

- Seleccionar Todas
- 6 - Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid - Medellin
- 12 - Estación Tráfico Centro
- 28 - Itagüí - Casa de Justicia Itagüí
- 37 - Universidad San Buenaventura
- 38 - Itagüí - I.E. Concejo Municipal de Itagüí
- 40 - Parque de las Aguas
- 41 - Universidad de Medellín
- 43 - Tanque Miraflores
- 46 - Entro San Antonio - Medellín
- 69 - Caldas - E U Joaquín Aristizabal
- 78 - La Estrella - Hospital
- 79 - Medellín, Alvariza - I.E. Pedro Octavio Arado

Figura 3 Visualización de proceso de descarga de datos desde el portal del SIATA

Para la delimitación de la zona de estudio se usó un archivo de tipo vectorial en formato shapefile de la ciudad de Medellín y su distribución por comunas. El archivo se descargó desde el sitio web Geo Medellín de la alcaldía de Medellín.

Luego de ingresar al sitio web de Geomedellín, se seleccionó el ícono de datos abiertos y el tipo de archivo de descarga (archivo de forma), posteriormente, en la barra de búsqueda se escribió el tema de interés el cual en este caso aplicó Medellín y una vez se mostraron los distintos mapas arrojados por el sistema y seleccionar el de interés (comunas de Medellín) se descarga

automáticamente. En el archivo descargado se presentan las 16 comunas de la ciudad de Medellín; además, la siguiente figura presenta el proceso de descarga de un archivo shapefile desde el portal de GeoMedellín.

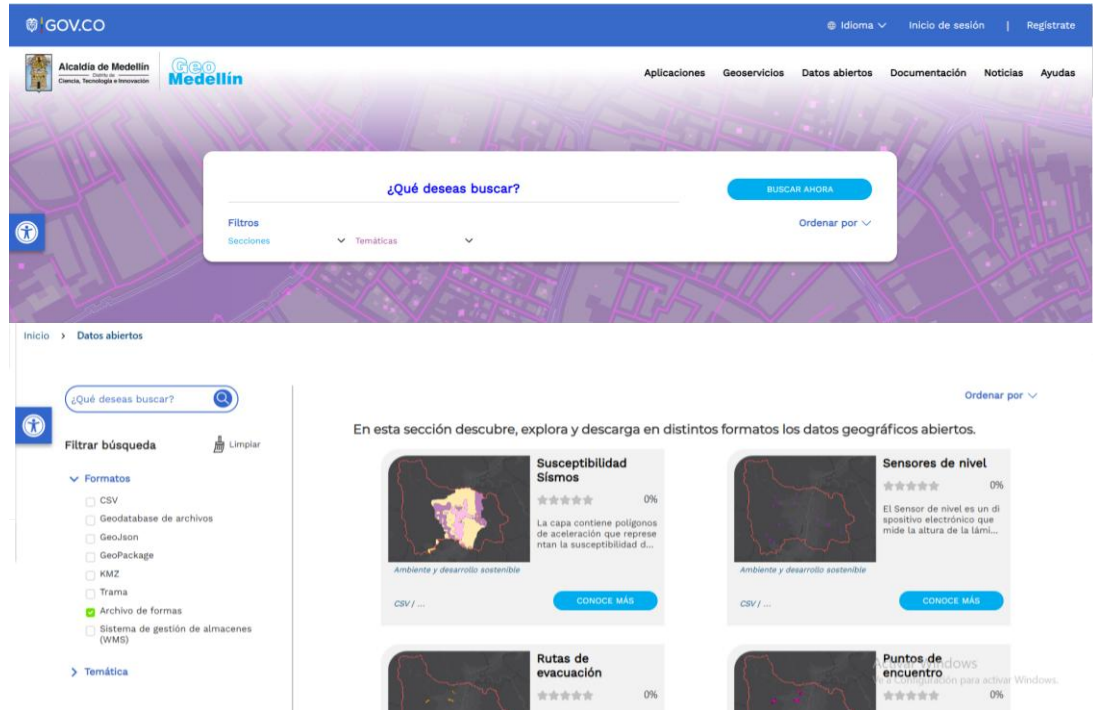


Figura 4 Visualización de proceso de descarga de datos de forma desde el portal Geomedellín

6.3.2 Tratamiento y preprocesamiento de información.

Para asegurar la confiabilidad de la información, se realizó un tratamiento y preprocesamiento de la información como se muestra a continuación:

Se seleccionaron dos imágenes satelitales para el año 2024, una correspondiente a cada semestre, esto con el fin de analizar la variabilidad de la cobertura vegetal durante el año. También, se eligieron imágenes de landsat 8 y landsat 9, ya que estas vienen con correcciones atmosféricas generadas por defecto. Para el proceso de selección de imágenes satelitales se optó como porcentaje

máximo de nubosidad el 30% para disminuir la probabilidad de distracción de las imágenes por causa de los tonos blancos y oscuros producidos por las nubes, no obstante, se cercioró que el lugar de estudio (Medellín) presentara una cobertura nubosa inferior a la de la imagen en general.

La información de PM2.5 descargada del portal del SIATA se llevó a un proceso de depuración y limpieza mediante el cual se suprimieron las concentraciones catalogadas como atípicas o fuera de lo común, según el historial de concentraciones presentado para la ciudad de Medellín y teniendo en cuenta su contexto las concentraciones menores a $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y mayores a $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se eliminaron de la base de datos descargada, dejando las casillas vacías.

Se eligieron únicamente las estaciones de mediciones de PM2.5 que contaron con máximo 25% de datos faltantes, por lo cual para el presente estudio se descartaron las estaciones de la Universidad CES de la ciudad de Medellín (35% de datos faltantes) y la situada en la institución educativa José Antonio Galán del municipio de la Estrella (46% de datos faltantes). Este proceso se llevó a cabo con el fin de garantizar una cantidad de datos representativa para la generación del valor anual de la concentración de PM2.5.

Para generar una mejor precisión geoespacial en la interpolación, se utilizaron todas las estaciones de PM2.5 presentes en el valle de Aburrá (las que cumplieron con los criterios establecidos) generando una mayor cantidad de puntos de referencia.

6.3.3 Calculo del índice de vegetación de diferencia normalizada anual NDVI, a partir de herramientas de teledetección para el año 2024.

Se realizó el procesamiento y análisis de las imágenes anteriormente descargadas para la determinación del índice NDVI, este procesó se ejecutó por medio del software Quantum GIS (Qgis) en su versión 3.42. A continuación se presenta la formula aplicada para la determinación del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{Red})}{(\text{NIR} + \text{Red})}$$

RED: Banda roja (Banda 4)

NIR: Banda infrarrojo cercano (Banda 5 en Landsat 8/9)

El NDVI generado fue delimitado para el área de Medellín con base a la capa de las comunas de Medellín descargada previamente. Después, se procedió con el cálculo de porcentajes de vegetación correspondiente para cada una de las 16 comunas de la ciudad, esto, teniendo la cuenta el valor de 0.2 del índice NDVI el cual indica que a partir de este valor se presenta vegetación moderada y que de manera ascendente hasta llegar al valor 1.0 se incrementaría la cobertura vegetal.

6.3.4 Análisis de la variabilidad espacial de las concentraciones de PM2.5 en las comunas de Medellín durante el año 2024.

En esta etapa se procesaron los datos de concentración de PM2.5 con el fin de identificar su distribución espacial. Los datos horarios de PM2.5 descargados previamente fueron unificados mediante el software Excel, generando archivos correspondientes a cada estación, posteriormente se generaron promedios de concentraciones anuales y se le asignaron las coordenadas oficiales a cada uno de los puntos de monitoreo fijo.

Para la generación de la superficie continua de las concentraciones de PM2.5 se usó el método de interpolación IDW (Inverse Distance Weighting), mediante el cual se estimaron valores continuos en zonas con carencia de información, a partir de puntos de medición cercanos que permitieron la estimación de niveles de PM2.5 para cada comuna de la ciudad. Este es un método que se caracteriza por su sencillez a la hora de implementarse, en comparación con otros métodos

que tienen un grado de complejidad mayor, además, es el método más utilizado para interpolaciones de PM ya que genera estimaciones bastante precisas (Kim et al., 2022).

La interpolación se hizo sobre todo el valle del Aburrá, después, la capa producto del proceso fue recortada con el shapefile previamente seleccionado y descargado de la ciudad de Medellín con su distribución por comunas. Finalmente, se generó una salida de mapa con distintos colores y representado por las concentraciones de PM2.5 correspondiente a cada comuna.

6.3.5 Establecer la relación espacial entre las concentraciones de PM2.5 y NDVI mediante el uso de técnicas estadísticas y SIG

Una vez realizado el procesamiento y análisis para la determinación de porcentajes de vegetación en las comunas de Medellín y haber determinado las concentraciones promedio anuales de material particulado PM2.5 mediante el uso del software excel, se ejecutó el análisis estadístico de asociación con el coeficiente de Spearman, método utilizado para determinar el grado de correlación entre ambas variables.

En el método aplicado, se realiza la compilación de los resultados generados de las concentraciones de PM2.5 y los porcentajes de cobertura vegetal, asignándoles rangos para posteriormente brindarles orden a los valores de menor a mayor con el objetivo de que la comparación entre estos sea lo más nivelada posible.

Después, se llevó a cabo el cálculo de diferencias entre valores de las dos variables de estudio para poder aplicar la potencia cuadrada, cuyo resultado será analizado e interpretado. El resultado generado determinará el tipo de relación generada, donde valores cercanos a +1 como correlación positiva fuerte, cercanos a -1 como correlación negativa fuerte y cercanos a 0 como correlación débil.

7. Resultados

En este apartado se presentan los resultados generados de cada uno de los objetivos mediante un orden secuencial, según lo expuesto en la metodología.

7.1. Recolectar información secundaria por medio de la plataforma del servicio geológico de los Estados Unidos (USGS), las estaciones del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA) y el portal Geomedellín de la Alcaldía de Medellín.

7.1.1 Recolección de datos del servicio geológico de los Estados Unidos (USGS)

Se descargaron dos imágenes satelitales, una Landsat 8 y otra Landsat 9, cuyas características se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 1. *Características de imágenes utilizadas (Landsat 8 y landsat 9)*

características	Landsat 8	Landsat 9
Fecha de imagen	2024-08-15	2024-05-19
Resolución espacial	30 m* 30 m	30 m* 30 m
Distancia de órbita	705 km	705 km
Dato	WGS84	WGS84
Calidad de la imagen	9	9
Cobertura nubosa	24%	30%
Formato	GeoTIFF	GeoTIFF
Número de bandas	11	11

Las dos imágenes seleccionadas corresponden a un periodo distinto del año 2024, cuyo fin fue determinar alguna variabilidad de cobertura vegetal entre los dos periodos, no obstante, ambas imágenes reflejaron coberturas vegetales similares. En la figura 5 se observan las imágenes satelitales descargadas y recortadas al área de interés, además, en formato GeoTIFF para garantizar su compatibilidad con el software Qgis versión 3.42

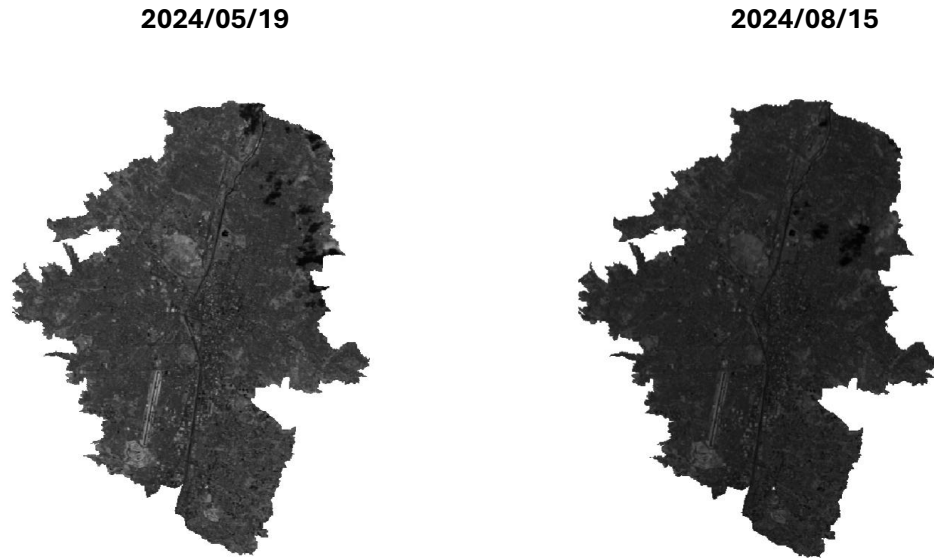


Figura 5 Visualización de imágenes satelitales cortadas al área de estudio del proyecto

7.1.2 *Recolección de datos de las estaciones del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá*

Se seleccionaron los puntos de monitoreo con porcentajes de datos faltantes menor a 25%, incluyendo las de algunos municipios aledaños a la ciudad de Medellín. En la tabla 2 se presentan las 21 estaciones de medición de PM_{2.5} distribuidas sobre el valle del Aburrá con sus respectivas coordenadas.

Tabla 2. *Características de estaciones de PM_{2.5} usadas para la interpolación IDW*

Estación	Latitud	Longitud	Ciudad
E12. Trafico Centro	6.25256	75.56958	Medellin
E28. Casa De Justicia de Itagüí	6.18567	75.59721	Medellin
E38. I.E. Concejo Municipal de Itagüí	6.1685	75.64436	Itagüí
E69. E.U Joaquín Aristizábal	6.09308	75.63776	Caldas
E78. Hospital	6.15553	75.64417	La Estrella

E79. I.E. Pedro Octavio Amado	6.22189	75.6106	Medellin
E80. Planta de producción de agua potable EPM	6.25891	75.54826	Medellin
E81. Torre Social	6.43696	75.3304	Barbosa
E82. Ciudadela Educativa La Vida	6.34536	75.50475	Copacabana
E83. I.E Pedro Justo Berrio	6.23723	75.61047	Medellin
E84. I.E INEM. Sede Santa Catalina	6.19987	75.56095	Medellin
E85. Parque Biblioteca Fernando Botero	6.27785	75.63643	Medellin
E86. I.E. Ciro Mendía	6.29048	75.55552	Medellin
87. I.E Fernando Vélez	6.33755	75.5678	Bello
E88. E.S.E. Santa Gertrudis	6.16868	75.58197	Envigado
E90. I.E. Rafael Mejía	6.1455	75.62126	Sabaneta
E94. Corregimiento Santa Elena	6.23636	75.49847	Medellin
E100. Fiscalía General de la nación	6.26879	75.57371	Medellin
E101. Tanques De EPM	6.37325	75.44831	Girardota
E103. Parque Biblioteca Tomas Carrasquilla	6.285	75.58305	Medellin
E104. almacén General EPM	6.22978	75.58605	Medellin

7.1.3. Recolección de datos del portal Geomedellín de la Alcaldía de Medellín

En el archivo descargado se presentan las 16 comunas de la ciudad de Medellín y este se descargó adecuadamente para la compatibilidad necesaria con el software Qgis. La figura 6 presenta el mapa base de delimitación de Medellín por comunas y en la tabla 3 se observa la numeración correspondiente a cada comuna de la ciudad y sus áreas ocupadas.

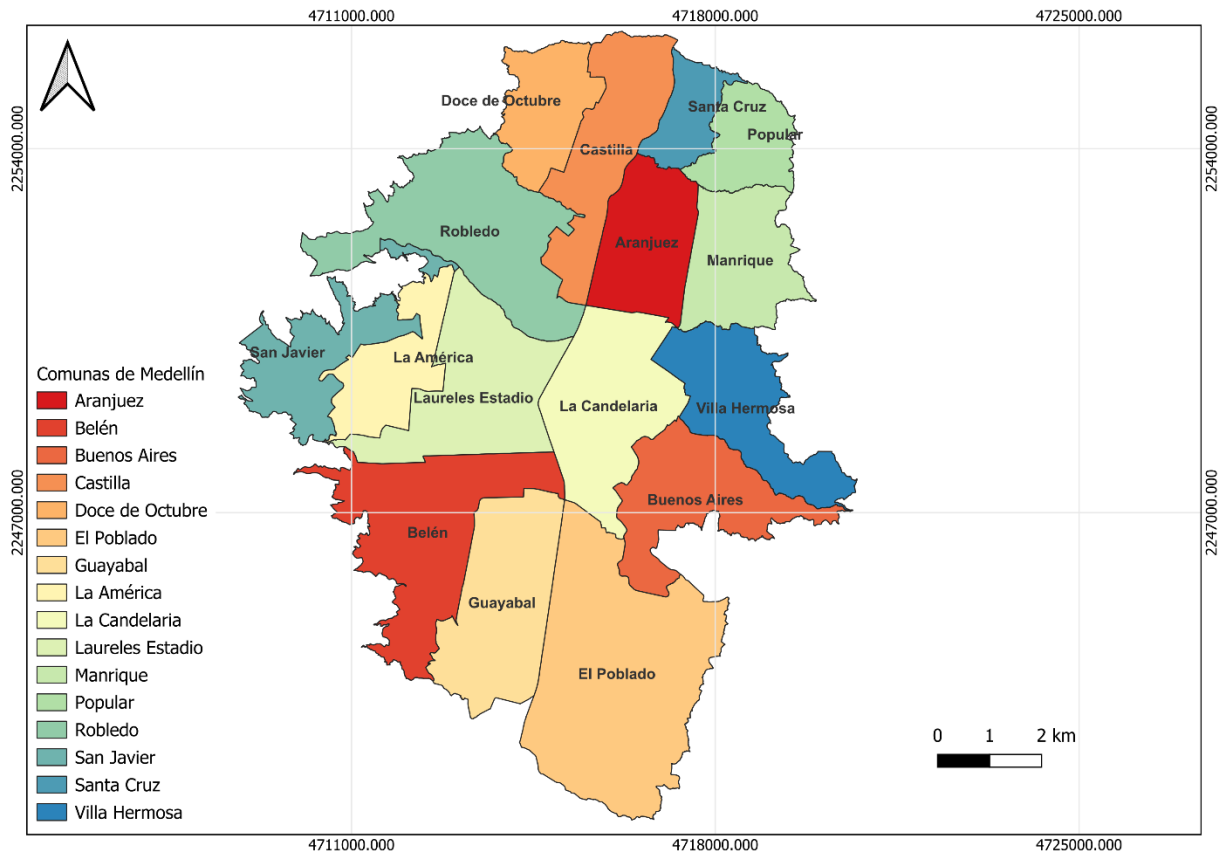


Figura 6 Visualización de mapa de delimitación de Medellín por comunas

Tabla 3. Tabla de atributos de mapa base de Medellín distribuido por comunas

Comuna	Comuna	Área (m ²)	Área (km ²)	Perímetro(m)
Popular	1	3,097,940	3.10	9,604
Santa Cruz	2	2,195,662	2.20	8,597
Manrique	3	5,096,812	5.10	12,077
Aranjuez	4	3,186,234	3.19	9,642
Castilla	5	6,063,915	6.06	16,098

Doce de Octubre	6	3,848,912	3.85	10,709
Robledo	7	9,462,007	9.46	23,265
Villa Hermosa	8	5,716,967	5.72	16,392
Buenos Aires	9	6,025,668	6.03	18,364
La Candelaria	10	7,360,811	7.36	13,632
Laureles Estadio	11	7,402,624	7.40	16,365
La América	12	3,973,306	3.97	15,425
San Javier	13	4,849,278	4.85	26,384
El Poblado	14	12,441,43	12.44	19,965
Guayabal	15	7,288,420	7.29	13,279
Belén	16	8,856,232	8.86	25,695

7.2. Calcular el índice de vegetación de diferencia normalizada anual NDVI, a partir de herramientas de teledetección para el año 2024.

A partir de las imágenes Landsat 8 y Landsat 9 descargadas del Servicio Geológico de los Estados Unidos se generó el cálculo de porcentajes de cobertura vegetal urbana correspondiente a cada comuna por medio del uso del software Qgis 3.42, cuyo resultado se puede observar en la figura número 7 y la tabla número 4.

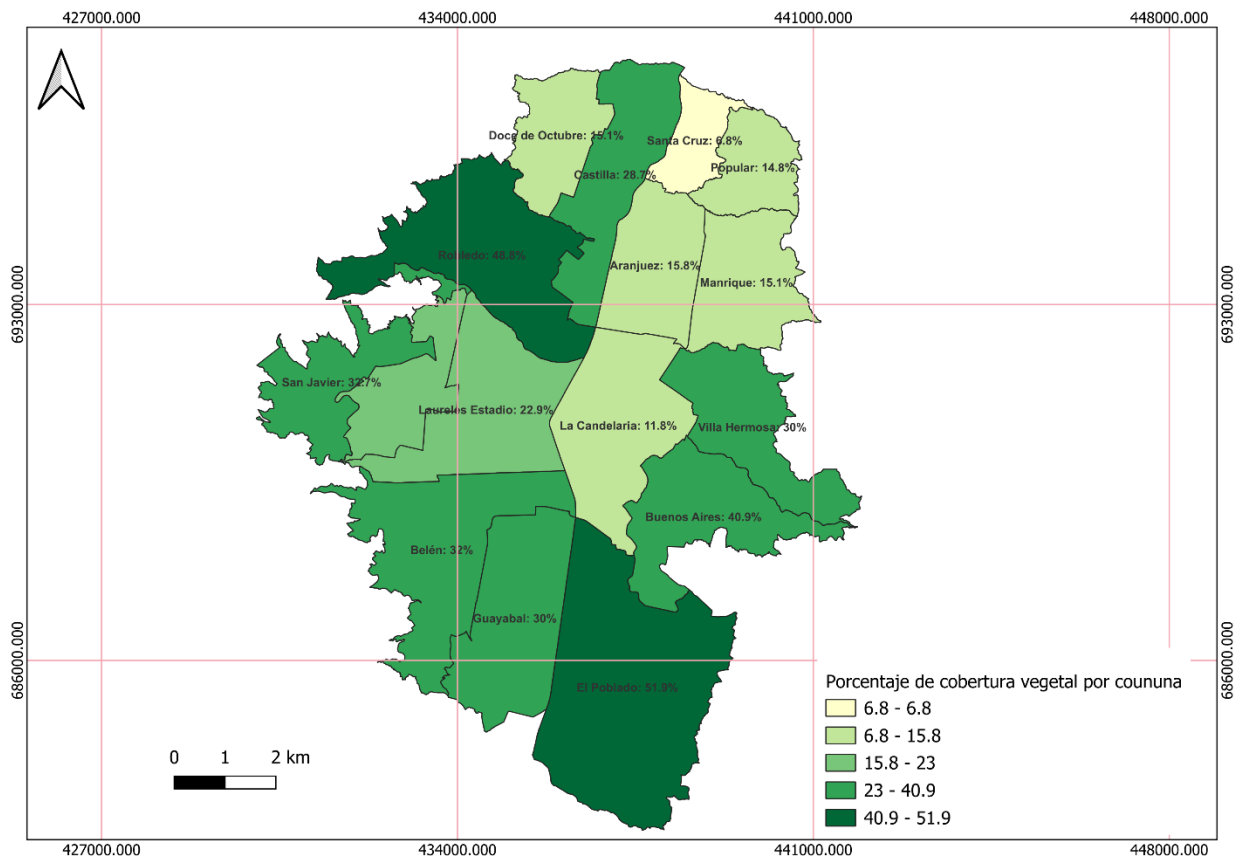


Figura 7 Porcentajes de cobertura vegetal por comunas de Medellín, 2024

En la anterior imagen se observa una variabilidad entre los porcentajes de cobertura vegetal por comunas, donde las que presentan mayor cantidad de vegetación distribuidas en sus áreas son las situadas en los sectores periféricos de la ciudad como: Poblado (51.9%), Robledo (48.8%), Buenos Aires (40.9%), San Javier (32.2%), Guayabal (30%) y Belén (32%). Las áreas ocupadas por algunas de estas comunas tienden a tener menor cantidad de población residente, construcciones viales en menor cuantía, además, el estar cerca o sobre montañas puede facilitar la conservación de las zonas verdes.

En contraste a lo anterior, las comunas con menor porcentaje de cobertura vegetal son Santa Cruz (6.8%) y la Candelaria (11.8%) destacando la última mencionada ya que es la correspondiente a la zona centro de la ciudad y por ende está mayormente expuesta a alta congestión vehicular y elevado número de industrias.

En la tabla 4 se presentan los porcentajes de cobertura vegetal clasificados como Alto: desde 30%, medio: entre 15% y 29% y bajo: menores a 15%, destacando la cantidad de comunas presentes en los tres grupos.

Tabla 4. *Tabla de atributos de mapa base de Medellín distribuido por comunas*

Porcentajes de cobertura vegetal	Comunas incluidas	Cantidad de Comunas
Desde 30%	Robledo, San Javier, Belén, Guayabal, El Poblado, Buenos Aires, Villa Hermosa	7
Entre 15% y 29%	Doce de octubre, Castilla, Aranjuez, Manrique, Laureles-Estadio, La América	6
Menor a 15%	Popular, Santa Cruz, La Candelaria	3

7 de las 16 comunas que hay en la ciudad presentan un porcentaje de vegetación a partir de 30%, 6 tienen un porcentaje que oscila entre 15% y 29% y las tres restantes presentan valores por debajo de los 15%. Se evidencia que menos de la mitad de la cantidad total de las comunas de la ciudad de Medellín posee un porcentaje de vegetación alto o relevante, contrario a esto, la mayor parte de estas poseen porcentajes inferiores al 30%, lo que indica la generación de tendencias a estructuras urbanas y concentraciones de edificaciones prevalecientes sobre corredores verdes.

7.3. Analizar la variabilidad espacial de las concentraciones de PM2.5 en las comunas de Medellín durante el año 2024.

La determinación de las concentraciones zonales se generó con el método de interpolación IDW, el cual se aplicó sobre todo el Valle de Aburrá para aprovechar las estaciones fijas situadas en los municipios aledaños a Medellín y obtener valores más certeros; además, mediante el instrumento de estadísticas zonales del software Qgis se calcularon los promedios de PM2.5 correspondiente a cada comuna.

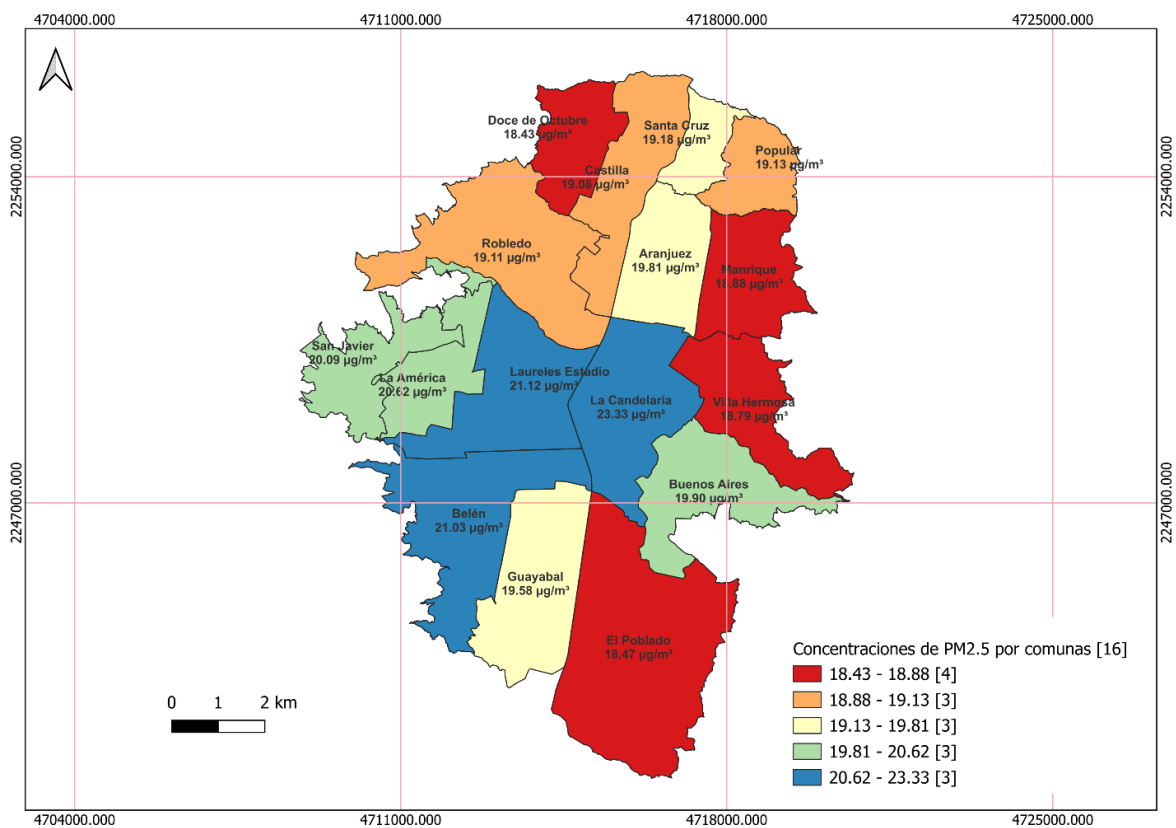


Figura 8 Distribución espacial de las Concentraciones de PM2.5 por Comunas en Medellín, 2024

En el mapa de la figura 8 se puede evidenciar que las comunas de la Candelaria, Laureles-Estadio y Belén presentan los mayores valores anuales de concentraciones de PM2.5, lo cual se alinea al hecho de que al estar situadas dentro del centro de la ciudad o cerca de este, están expuestas

a alto flujo vehicular, gran cantidad de industrias que emiten contaminantes mediante sus chimeneas, y poca cobertura vegetal urbana; Además, sobre la comuna Belén se encuentran concentradas la mayor cantidad de empresas de procesos extractivos y de producción de arena, arcilla y minería que se reconocen como fuentes generadoras de PM_{2.5}, lo cual incide en que esta sea una de las que tiene los valores más elevados de PM_{2.5} para el año 2024 (Piñeros-Jiménez et al., 2022)

Contrario a lo anterior, se presentan niveles inferiores en la comuna Doce de octubre la cual posee un flujo vehicular más bajo respecto a las demás, Asimismo, otras comunas como el Poblado, Villa Hermoza y Manrique cuentan con cobertura vegetal considerablemente elevada y particularmente las dos últimas mencionadas colindan al occidente con algunas reservas naturales, lo que va en concordancia con los resultados de PM_{2.5} arrojados.

En la figura 9 se presentan las concentraciones anuales correspondientes a cada comuna, evidenciándose el cumplimiento normativo de todos los valores respecto al límite estipulado por la normativa Colombiana Resolución 2254 de 2017 ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). No obstante, al comparar las mismas concentraciones con los límites recomendados por la Organización mundial de la salud ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se puede observar que en las 16 comunas se sobrepasan los estándares.

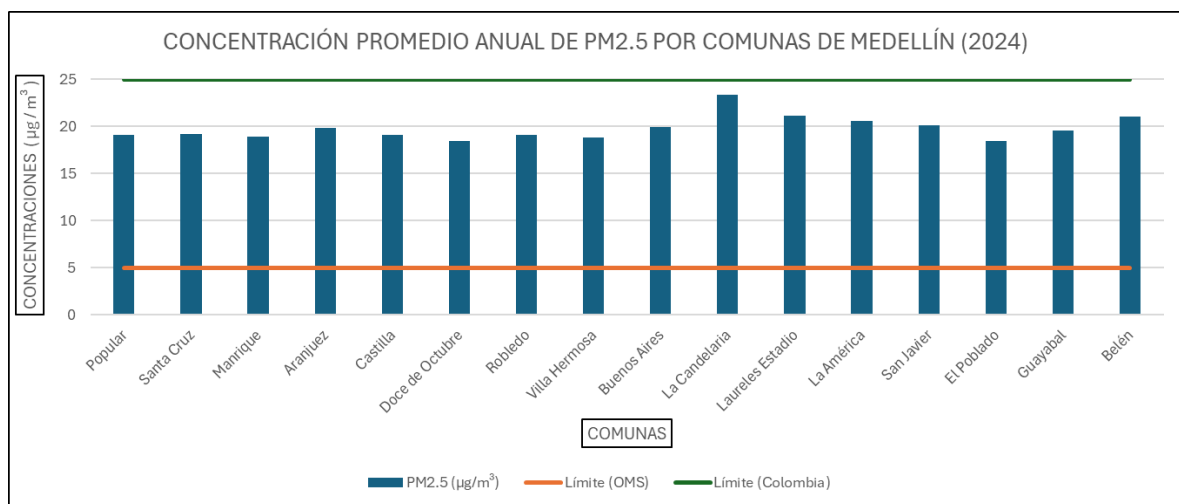


Figura 9 *Concentración promedio anual de PM2.5 por comunas de Medellín con límites normativos de referencia.*

7.4. Establecer la relación espacial entre las concentraciones de PM2.5 y el NDVI mediante el uso de técnicas estadísticas y SIG

En la siguiente tabla se muestra comparativamente la información obtenida de las concentraciones de PM2.5 correspondiente a las 16 comunas y el porcentaje de cobertura vegetal estimado mediante NDVI.

Tabla 5. *Valores promedio de PM2.5 y cobertura vegetal urbana por comunas de Medellín, año 2024*

Comuna	PM2.5 Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Porcentaje de vegetación (%)
Popular	19,13	14,76
Santa Cruz	19,18	6,84
Manrique	18,88	15,13
Aranjuez	19,81	15,81
Castilla	19,08	28,73
Doce de Octubre	18,43	15,14
Robledo	19,11	48,80
Villa Hermosa	18,79	29,95
Buenos Aires	19,9	40,87
La Candelaria	23,33	11,76
Laureles Estadio	21,12	22,86
La América	20,62	23,03

San Javier	20,09	32,71
El Poblado	18,47	51,92
Belén	21,03	32,02
Guayabal	19,58	30,02

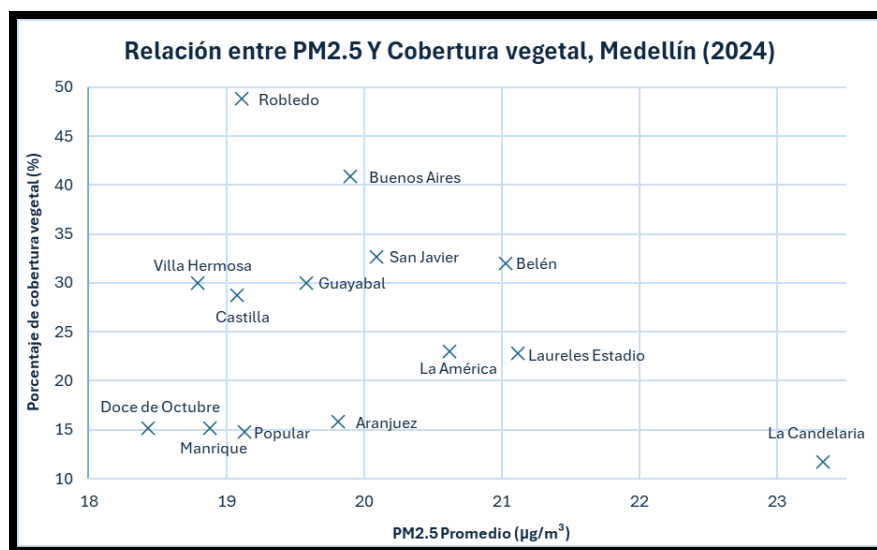


Figura 10 Asociación entre concentraciones de PM2.5 y porcentajes de cobertura vegetal por comunas de Medellín, 2024.

La aplicación del coeficiente de correlación spearman arrojó como resultado el valor **-0,091**, lo cual indica la existencia de una asociación leve y negativa entre las concentraciones de PM2.5 y los porcentajes de vegetación en las comunas de Medellín, por lo tanto, las concentraciones de PM2.5 no se encuentran estrictamente asociadas con los porcentajes bajos o altos de la cobertura vegetal presente en su misma comuna. De igual manera, la figura 10 presenta valores que no identifican un patrón o tendencia marcada, debido a que, aunque algunas comunas muestran relaciones inversamente proporcionales entre las dos variables, otras arrojaron valores similares, por lo tanto, es importante

considerar la integración de otros elementos que pueden contribuir en este fenómeno como los usos del suelo, tráfico vehicular, densidad poblacional, entre otros.

8. Discusión

La relación entre las concentraciones de PM2.5 y la cobertura vegetal de áreas urbanas en ciudades principales es un tema que ha tomado fuerza durante los años recientes, ya que se ha demostrado que la vegetación contribuye positivamente en la regulación del clima y actúa como filtro natural de los distintos contaminantes emitidos a la atmósfera, incluyendo el PM2.5. China, concentra gran parte de los estudios desarrollados en esta temática, incluyendo al NDVI como variable de incidencia en la distribución espacial de contaminantes (Jin et al., 2022; Xu Y Zhang, 2020; Yousefi et al., 2023), y algunos de estos, profundizando en la afectación que puede generar en la salud de las poblaciones la exposición a diferentes concentraciones de PM2.5. Estas tres investigaciones coinciden en destacar la importancia de la cobertura vegetal para entender la variabilidad del PM2.5 en entornos urbanos.

Como resultado de la asociación entre PM2.5 y la cobertura vegetal en las comunas de Medellín, se estableció una relación débil y negativa de (-0,091) que indica que la cobertura vegetal por sí misma no necesariamente es un indicador de las fluctuaciones del PM2.5 y que deben considerarse otros factores. En Reino Unido, se desarrolló una investigación en la que concluyeron que la cobertura vegetal influye positivamente en el control del PM2.5, pero acompañado de elementos como flujo vehicular, ferroviario y demografía (Garkov, Dearden y Milojevic, 2024). Así mismo en Ghana, África se incluyó factores como elevación del suelo, condiciones meteorológicas, flujo vehicular y cobertura vegetal, he identificaron la influencia de todos estos factores en la reducción de las concentraciones de PM2.5 (Chillrud, 2021).

Un estudio ejecutado en Brasil, respalda la influencia de otros factores en la variabilidad espacial del PM2.5, ya que Diniz coincide en asociaciones negativas de PM2.5 respecto a la cobertura vegetal en su ciudad interés, sin embargo, a diferencia de Medellín, donde la cobertura vegetal se encuentra más dispersa, en Sao Pablo se presentó mayor volumen de cobertura vegetal, una distribución más uniforme y consideraron factores influyentes como los usos del suelo, densidad poblacional y vehicular, entre otros factores que argumentan aún más la hipótesis de que el PM2.5 puede variar según distintos según la influencia de otros factores (Diniz Oliveira et al., 2025).

Se verifica el cumplimiento de concentraciones promedios anuales de PM_{2.5} correspondiente a cada comuna, respecto a la normativa nacional de referencia Resolución 2254 del ministerio de medio ambiente de 2017, sin embargo, al comparar los valores con el 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ recomendado por la OMS se evidencia que todas las comunas sobrepasan significativamente este límite, a tal punto que la comuna Doce de Octubre quien fue la de menor concentración promedio (18,43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) supera casi por cuatro veces el valor presentado anteriormente, por lo que es necesario que los entes correspondientes generen un fortalecimiento de estrategias enfocadas en la disminución de contaminantes emitidos a la atmosfera (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017; Organización Mundial de la Salud, 2022).

Finalmente, los resultados arrojados en esta investigación no deben catalogarse como definitivos e irrefutables, ya que al no haber considerado otros factores influyentes en la dispersión del PM_{2.5} es considerado de carácter exploratorio, no obstante, puede ser punto de partida para desarrollar futuras investigaciones con mayor profundidad y detalle.

9. Conclusiones

En este estudio se ha realizado un análisis del comportamiento de las concentraciones anuales de PM_{2.5} en las comunas de Medellín asociadas a la cobertura vegetal en el año 2024, demostrando el potencial de las herramientas de sistemas de información geográficas y de teledetección como algunos de los distintos elementos que pueden contribuir en la identificación de la variabilidad espacial de contaminantes como PM_{2.5}. De igual manera, representa un progreso importante en el uso de este tipo de herramientas en análisis que incluyan contaminantes atmosféricos y áreas como comunas para su aplicación en futuras investigaciones.

Respecto al índice de vegetación NDVI, permitió clasificar a Medellín como una ciudad con una marcada disparidad de cobertura vegetal, presentando diferencias notables entre comunas, además, se observa que los mayores datos de NDVI se reflejan en comunas situadas en zonas periféricas, tanto en el sur como el occidente, diferenciándose de comunas ubicadas cerca al centro de la ciudad, donde hay mayor tráfico vehicular, alta presencia de empresas e industrias, mayor aglomeración de viviendas y personas, y poca cobertura vegetal.

Con relación a la distribución espacial de las concentraciones anuales de PM_{2.5} en las comunas de Medellín para el año 2024, se concluye que hay presencia de una distribución heterogénea del contaminante en las distintas áreas de la ciudad, arrojando valores más elevados en zonas céntricas, respecto a las áreas periféricas. Además, todas las comunas presentan cumplimiento del umbral de contaminación por PM_{2.5} anual establecido por la normativa colombiana, pero distantes a los recomendados por la Organización mundial de la salud.

En última instancia, la asociación entre las concentraciones de PM_{2.5} y la cobertura vegetal es débil, ya que a pesar de que en algunas comunas “como las céntricas” se presenta una relación inversamente proporcional marcada, en otras, “como las del occidente” no es lo suficientemente fuerte, por lo que la relación entre estas dos variables no es determinante por si sola y se deben considerar otros factores influyentes.

10. Recomendaciones

Teniendo en cuenta lo desarrollado en la presente investigación, se recomienda realizar nuevas investigaciones enfocadas en la mejora de la salud ambiental, haciendo uso de herramientas utilizadas en este estudio como las estaciones de medición de contaminantes ambientales disponibles en distintos territorios del país, herramientas de teledetección y aplicación de distintos índices, según las variables de interés.

También, se recomienda fortalecer la cobertura vegetal en zonas catalogadas como críticas, como las comunas la Candelaria y Laureles-Estadio, que poseen altos niveles de PM2.5 y baja cobertura vegetal, estas intervenciones contribuirán al fortalecimiento de la recuperación de espacios verdes en la ciudad.

De igual manera, los resultados presentados en esta investigación invitan a los entes correspondientes a desarrollar distintas estrategias encaminadas a la conservación de la salud ambiental mediante monitoreo de contaminantes como PM2.5 que generan afectación al entorno y salud de las poblaciones, y toma de decisiones con acciones certeras.

Referencias

- Alcaldía de Medellín. (2025). Datos generales de la ciudad. <https://www.medellin.gov.co/es/conoce-algunos-datos-generales-de-la-ciudad/>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá, y Universidad Pontificia Bolivariana. (2019). Actualización inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá: Año base 2018 [Informe técnico]. AMVA y UPB. https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/Inventario-deemisiones/Informe_final_inventario_a%C3%B1o_base_2018.pdf
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2024). Informe de calidad del aire: Comportamiento del PM2.5 en Medellín. <https://www.metropol.gov.co/aire>
- Azizi, S. N., y Ariffin, M. H. (2021). Spatial interpolation techniques in GIS for environmental air pollution mapping: A review. *Environment and Ecology Research*, 9(3), 124–134. <https://doi.org/10.13189/eer.2021.090305>
- Bonilla-Bedoya, S., Zalakeviciute, R., Mejía, D., Durango-Cordero, J., Ramón-Molina, J. E., Macedo-Pezzopane, J., y Herrera, M. A. (2021). Spatiotemporal variation of forest cover and its relation to air quality in urban Andean socio-ecological systems. *Urban Forestry y Urban Greening*, 70, 127008. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127008>
- Campbell, J. B., y Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing* (5th ed.). Guilford Press.
- Chillrud, S., Koutrakis, P., Nethery, E., Owusu, PA, Arku, RE, Dionisio, KL, ... y Nyarko, K. (2021). Modelado de regresión del uso del suelo de la contaminación atmosférica por PM2.5 en Accra, Ghana. *Env*. [httphttps://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/isee.2021.O-SY-079](https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/isee.2021.O-SY-079)
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Resolución 2254 de 2017: Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones*. <https://www.minambiente.gov.co/wpcontent/uploads/2021/10/Resolucion-2254-de-2017.pdf>
- Diniz Oliveira, M. C. Q., de Miranda, R. M., Andrade, M. F., y Kumar, P. (2025). Impact of urban green areas on air quality: An integrated analysis in the Metropolitan Area of São Paulo. *Environmental Pollution*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126082>

- El Espectador. (2023, julio 5). Disminuyeron los espacios públicos verdes en zonas urbanas del Medellín y el Valle de Aburrá. <https://www.elespectador.com/ambiente/bibo/disminuyeron-los-espacios-publicos-verdes-en-zonas-urbanas-del-medellin-y-el-valle-de-aburra/>
- Escobedo, F. J., Kroeger, T., y Wagner, J. E. (2011). Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution*, 159(8–9), 2078–2087. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.010>
- FAO. (2024). Silvicultura urbana y periurbana. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/forestry-fao/urbanforestry/87034/es/>
- Garkov, S., Dearden, L. y Milojevic, A. (2024). Exposición poblacional a PM2.5, NO2, vegetación (NDVI), espacios verdes accesibles, ruido vial y ruido ferroviario en Inglaterra. *Atm*(10), <https://www.mdpi.com/2073-4433/15/10/1197>
- Gómez Isaza, D. R. (2023, enero 20). La “memoria” de los árboles, una habilidad para almacenar información de su entorno. *El colombiano*. <https://www.elcolombiano.com/tendencias/los-arboles-tienen-memoria-por-su-capacidad-de-almacenar-informacion-MH20148602>
- Health Effects Institute. (2024). Informe sobre el estado del aire global 2024: Un informe especial sobre la exposición global a la contaminación del aire y sus impactos en la salud, con un enfoque en la salud infantil. <https://www.stateofglobalair.org/resources/report/state-global-air-report-2024>
- Herrera-Mejía, L., y Hoyos, C. D. (2019). Análisis de las condiciones meteorológicas asociadas a eventos de alta concentración de PM2.5 en el Valle de Aburrá. *Revista Facultad de Ingeniería*, (94), 9–17. <https://doi.org/10.1002/qj.3583>
- Hernández Sampieri, R., Fernández-Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill.
- Jin, H., Chen, X., Zhong, R. y Liu, M. (25 de noviembre de 2022). Influencia y predicción de PM2.5 a través de múltiples variables ambientales en China. *Science of The Total Environment*, 849, 157910. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157910>
- Jin, J., Liu, S., Wang, L., Wu, S., Liu, W., y Zhang, W. (2022). Fractional vegetation cover and spatiotemporal variations of PM2.5 concentrations in the Beijing–Tianjin–Hebei region of China. *Atmosphere*, 13(11), 1850. <https://doi.org/10.3390/atmos13111850>

- Koldasbayeva, S., y Zaytsev, A. (2025). Spatiotemporal cross-validation strategies for species distribution models [Preprint]. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2502.03480>
- JSTOR Daily. (2025). Spearman's rank correlation: A Swiss Army knife for data analysis. <https://jstor.blog/spearmans-rank-correlation>
- Kim, J., Han, J., Park, K., y Seok, S. (2022). Improved IDW interpolation application using 3D search neighborhoods: Borehole data-based seismic liquefaction hazard assessment and mapping. *Applied Sciences*, 12(22), 11652. <https://doi.org/10.3390/app12221152>
- NASA Earthdata. (2025). Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). <https://earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/ndvi>
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A., y Greenfield, E. (2013). Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution*, 193, 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.05.028>
- Organización Mundial de la Salud. (2021). Air quality guidelines: Global update 2021. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- Organización Mundial de la Salud (2022). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: Material particulado (PM_{2,5} y PM₁₀), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono*. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9202349/?utm_source
- Parra Ospina, V., Caicedo Zapata, V., y García Salazar, S. (2024). Análisis de la salud forestal asociada a las concentraciones de PM_{2.5} en Medellín a escala barrial [Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia]. <https://hdl.handle.net/10495/44560>
- Pérez-Carrasquilla, A., Rojas, J. D., Jiménez, J. C., y Agudelo-Castañeda, D. M. (2023). Satellite-based PM_{2.5} concentration modeling using machine learning in a tropical Andean region. *Air Quality, Atmosphere y Health*, 16(1), 121–135. <https://doi.org/10.5194/ascmo-9-121-2023>
- Piñeros-Jiménez, J. G., Franco, M. C., Montealegre-Hernández, N. A., Grisales-Vargas, S. C., Gutiérrez-Cano, Y. A., y Grisales-Romero, H. (2022). Distribución espacial de la morbimortalidad atribuible a la contaminación del aire por PM_{2.5} en Medellín (Colombia), 2010-2016. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 40(2), 1–16.

- Ramírez Cadavid, J. D. (2024). Influencia de la configuración urbana sobre la dispersión del PM2.5 en el cañón urbano de la Avenida Oriental en la ciudad de Medellín [Tesis de maestría, Universidad de Antioquia]. <https://hdl.handle.net/10495/43820>
- United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- United States Geological Survey (USGS). (2024). Landsat 8–9 Collection 2 Level-2 Science Product Guide. <https://www.usgs.gov>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2025, mayo 30). *Particulate matter (PM) basics*. Recuperado [día mes año], de U.S. EPA website: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- Velásquez Ciro, D. (2019). *Estimación de la remoción de PM_{2.5} por el arbolado urbano en el Valle de Aburrá* [Tesis de maestría, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional UdeA. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/16027>
- Wang, Q., Zhan, Y., Li, Y., y Zeng, Y. (2019). Estimating ground-level PM_{2.5} using MODIS AOD and a corrected linear regression model in Beijing–Tianjin–Hebei. *Sensors*, 19(5), 1207. <https://doi.org/10.3390/s19051207>
- Xu, X. y Zhang, C. (1 de octubre de 2020). Estimación de la concentración de PM_{2.5} a nivel del suelo mediante MODIS AOD y un modelo de regresión corregido en Pekín, China. *PLoS ONE*, 15 (10), e0240430. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240430>
- Yekkehkhany, B., y Safari, H. (2021). Comparison of interpolation methods for mapping air pollution (PM_{2.5} and PM₁₀) using ground-based observations. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 388. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09227-5>
- Yousefi, R., Shaheen, A., Wang, F., Ge, Q., Wu, R., Lelieveld, J., Wang, J. y Su, X. (2023). Tendencias de las partículas finas (PM_{2.5}) derivadas de los cambios en la superficie terrestre y las políticas de contaminación atmosférica en China durante 1980-2020. *Journal of Environmental Management*, 326, 116847. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116847>
- Zoran, M., Savastru, D., Tautan, M., Tenciu, D., y Stanciu, A. (2025). Spatiotemporal analysis of air pollution and climate change effects on urban green spaces in Bucharest Metropolis. *Atmosphere*, 16(5), 553. <https://doi.org/10.3390/atmos16050553>