



**ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE PM2.5 ENTRE EL AÑO
2022 Y 2023 PARA LA PLANIFICACIÓN URBANA SOSTENIBLE EN LA CEJA,
ANTIOQUIA**

Leidy Cristina Ciro Espinosa

Sebastián Giraldo Otálvaro

Trabajo de Grado para optar por el título de Profesional en Desarrollo Territorial

|

Asesor

Juan Camilo Rengifo López, Magíster (MSc) en Estudios Urbano Regionales

Universidad de Antioquia

Facultad de Ciencias Económicas

Desarrollo Territorial

El Carmen de Viboral, Antioquia, Colombia

2024

Cita

(Ciro Espinosa & Giraldo Otálvaro, 2024)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Ciro Espinosa, L., & Giraldo Otálvaro, S. (2014). *Análisis Geoestadístico de la calidad del aire PM 2.5 entre el año 2022 y 2023 para la planificación urbana sostenible en La Ceja, Antioquia* [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, El Carmen de Viboral, Colombia.



Biblioteca Seccional Oriente (El Carmen de Viboral)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.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 Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUCCIÓN	9
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
3. MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL.....	12
3.1 Referentes conceptuales	12
3.2 Referentes normativos.....	15
3.3 Referentes tecnológicos.....	16
3.4 Estudios aplicados	17
4 OBJETIVOS	18
4.1 GENERAL	18
4.2 ESPECÍFICOS	18
5 METODOLOGÍA	19
6 RESULTADOS.....	20
7 CONCLUSIONES	25
8 BIBLIOGRAFÍA	27
9 ANEXOS	29

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de predictores Kriging y sus propiedades.	13
Tabla 2. Niveles de contaminante – Índice de Calidad del Aire	13
Tabla 3. Reporte de datos sobre la media de concentración de PM 2.5 y sobre la media del área resultado	20
Tabla 4. Estadística descriptiva – Datos depurados	21
Tabla 5. Número total de registros	29
Tabla 6. Estadística descriptiva - Datos originales.....	30

LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Contexto zona de estudio	10
Mapa 2. Línea temporal de concentración PM 2.5 entre junio de 2022 y junio de 2023.....	22
Mapa 3. Concentración de PM 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mes de junio de 2022.....	23
Mapa 4. Concentración de PM 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mes de marzo de 2023	24
Mapa 5. Mapa 5: Concentración de PM 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mes de abril de 2023	24

Siglas, acrónimos y abreviaturas

APA	American Psychological Association
MSc	Magister Scientiae
UdeA	Universidad de Antioquia
PM	Material Particulado

Análisis geoestadístico de la calidad del aire pm2.5 entre el año 2022 y 2023 para la planificación urbana sostenible en La Ceja, Antioquia

Leidy Cristina Ciro Espinosa¹
Sebastián Giraldo Otálvaro²

RESUMEN

La integración de los procesos ambientales y el cambio climático en la planificación urbana es esencial para promover un desarrollo sostenible y equitativo en las ciudades. Es imperativo desarrollar herramientas de planificación que faciliten la implementación de políticas institucionales orientadas a la reducción del impacto ambiental, con el objetivo de asegurar una alta calidad de vida para los habitantes. Esta investigación se centra en el análisis mediante geoestadística espacial, con el propósito de identificar, en primera instancia, cómo los datos de la red de monitoreo Waira pueden utilizarse para localizar áreas urbanas afectadas por contaminación de material particulado PM 2.5 y cómo esta información puede influir en la toma de decisiones relacionadas con la planificación urbana. Estas proyecciones delimitan estrategias y planes que contribuyen a la mejora de la calidad de vida humana.

Palabras clave: geoestadística, desarrollo sostenible, material particulado, planeación urbana, calidad del aire.

¹ Estudiante del pregrado de Desarrollo Territorial de la Universidad de Antioquia, Seccional oriente. Correo: leidyc.ciro@udea.edu.co

² Estudiante del pregrado de Desarrollo Territorial de la Universidad de Antioquia, Seccional oriente. Correo: sebastian.giraldo9@udea.edu.co

Geo-statistical analysis of PM2.5 air quality between 2022 and 2023 for sustainable urban planning in La Ceja, Antioquia

ABSTRACT

The integration of environmental processes and climate change into urban planning is essential for promoting sustainable and equitable development in cities. It is imperative to develop planning tools that facilitate the implementation of institutional policies aimed at reducing environmental impact, with the objective of ensuring a high quality of life for inhabitants. This research focuses on analysis through spatial geostatistics, with the purpose of identifying, in the first instance, how data from the Waira monitoring network can be used to locate urban areas affected by PM 2.5 particulate matter pollution and how this information can influence decision-making related to urban planning. These projections outline strategies and plans that contribute to improving human quality of life.

Key Words: Geostatistics, Sustainable development, Particulate matter, Urban planning, Air quality.

1. INTRODUCCIÓN

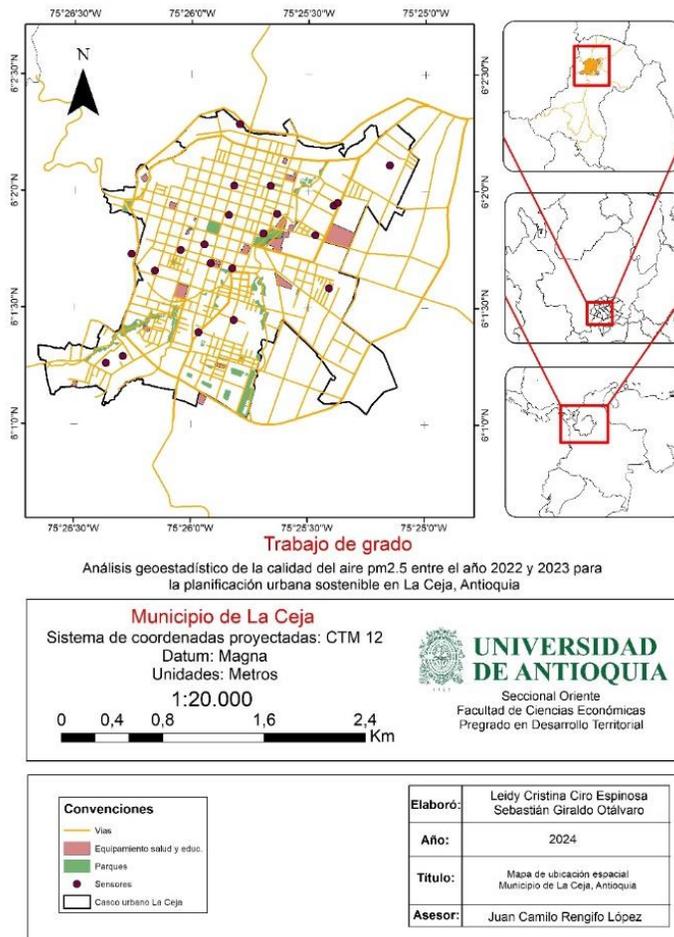
El presente texto destaca la importancia de reconocer el valor de los datos de medición de la calidad del aire obtenidos mediante dispositivos del Internet de las Cosas (IoT) para fortalecer los procesos de planificación urbana. Se pretende explorar el caso del municipio de La Ceja, Antioquia, con el objetivo de identificar cómo una red de monitoreo de calidad del aire puede contribuir a la planificación y toma de decisiones en el ámbito de la salud pública del municipio, aprovechando la existencia de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire Waira.

La justificación de este estudio se enmarca en la definición de los Objetivos de Desarrollo Sostenible con meta al año 2030 establecidos por la Organización de las Naciones Unidas, así como en la identificación de iniciativas para reducir contaminantes riesgosos para la salud humana. Además, se plantean objetivos específicos, como revisar sistemáticamente la literatura relacionada con la planificación urbana y la calidad del aire, y analizar esta información para identificar tendencias que puedan ser utilizadas en trabajos futuros relacionados con la planificación urbana, la salud pública y las redes comunitarias de ciencia ciudadana.

El estado del arte proporciona un primer acercamiento sobre la influencia de la calidad del aire en la vida humana, considerando tanto aspectos de salud como de planificación urbana. Se destacan las diferentes perspectivas sobre cómo abordar la planificación urbana y la calidad del aire, todas ellas con un objetivo común: desarrollar procesos sostenibles y mejorar la calidad de vida.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los procesos ambientales y de cambio climático deben ser incorporados en la planificación urbana como elementos determinantes para el desarrollo sostenible y equitativo de las ciudades. En el caso del municipio de La Ceja, la planificación urbana cobra mayor relevancia debido a su clasificación como municipio intermedio. Según el análisis de situación de salud de la Secretaría Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia, basado en datos estadísticos del DANE (2022), La Ceja tuvo las siguientes proyecciones demográficas: en 2015, 61,050 habitantes; en 2021, 69,399 habitantes; y para 2023, 71,570 habitantes. En consecuencia, la planificación futura del municipio debe considerar el aumento del parque automotor, que, según la Secretaría de Tránsito y Transporte de La Ceja, pasó de 11,000 vehículos en 2011 a 15,000 en 2015, así como la proyección de construcciones habitacionales, comerciales e industriales. Estos factores impactarán significativamente las variables ambientales del municipio, especialmente la calidad del aire. Por lo tanto, es crucial generar herramientas de planificación que permitan la formulación de políticas de reducción de impacto ambiental a nivel institucional, con el fin de garantizar a los habitantes una buena calidad de vida. El **Mapa 1** reporta el contexto de la zona de estudio.

Mapa 1. Contexto zona de estudio

Fuente: elaboración propia.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) planteados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) se constituyen en metas para sus países miembros proyectadas al año 2030. Estas proyecciones trazan una hoja de ruta en términos de estrategias y planes para mejorar la calidad de vida humana. En particular, el ODS 13, “Acción por el clima”, menciona la necesidad de “adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos”. Adicionalmente, el ODS 11, “Ciudades y comunidades sostenibles”, establece el objetivo de “lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles”.

En este marco global, es evidente la necesidad de generar políticas que favorezcan la planificación territorial en términos de calidad del aire, el cual, según la Organización Panamericana de la Salud (OPS), es el principal riesgo para la salud en las Américas (Organización Mundial de la Salud, 2016, citado en OPS, s.f.). La contaminación del aire es un problema global que afecta a numerosas ciudades en todo el mundo. En 2019, la Organización Mundial de la Salud (OMS) reportó que más del 90% de la población mundial respira aire contaminado, lo que ocasiona más de siete millones

de muertes prematuras cada año (OMS, 2019, citado en OPS, 2019). Entre las diversas formas de contaminación, la presencia de partículas finas PM2.5 en el aire se considera una de las más peligrosas. La inhalación de estas partículas puede causar daños significativos en la salud humana, como problemas respiratorios y cardiovasculares graves.

A pesar de los esfuerzos realizados por algunos países para reducir las emisiones de PM2.5, existen casos en los que la contaminación del aire es casi incontrolable, especialmente en ciudades densamente pobladas y altamente industrializadas. Por ejemplo, la ciudad de Nueva Delhi, India, es una de las más contaminadas del mundo según IQAir (AIRQuality, 2023). Otras ciudades que experimentan niveles alarmantes de PM2.5 incluyen Pekín, China, y Lahore, Pakistán.

A nivel nacional, los costos de salud asociados a la mala calidad del aire ascendieron a 15.4 billones de pesos en 2015, lo que representó aproximadamente el 1.93% del PIB anual (Serna, 2021). Además del llamado de atención que supone tener agendas especializadas en la reducción de contaminantes, como el Acuerdo de Escazú y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), la calidad del aire se posiciona como un problema latente para los recursos públicos. Una mala calidad del aire incrementa el riesgo de padecer enfermedades respiratorias, aumentando el uso de los sistemas de salud. La constitución política de Colombia, en sus artículos 79 y 80, consagra el derecho colectivo a gozar de un ambiente sano y el deber del Estado de proteger la diversidad e integridad del ambiente. Con este marco constitucional, en 2017 se emitió la resolución 2254, que adopta la “norma de calidad del aire”.

A nivel regional, la Corporación Autónoma Regional CORNARE, en su Plan de Acción Institucional 2020-2023, establece en su línea estratégica 3, Autoridad ambiental y gestión integral de los recursos naturales, el programa 3, Gestión Integral del Recurso Aire, y el proyecto Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire. Entre sus metas se incluye “mantener el Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM10 por debajo de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (buena calidad) en la región” (CORNARE, 2020, p.67). Es importante destacar que esta meta no incluye las mediciones de PM2.5, las cuales, según la Organización Panamericana de la Salud (OPS), presentan mayor riesgo para la salud al poder alojarse profundamente en los pulmones.

A nivel territorial, el Plan Básico de Ordenamiento Territorial del municipio de La Ceja, actualizado en 2018, a pesar de ser la herramienta que direcciona la planificación y el modelo del municipio, no menciona ni considera variables atmosféricas como la calidad del aire para la planificación de zonas verdes, vías o equipamientos urbanos. Esto a pesar de que la Ley de Ordenamiento Territorial (LOT) establece que las ciudades y municipios deben desarrollar planes de ordenamiento territorial que incluyan medidas para mejorar la calidad del aire, como la promoción del transporte no motorizado, la regulación de emisiones contaminantes y la promoción de tecnologías más limpias en la industria. Por su parte, el Plan de Desarrollo “La Ceja, Nuestro

Compromiso”, aunque dedica una línea estratégica al ambiente, no menciona la calidad del aire o la contaminación atmosférica.

En el municipio de La Ceja, el proyecto de medición de calidad del aire Waira utiliza sensores de bajo costo para la medición de PM_{2.5}, humedad y temperatura en el casco urbano. Al ser herramientas de bajo costo, su implementación es sencilla y puede extenderse a múltiples puntos del municipio, favorecida por una iniciativa comunitaria. Sin embargo, hasta el momento, esta red de monitoreo no ha sido tomada como referencia para la toma de decisiones medioambientales o de planificación por parte de la administración municipal. En ese orden de ideas, la pregunta de investigación es ¿Cuál es el papel de la medición de la calidad del aire PM_{2.5} como herramienta clave en la planeación urbana sostenible, sus efectos en la salud pública y cómo contribuye a la promoción de la participación comunitaria a través de la generación de una red de monitoreo ambiental en el municipio de La Ceja, Antioquia, en la actualidad?

3. MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL

3.1 Referentes conceptuales

La calidad del aire está intrínsecamente ligada a la percepción y estudio de la contaminación atmosférica. De acuerdo con Yassi et al. (2002), esta contaminación se define como “la emisión al aire de sustancias peligrosas a una tasa que excede la capacidad de los procesos naturales de la atmósfera para transformarlos, precipitarlos y depositarlos o diluirlos por medio del viento y el movimiento del aire”. En este contexto, la calidad del aire refleja el estado de la atmósfera y puede ser medida mediante indicadores ambientales como el nivel de material particulado (medido en microgramos por metro cúbico, $\mu\text{g}/\text{m}^3$), y el dióxido de nitrógeno (NO_2 , $\mu\text{g}/\text{m}^3$), entre otros (Organización Mundial de la Salud, 2021, p. 6).

Para el proceso cuantitativo mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), se utilizará la metodología de interpolación espacial ponderada, definida como el proceso de utilizar puntos con valores conocidos para estimar valores en otros puntos desconocidos (Londoño & Valdés, 2012). A continuación, se presenta una definición conceptual de las interpolaciones espaciales más comunes:

- **IDW (Inverse Distance Weighting):** El método de ponderación espacial por distancia inversa es uno de los métodos de interpolación determinista más comunes. Este método sugiere que los valores desconocidos se calculan mediante una combinación lineal de valores conocidos (Eslami & Ghasemi, 2018, p. 190).
- **Spline de Placa Delgada (TPS):** Al igual que la interpolación IDW, el spline de placa delgada es un método determinista. Este método busca ajustar una superficie que pase por todos los puntos conocidos y que suavice la curvatura de dicha superficie. Se utilizan

funciones polinómicas por tramos, cada una acorde al intervalo que representa, en lugar de una función general para todo el conjunto de puntos (Hancock & Hutchinson (2006) citado por Sánchez, 2020).

- Kriging: Este método engloba un conjunto de técnicas de predicción espacial que se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción (Giraldo, 2002) Londoño & Valdés, 2012) . Parta este, la **Tabla 1** reporta los tipos de Kriging y sus propiedades.

Tabla 1. Tipos de predictores Kriging y sus propiedades.

Tipo de Predictor	Nombre	Propiedades
Lineal	<ul style="list-style-type: none"> • Simple • Ordinario • Universal 	<ul style="list-style-type: none"> • Son óptimos si hay normalidad multivariada. • Independiente de la distribución son los mejores predictores linealmente insesgados.
No Lineal	<ul style="list-style-type: none"> • Indicador • Probabilístico • Log normal, Trans-Gaussiano • Disyuntivo 	<ul style="list-style-type: none"> • Son predictores óptimos

Fuente: elaboración propia a partir de Giraldo (2002)

En Colombia, la medición de la calidad del aire se realiza mediante el Índice de Calidad del Aire (ICA). Este informe anual consiste en "comparar los niveles de contaminación del aire de las estaciones de monitoreo que conforman un Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (Unidades espaciales de referencia), en un tiempo t" (IDEAM, 2012). Además, "el índice se calcula de manera independiente para cada uno de los seis principales contaminantes: PM10, PM2.5, SO2, NO2, O3 y CO" (IDEAM, 2012). Los niveles de contaminantes se clasifican por rangos y colores como se reporta en la **Tabla 2** :

Tabla 2. Niveles de contaminante – Índice de Calidad del Aire

Rangos ICA	Colores
$0 \leq ICA \leq 50$	Verde
$51 \leq ICA \leq 100$	Amarillo
$101 \leq ICA \leq 150$	Anaranjado
$151 \leq ICA \leq 200$	Rojo
$201 \leq ICA \leq 300$	Morado
$301 \leq ICA \leq 500$	Marrón

Fuente: elaboración propia a partir del IDEAM (2012)

La planificación urbana ha sido objeto de estudio por numerosos autores de renombre, entre los cuales destacan Ebenezer Howard, Jane Jacobs y Le Corbusier. Sin embargo, uno de los padres fundadores de los estudios y la planeación urbana es Kevin Lynch. Lynch define la planificación urbana como:

“Un arte temporal, pero que sólo rara vez puede seguir una secuela controlada. En diferentes ocasiones y para distintas personas, las secuelas se invierten, se interrumpen, son abandonadas. A la ciudad se le ve con diferentes luces y en todo tipo de tiempo” (Lynch, 1959, p. 9).

En ese sentido, la planificación urbana se presenta como un arte dinámico que responde a procesos temporales, geográficos, sociales y culturales intrínsecamente ligados a fenómenos sociales. La configuración espacial para la ubicación de zonas comunes como hospitales, parques, escuelas y centros comerciales está condicionada por aspectos del ordenamiento territorial como el uso del suelo, la tipología del suelo y condiciones ambientales favorables (Ley 388, 1997) (Congreso de la República, 1997).

Por otra parte, la planificación urbana debe nutrirse de datos que permitan identificar amenazas y riesgos potenciales. En este contexto, resulta pertinente llevar a cabo cartografías mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el objetivo de espacializar los datos de riesgo y amenaza, identificando posibles poblaciones afectadas en caso de eventualidades o para prevenir o mitigar pérdidas humanas y materiales mediante la planificación de estrategias o planes de prevención (Bello et al., 2020, p 31). El desarrollo urbano, por ende, debe considerar meticulosamente cómo el flujo de aire a través de una ciudad puede mejorar la dispersión de contaminantes dentro del casco urbano (Zhang & Gu, 2013). Por esta razón, resulta pertinente realizar mediciones previas al cambio en el ordenamiento territorial para identificar variaciones en los procesos ambientales vinculados a la calidad del aire.

Un componente fundamental para la obtención de datos sobre la calidad del aire son las redes de monitoreo de calidad del aire, estaciones encargadas de vigilar, recolectar y analizar concentraciones de contaminantes atmosféricos como material particulado PM, ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂) y monóxido de carbono (CO) (Serna et al., 2020). Comúnmente, los monitores de estas redes operan bajo métodos y estándares de medición específicos (Secretaría de Ambiente de Bogotá, 2024). Dichas redes desempeñan un papel crucial en la medición de los contaminantes atmosféricos.

Los contaminantes atmosféricos pueden clasificarse en dos tipos: según su origen y según su estado de la materia. Según el origen, pueden proceder de la emisión, acumulación y mezcla de contaminantes que provienen de fuentes naturales o antropogénicas. Con base en Romero Placeres et al., (2006) se dan:

- Fuentes naturales: Polvo que contiene materias biológicas, esporas, polen y bacterias.
- Fuentes agrícolas: Insecticidas y herbicidas empleados en la agricultura.
- Fuentes tecnológicas: como procesos industriales de todo tipo, consumo industrial y doméstico de combustibles fósiles y vehículos de motor.

Por otra parte, según el estado de la materia, pueden existir contaminantes gaseosos y particulados, aerosoles, componentes metálicos, contaminantes radiactivos y pesticidas (Romero Placeres et al., 2006). Ahora bien, entre los contaminantes por partículas se encuentran el PM10 y el PM2.5, que consisten en pequeños cuerpos sólidos y gotas líquidas. Las fuentes antropogénicas de emisión de partículas incluyen cenizas volantes de plantas de energía, fundiciones, combustión de combustible, operaciones industriales, quema de desechos, entre otras. La contaminación por partículas comprende:

- PM10: Partículas inhalables con diámetros generalmente de 10 micrómetros o menos.
- PM2.5: Partículas inhalables finas con diámetros generalmente de 2.5 micrómetros o menos.

El material particulado (MP) es uno de los contaminantes del aire cuyos efectos adversos sobre la salud están particularmente bien documentados (Organización Mundial de la Salud, 2013) (Buitrago & Rodríguez, 2022). Por otro lado, la geoestadística se refiere al conjunto de técnicas estadísticas utilizadas para el estudio de variables numéricas distribuidas en el espacio (Londoño & Valdés, 2012). Estas técnicas implican la aplicación de métodos de estadística descriptiva como la media, la varianza y la desviación estándar, pero en el contexto geográfico específico del municipio de La Ceja, Antioquia.

3.2 Referentes normativos

Los procesos de planificación urbana conllevan estudios técnicos que sustentan las propuestas para orientar el ordenamiento territorial. Un ejemplo paradigmático de esto es la construcción de los Planes de Ordenamiento Territorial, estipulados por la ley 388 de 1997, normativa que establece los estándares para que entidades territoriales como municipios o departamentos se organicen y planifiquen su desarrollo. En este contexto, la obtención de datos y la realización de diagnósticos facilitan la toma de decisiones respecto a la planificación y visión de los territorios.

La ley 388, también conocida como "Ley de Desarrollo Territorial", define el ordenamiento territorial como un conjunto de acciones político-administrativas y de planificación físicas concretas, emprendidas por los municipios y entidades territoriales con el fin de orientar el desarrollo del territorio bajo su propia jurisdicción, así como regular la utilización, transformación y ocupación del suelo.

Cada territorio presenta particularidades únicas, y desde un enfoque micro o macro, el análisis puede revelar que la calidad del aire en entornos urbanos y los análisis para la formulación en planificación pueden tener efectos tanto negativos como positivos en la calidad de vida de las personas. De acuerdo con Aguilo Vidal (2013), *"la consideración de los efectos sobre el aire de las actuaciones humanas articuladas mediante la planificación del territorio, ya que todos los instrumentos de ordenación del territorio deben someterse a una evaluación ambiental estratégica previa"*, todo esto con el objetivo de contrarrestar los efectos negativos e incorporar planes y proyectos que mitiguen el impacto ambiental.

Por lo tanto, se formuló para el Departamento de Antioquia el Plan de Adaptación al Cambio Climático desde Salud Ambiental para Antioquia (PACCSA) 2021-2031 por parte de la Universidad de Antioquia & la Gobernación de Antioquia (2020), con el fin de promover la adaptación a un entorno afectado por el cambio climático. El PACCSA busca, a través de medidas y estrategias, minimizar los impactos del cambio climático y fortalecer la capacidad de adaptación a las condiciones ambientales por parte de la población antioqueña. Según este plan, las proyecciones climáticas para la jurisdicción de CORNARE son: "Para el periodo 2041-2070, los mayores cambios se presentarán sobre los municipios del extremo oriental y occidental: Puerto Triunfo, El Retiro, La Ceja, La Unión y Rionegro, mientras que los menores cambios serán sobre los municipios del norte y en el centro: Santo Domingo, Concepción, San Roque, San Carlos y San Rafael" (PACCSA, Pág. 139). Todo esto subraya la importancia de analizar y cuantificar la calidad del aire en el municipio de La Ceja, mediante herramientas de estadística espacial.

3.3 Referentes tecnológicos

El avance tecnológico en sistemas ha proporcionado a la humanidad una ventana abierta hacia la obtención y medición de datos de diversa índole. El internet desempeña un papel fundamental en la democratización de la información y el acceso a nuevos espacios virtuales donde se consolidan herramientas diseñadas específicamente para el entorno digital, conocidas como Internet de las Cosas o, en inglés, Internet of Things (IoT) (Escobar et al., 2021, citado en Buitrago y Rodríguez, 2022; Asensio et al., 2014).

"El uso de herramientas avanzadas de IoT para proyectos de ciencia ciudadana podría representar un desafío con una limitación potencial en el alcance de los sensores de bajo costo, sin embargo, el desarrollo de protocolos de validación de datos y calibración de microsensores facilita el uso de esta tecnología y su uso como complemento a las redes oficiales para identificar eventos específicos de contaminación y generar mediciones indicativas de la calidad del aire en ambientes específicos, realizar proyectos de educación ambiental, y apropiación social". (p. 39)

En este contexto, el desarrollo de protocolos de validación de datos y calibración de microsensores ha simplificado su implementación, lo que permite su uso en conjunto con las redes sociales. Esto posibilita que tanto redes ciudadanas como el gobierno puedan tomar decisiones fundamentadas en

la información proporcionada por estos sensores. Esta integración ha facilitado la identificación de eventos específicos de contaminación y la generación de mediciones indicativas de la calidad del aire en entornos específicos. Todo esto con el propósito de impulsar proyectos urbanos que promuevan el bienestar y la calidad de vida de sus habitantes.

3.4 Estudios aplicados

Esta sección abordará el estado del arte que busca plasmar algunos análisis que se han dado con relación a la calidad del aire, la planificación urbana, los efectos en la salud por partículas contaminantes y la importancia de las redes de ciencia ciudadana.

En primera medida se puede establecer que la calidad del aire puede influir en la planificación urbana a partir de la identificación de zonas de riesgo y de los contaminantes presentes en zonas específicas de los municipios o ciudades, como parte del diagnóstico pueden desarrollarse análisis de impactos ambientales relacionados con las afectaciones en la salud, el ecosistema y la calidad de vida de los habitantes. Con base en este diagnóstico se pueden establecer políticas y regulaciones que respalden las decisiones administrativas, jurídicas y de planificación. La planificación del uso del suelo puede ser una de las apuestas de planificación que surjan a partir de las mediciones de calidad del aire: ubicar escuelas, hospitales o placas polideportivas fuera de zonas con afectaciones en materia de calidad del aire sería una de las apuestas de este tipo de análisis. Otra estrategia de planificación urbana con base en mediciones de calidad del aire es el diseño de infraestructura y transporte sostenible como ciclorrutas, bicicletas y parqueaderos públicos de bicicletas, transporte público, entre otros.

Es importante mencionar que los avances tecnológicos han hecho posible el despliegue masivo de pequeños dispositivos distribuidos, con características de bajo costo, bajo consumo de energía, y con capacidad de procesamiento local y comunicación inalámbrica, lo cual ha propiciado el desarrollo de un nuevo paradigma, llamado Internet of Things (IoT) (Giusto et al., 2010). Las herramientas IoT pueden ser utilizadas para asistencia en la conducción, monitoreo de variables ambientales, mapas aumentados e interactivos, identificación y autenticación, diseño de hogares inteligentes, en plantas industriales, información de modelos de ciudad, entre otros (Giusto et al., 2010).

La contaminación atmosférica y la salud están conectados de forma en que mientras exista mayor contaminación en la atmósfera, las afecciones respiratorias en las personas son más comunes (Becerra Moreno et al., 2021), por lo que medir la calidad del aire para impulsar procesos de planificación urbana puede aportar para identificar espacios en los cuales ubicar equipamientos públicos como colegios, hospitales o parques (Bello et al., 2020). En este mismo sentido Molina Gómez establece que “la calidad del aire es un determinante intermedio que influencia la salud de la población, contribuyendo con incrementos en los costos sociales asociados a las tasas de morbilidad y mortalidad y el pago de tratamientos relacionados” (Molina Gómez, 2021, p. 48).

Por otra parte, el enfoque comunitario de la investigación favorece la existencia de una red de voluntarios de ciudadanos científicos. Este ejercicio de participación puede impulsar la promoción de acciones educativas y comunicacionales (Forrest et al., 2019), lo cual es un hito en cuanto a descentralizar la investigación científica y favorecer la aparición de nuevos escenarios de promoción ciudadana en la ciencia y la salud (Alfonso et al., 2022).

Finalmente, con relación a casos aplicados de geoestadística, la investigación denominada “Caracterización espacial de PM10 en la ciudad de Medellín mediante modelos geoestadísticos”, en este caso en particular se utilizó el modelo geoestadístico (Jbessel), que arrojó como resultado lo siguiente: “Este modelo tiene una confiabilidad de estimación promedio del 84% obtenida mediante pruebas de validación cruzada. Usando pruebas ANOVA se encontró similitud estadística entre los valores promedios de los parámetros del modelo en agrupaciones mensuales y trimestrales” (Londoño-Ciro et al., 2015, p.9; Londoño-Ciro et al., 2017) . En este sentido, la presente investigación busca tener resultados de manera similar con el fin de poner en práctica herramientas para la gestión ambiental de la calidad del aire.

Por otra parte, la investigación “Modelo de proximidad espacial para definir sitios de muestreo en redes urbanas de calidad de aire” utilizó para la implementación del modelo la herramienta *Spatial Analyst* del software ArcMap versión 10.3 de la tecnología ESRI, lo cual permitió estimar la concentración de material particulado PM10 en determinadas zonas de la ciudad. Este modelo ofrece una caracterización rápida del comportamiento del material particulado en la ciudad de Medellín.

4 OBJETIVOS

4.1 GENERAL

Analizar el papel de la medición de la calidad del aire de material particulado PM 2.5 como herramienta clave en la planeación urbana sostenible, los efectos en la salud pública y la promoción de la participación comunitaria a través de la generación de una red de monitoreo ambiental en el municipio de La Ceja, Antioquia, en la actualidad

4.2 ESPECÍFICOS

- Identificar cómo los datos de la red de monitoreo Waira pueden utilizarse para localizar áreas urbanas con problemas de contaminación por material particulado PM 2.5 y de qué forma esta información influye en la toma de decisiones relacionadas con la planificación urbana.
- Medir a través de herramientas de estadística espacial la calidad del aire en el municipio de La Ceja

5 METODOLOGÍA

La presente investigación tiene como metodología general la aplicación de geoestadística espacial. En primer lugar, se busca utilizar los datos recopilados por la red de monitoreo Waira para localizar áreas urbanas con problemas de contaminación por material particulado PM2.5 y examinar cómo esta información incide en las decisiones relacionadas con la planificación urbana. A continuación, se lleva a cabo un ejercicio de estadística descriptiva para evaluar la calidad del aire municipal. Por último, se contrasta la percepción de calidad del aire por parte de los voluntarios del proyecto con los datos estadísticos y geoestadísticos obtenidos en el análisis.

La técnica empleada implica el procesamiento estadístico utilizando herramientas como Excel, R y Sistema de Información Geográfica (SIG). En Excel, se agrupan los datos y se realizan análisis estadísticos simples, como el cálculo de desviaciones estándar. En R, se llevan a cabo análisis más complejos, aprovechando su capacidad para manejar grandes conjuntos de datos y realizar cálculos estadísticos avanzados, así como la generación de gráficos de tendencia central. Por último, el uso de software SIG como ArcGIS o QGIS permite realizar análisis geoespaciales, como la detección de patrones y puntos calientes que revelen el comportamiento de una variable espaciotemporal en el territorio cejeño.

Para la recopilación de datos, se emplea una base de datos que registra la concentración de material particulado PM2.5, obtenida de las estaciones de monitoreo georreferenciadas. Estos datos se agrupan en un panel que se utiliza para procesar estadísticamente, corrigiendo datos atípicos y realizando análisis descriptivos básicos. Además, se construye un modelo geoestadístico mediante el uso de modelos de interpolación espacial para determinar el patrón espacial de distribución del material particulado en el municipio de La Ceja.

Los análisis revelan que los sensores de la Red de Monitoreo Waira están distribuidos aleatoriamente por el municipio, proporcionando una imagen completa de la calidad del aire en el área urbana. Sin embargo, se observa una variabilidad considerable en la cantidad de datos recopilados por cada sensor, lo que requiere una segmentación basada en factores como la concentración promedio de material particulado y el porcentaje promedio de área afectada.

Durante el análisis de los datos de los sensores, se identifican *outliers* en ciertos sensores, como La Cejeñita, El Palmar, El Triunfo y Centro, que requieren una limpieza manual de datos para asegurar la precisión y confiabilidad de los resultados. Esta limpieza se realiza en Excel antes de proceder al análisis en el software estadístico R.

Por otro lado, el procesamiento geoestadístico de los datos se lleva a cabo en ArcGIS Desktop. Se realiza un buffer de 200 metros alrededor de equipamientos públicos como escuelas, hospitales y

parques públicos inventariados en el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) del año 2018. Posteriormente, se utiliza el modelo de interpolación IDW (Inverse Distance Weighting) para interpolar los datos a lo largo de toda el área urbana del municipio. Este proceso implica una serie de pasos, incluyendo la unión de la base de datos compilada de los sensores con el archivo shape de los puntos de los sensores, la interpolación espacial y la intersección con la zona de influencia de los equipamientos públicos para identificar la media de concentración de PM_{2.5} y la relación entre esta concentración y la presencia de equipamientos públicos.

La interpolación se realiza con un tamaño de píxel de 20 metros para garantizar una representación adecuada del área urbana sin exceder el tamaño del límite municipal. La **Tabla 3** reporta que, durante los meses de junio de 2022, marzo y abril de 2023, los datos muestran valores superiores a la media mensual y al área de influencia de los equipamientos públicos. Estos hallazgos son ejemplos evidentes de la necesidad de implementar medidas de adaptación para mitigar los impactos de la contaminación por material particulado en los equipamientos públicos.

Tabla 3. Reporte de datos sobre la media de concentración de PM 2.5 y sobre la media del área resultado

Mes	Total, campos	Valor Máximo Promedio	Area resultante	Polígonos de intersección	Equipamientos
jun-22	4059	6.03	0.55	535	13
jul-22	3831	6.88	0.46	407	11
ago-22	3843	6.95	0.80	315	8
sep-22	4140	5.67	0.72	390	9
oct-22	4047	5.04	0.52	343	8
nov-22	4081	5.30	0.41	428	10
dic-22	3913	7.07	0.48	439	11
ene-23	4045	6.22	0.43	462	11
feb-23	3824	7.00	0.36	299	8
mar-23	3689	6.91	0.44	462	13
abr-23	3408	7.99	0.38	397	12
may-23	3997	11.81	0.42	182	5
jun-23	4272	11.96	0.46	439	10

Fuente: cálculos propios

6 RESULTADOS

Al depurar el panel de datos en Excel, se procedió al análisis de los datos por sensor, revelando que los sensores S01 La Cejeñita, S11 Centro RIVA y S23 Pinolinda registraron las concentraciones más elevadas de PM_{2.5}. Específicamente, el sensor S23 Pinolinda presentó una media de 11.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, superando en 6.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el límite máximo de concentración anual establecido por la OMS para material particulado. Esto indica un problema significativo de contaminación del aire por PM_{2.5} en el área monitoreada por este sensor, posiblemente atribuible a la intervención de la vía

de la doble calzada entre el centro comercial Viva La Ceja y la glorieta El Yegüerizo, realizada durante el período de análisis. La **Tabla 4** reporta los resultados.

Tabla 4. Estadística descriptiva – Datos depurados

Sensor	Horas	Tendencia Central		Dispersión		Posición			Forma			
		Media	Mediana	Varianza	Desviación	Mínimo	Cuartil ₁	Cuartil ₂	Cuartil ₃	Máximo	Asimetría	Curto
Sensor1	3078	9.16	7	57.75	7.6	0	4	7	13	68	1.89	9.34
Sensor2	366	6.72	5	44.26	6.65	1	2	5	8.75	58	2.68	14.46
Sensor3	366	4.45	3	15.44	3.93	0	2	3	6	26	2.03	8.59
Sensor4	366	6.29	5	29.36	5.42	1	3	5	8	46	2.92	16.59
Sensor5	366	4.74	4	18.04	4.25	0	2	4	6.75	31	2.16	9.84
Sensor6	366	6.5	5	50.65	7.12	0	2	5	8	66	3.92	25.59
Sensor7	366	4.75	3	24.96	5	1	2	3	6	45	4.08	26.03
Sensor8	366	6.52	5	43.26	6.58	1	3	5	8	73	4.59	37.13
Sensor9	366	5.75	4	24.39	4.94	0	2	4	8	30	1.79	7.17
Sensor10	8774	5.05	4	24.89	4.99	0	2	4	7	50	3.77	27.02
Sensor11	366	8.85	7	52.24	7.23	0	4	7	11	46	1.91	7.44
Sensor12	366	5.73	4	31.6	5.62	0	2	4	8	57	4.76	39.52
Sensor13	366	6.16	4	40.7	6.38	0	2	4	7	53	2.93	15.3
Sensor14	366	8.01	6	57.51	7.58	1	3	6	10	58	2.45	11.28
Sensor15	366	5.28	4	33.97	5.83	0	2	4	6	40	2.65	11.52
Sensor16	366	6.21	4	36.96	6.08	0	2	4	8	43	2.21	9.27
Sensor17	366	7.07	5	51.57	7.18	1	3	5	9	73	3.59	25.38
Sensor18	366	7.27	5	34.47	5.87	1	3	5	9	34	1.93	7.34
Sensor19	366	6.75	5	39.39	6.28	0	2	5	8.75	36	1.9	7.03
Sensor20	366	5.6	4	32.22	5.68	0	2	4	7	40	2.54	11.41
Sensor21	366	6.77	5	35.71	5.98	0	3	5	9	33	1.79	6.47
Sensor22	366	6.17	4	37.89	6.16	0	2	4	8	45	2.52	11.79
Sensor23	366	11.96	10	60.23	7.76	1	6	10	17	42	0.97	3.47

Fuente: cálculos propios

En cuanto a los análisis estadísticos, la media representa la concentración promedio de PM_{2.5} registrada por un sensor durante un período determinado. Según la OMS, esta concentración no debe exceder los 5 µg/m³ anuales. En este caso, solo uno de los sensores cumple con esta directriz.

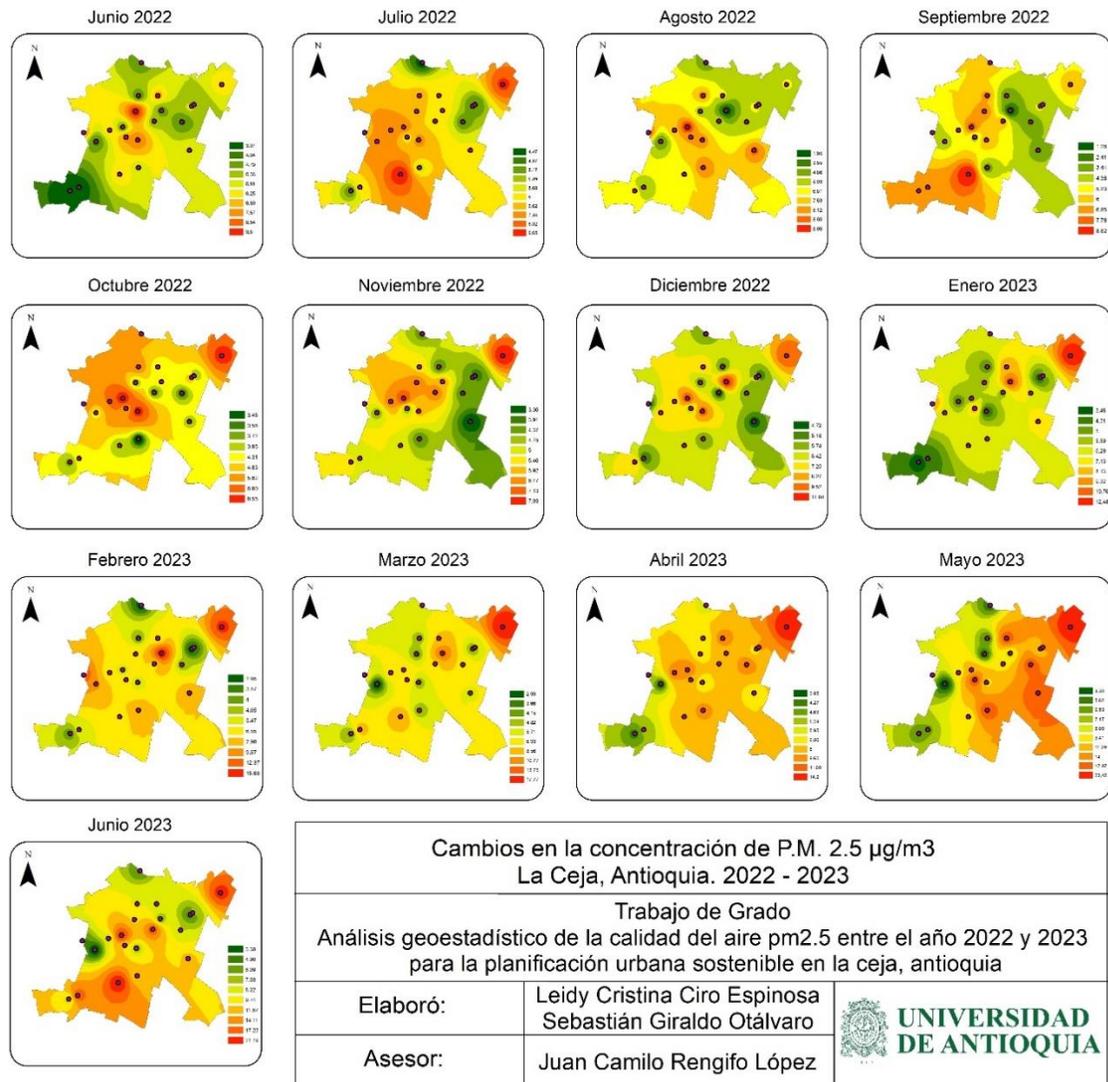
La mediana, por su parte, representa la concentración de PM_{2.5} que se encuentra en el centro de la distribución de los datos, mientras que la varianza indica la variabilidad en las concentraciones de PM_{2.5} registradas por un sensor. Una varianza alta sugiere una mayor variabilidad en la calidad del aire.

La desviación estándar proporciona una medida de la dispersión de los datos en las mismas unidades que las mediciones de PM_{2.5}. En este caso, una varianza alta indica una mayor dispersión de los valores de concentración de PM_{2.5} alrededor de la media, lo que sugiere una mayor variabilidad en la calidad del aire.

El análisis también incluye los valores mínimo y máximo de concentración de PM_{2.5} registrados por cada sensor durante el período analizado. El modelo geoestadístico y temporal utilizado permite identificar tendencias del material particulado PM_{2.5} en el municipio de La Ceja a lo largo de un

año, lo que contribuye a comprender las zonas particularmente afectadas por el cambio climático. Entre los patrones observados se destacan las concentraciones de material particulado en el centro y en la zona nororiental del municipio.

Mapa 2. Línea temporal de concentración PM 2.5 entre junio de 2022 y junio de 2023



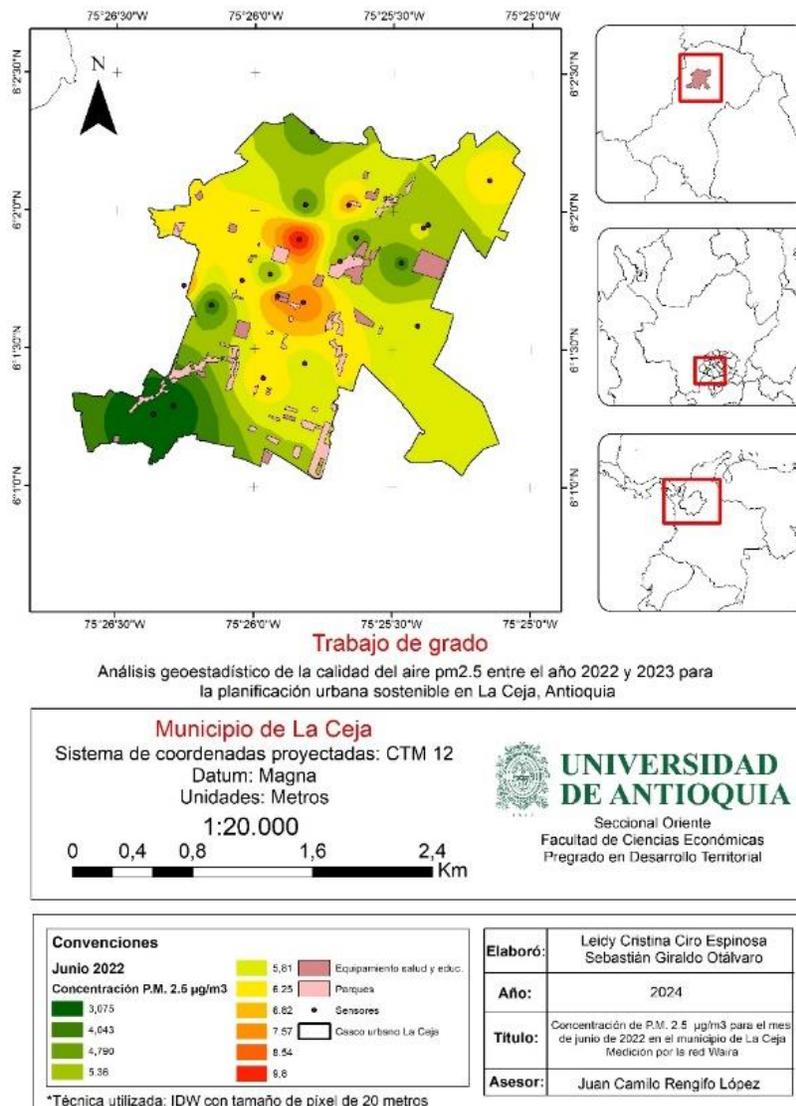
*Técnica utilizada: IDW con tamaño de píxel de 20 metros

Fuente: elaboración y cálculos propios

Los patrones de movimiento mensual de PM_{2.5} en el año de estudio muestran un comportamiento que no sigue una estacionalidad o regularidad evidente, lo que dificulta su predicción como reporta el **Mapa 2**. No obstante, se destaca un patrón de concentración en el sensor ubicado en la salida hacia Rionegro (nororiente), donde se registraron 9 de los 12 meses en niveles considerados como peligrosos debido a su alta concentración de material particulado.

Por otro lado, la espacialización de los equipamientos públicos de salud, educación y parques facilita la comprensión de la distribución de PM_{2.5} en sus alrededores como se reporta en el **Mapa 3**. Esto permite la formulación de estrategias para adaptarse a este fenómeno del cambio climático y mitigar los efectos adversos en la salud de poblaciones sensibles, como niños, niñas y adultos mayores.

Mapa 3. Concentración de PM 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mes de junio de 2022



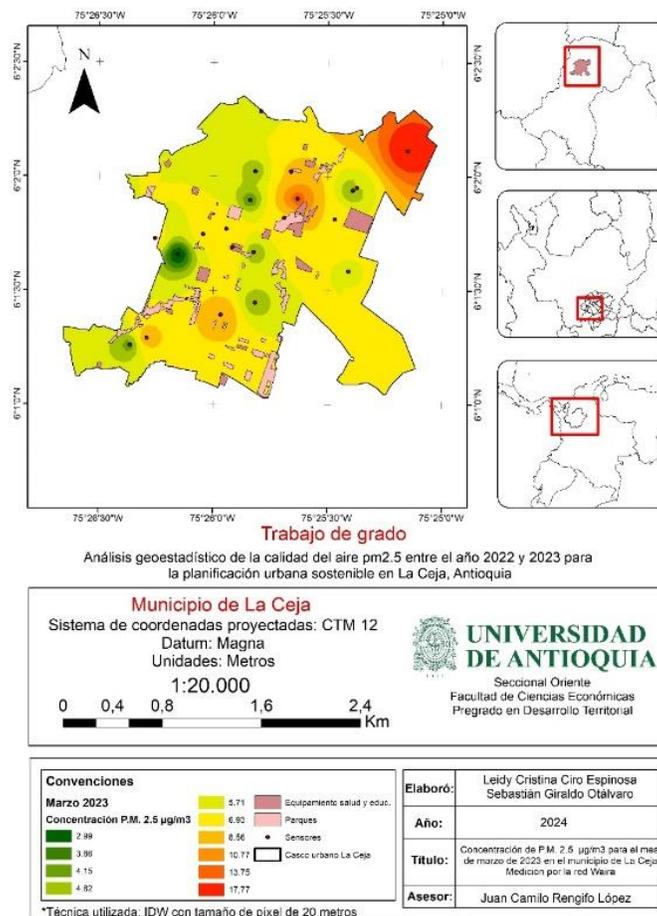
Fuente: elaboración y cálculos propios

Se observan dos concentraciones de material particulado en la zona céntrica del municipio, cerca de equipamientos de salud y el Asilo de ancianos Santa Ana, a pesar de que las concentraciones para este mes no son considerablemente altas, en el mapa 2 se identifica un patrón de concentración

alrededor de estos equipamientos, por lo que la realización de más estudios y mediciones puede favorecer a conocer y reducir los efectos en la salud de los usuarios de ambos equipamientos.

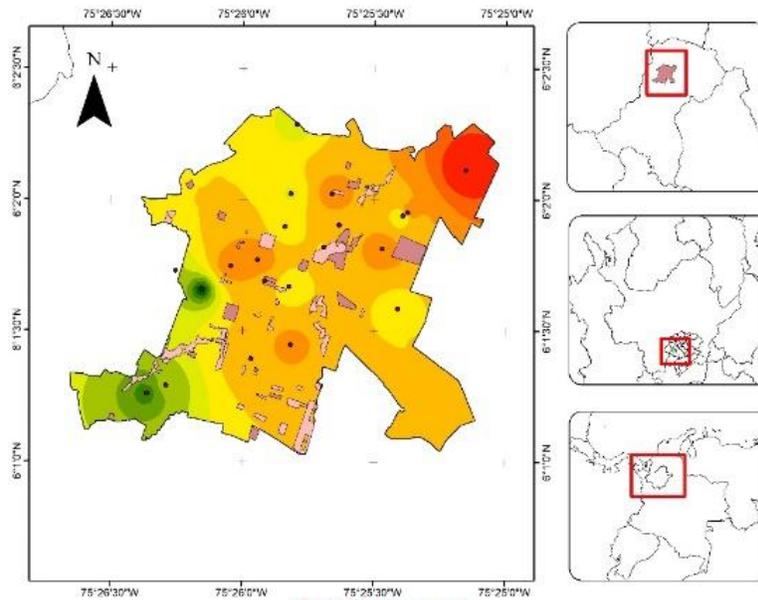
En el **Mapa 4** y **Mapa 5** se evidencia un incremento gradual en la concentración de PM_{2.5} entre los meses de marzo y abril de 2023. Los equipamientos públicos están constantemente expuestos a concentraciones de material particulado, lo que sugiere la necesidad de implementar medidas de mitigación y adaptación para reducir la exposición a contaminantes atmosféricos.

Mapa 4. Concentración de PM 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mes de marzo de 2023



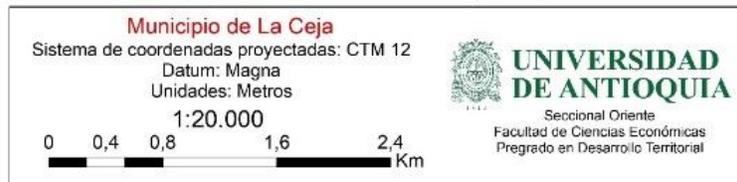
Fuente: elaboración y cálculos propios

Mapa 5. Mapa 5: Concentración de PM 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mes de abril de 2023



Trabajo de grado

Análisis geoestadístico de la calidad del aire pm2.5 entre el año 2022 y 2023 para la planificación urbana sostenible en La Ceja, Antioquia



Convenciones	
Abril 2023	
Concentración P.M. 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	<ul style="list-style-type: none"> 5.64 6.06 6.06 8.08 9.00 11.53 14.2
<ul style="list-style-type: none"> 3.95 4.27 4.69 5.24 	<ul style="list-style-type: none"> Equipamiento salud y aulas Parques Sensores Casero urbano La Ceja

*Técnica utilizada: IDW con tamaño de pixel de 20 metros

Elaboró:	Leidy Cristina Ciro Espinosa Sebastián Giraldo Otávaro
Año:	2024
Título:	Concentración de PM. 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el mes de abril de 2023 en el municipio de La Ceja Medición por la red Wairia
Asesor:	Juan Camilo Rengifo López

Fuente: elaboración y cálculos propios

7 CONCLUSIONES

Si se fortalecen y mantienen las redes de calidad del aire comunitarias, podría ser factible identificar y monitorear períodos y zonas municipales con deficiente calidad del aire. Estas áreas podrían requerir intervención por parte de la administración pública a través de planes, programas y proyectos destinados a una planificación urbana adecuada y la reducción de los impactos en la salud.

En Colombia, los niveles de PM_{2.5} superan con frecuencia las directrices de la OMS, especialmente en las áreas urbanas. Esto se atribuye a diversos factores, como el aumento en la densidad vehicular, la generación de polvo mineral proveniente de las actividades de construcción, las condiciones climáticas globales y la topografía local. En este contexto, los datos recopilados

por la red de monitoreo de calidad del aire Waira pueden ser empleados para identificar áreas con problemas de contaminación por PM_{2.5}, tomar decisiones informadas para mejorar la calidad del aire y fomentar la participación comunitaria en acciones de monitoreo y control de la contaminación.

Para abordar la problemática de los altos índices de PM_{2.5} mencionados anteriormente, el gobierno local puede tomar medidas prioritarias, comenzando por fortalecer la vigilancia y el monitoreo de la calidad del aire. Hasta el año 2024, la instalación de una primera unidad de monitoreo fue una iniciativa del gobierno local. Dada la existencia de la Red de Monitoreo Waira, este proyecto podría integrarse con las acciones de vigilancia, control y análisis de la información de los sensores. Además, la administración municipal de La Ceja debe implementar controles de emisiones para vehículos e industrias con el objetivo de mitigar el impacto y reducir los efectos a largo plazo.

Los análisis realizados revelan altas concentraciones de material particulado PM_{2.5} cerca de equipamientos públicos como el CDI Arcoiris de Sueños, el Asilo Santa Ana, el Hospital, la Plaza de Mercado y la Institución Educativa La Paz. Esta situación debe ser tomada como una alerta por la administración municipal, ya que estos son lugares de alta densidad poblacional donde los impactos negativos en la salud, como enfermedades respiratorias y cardiovasculares, podrían afectar a un número considerable de ciudadanos. Esto podría resultar en una inversión significativa por parte del Estado para abordar los problemas de salud en el futuro.

Investigar y analizar las fuentes específicas de PM_{2.5} que están contribuyendo al aumento de la concentración de material particulado permitirá a la administración municipal diseñar estrategias de control y planificación urbana más efectivas. Aunque los riesgos no pueden ser eliminados por completo, este tipo de estrategias ayudaría a mitigar el impacto actual sobre la concentración de material particulado en espacios públicos que reciben una gran afluencia de población diariamente.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Aguilo Vidal, I. (2013). *Integración de la calidad del aire en la planificación física*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Alfonso, L., Gharesifard, M., & Wehn, U. (2022). Analysing the value of environmental citizen-generated data: Complementarity and cost per observation. *Journal of Environmental Management*, 303, 114157. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114157>
- Asensio, Á., Marco, Á., Blasco, R., & Casas, R. (2014). Protocol and Architecture to Bring Things into Internet of Things. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 10(4), 158252. <https://doi.org/10.1155/2014/158252>
- Becerra Moreno, D., Ramirez Rios, L. F., Plaza Galvez, L. F., Oviedo Sanabria, C. H., & Niño Ovalles, M. V. (2021). Relación entre la calidad del aire y la incidencia de enfermedades respiratorias en las comunas 4, 6,7 y 8 del municipio de Cúcuta, Norte de Santander. *Ingeniería y Competitividad*, 23(2 SE-Artículos de investigación), e2029698. <https://doi.org/10.25100/iyc.v23i2.9698>
- Bello, O., Bustamante, A., & Pizarro, P. (2020). Planificación para la reducción del riesgo de desastres en el marco de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. *Publicación de Las Naciones Unidas*.
- Buitrago, D., & Rodríguez, R. (2022). *Estado del arte del uso de sensores de bajo costo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire por Material Particulado (PM10 y PM2 . 5) en el territorio colombiano*. Universidad de Antioquia.
- Congreso de la República. (1997). *Ley 388 de 1997 de Desarrollo Territorial*.
- Corporación Autónoma Regional CORNARE. (2020). *Plan de Acción Institucional 2020 - 2023*.
- Eslami, A., & Ghasemi, S. M. (2018). Determination of the best interpolation method in estimating the concentration of environmental air pollutants in Tehran city in 2015. *Journal of Air Pollution and Health*, 3(4 SE-Original Research). <https://doi.org/10.18502/japh.v3i4.402>
- Forrest, S. A., Holman, L., Murphy, M., & Vermaire, J. C. (2019). Citizen science sampling programs as a technique for monitoring microplastic pollution: results, lessons learned and recommendations for working with volunteers for monitoring plastic pollution in freshwater ecosystems. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(3), 172. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7297-3>

- Giraldo, R. (2002). *Introducción a la Geoestadística*. Universidad Nacional de Colombia.
- Giusto, D., Iera, A., Morabito, G., & Atzori, L. (2010). *The Internet of Things 20th Tyrrhenian Workshop on Digital Communications*. Springer.
- Hancock, P. A., & Hutchinson, M. F. (2006). Spatial interpolation of large climate data sets using bivariate thin plate smoothing splines. *Environmental Modelling & Software*, 21(12), 1684–1694. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.08.005>
- Instituto de Hidrología, Meteorología, y E. A.-I. (2012). *Índice Calidad del Aire (ICA)*.
- Londoño-Ciro, L. A., Cañón-Barriga, J. E., & Giraldo-Ocampo, J. D. (2017). Modelo de proximidad espacial para definir sitios de muestreo en redes urbanas de calidad de aire . In *Revista Facultad Nacional de Salud Pública* (Vol. 35, pp. 112–122). scieloco .
- Londoño-Ciro, L. A., Cañón-Barriga, J. E., Villada Flórez, R. D., & López Ceballos, L. Y. (2015). Caracterización espacial de PM10 en la ciudad de Medellín mediante modelos geoestadísticos. *Ingenierías USBMed*, 6(2 SE-Investigación científica y tecnológica), 26–35. <https://doi.org/10.21500/20275846.1728>
- Londoño, L., & Valdés, J. (2012). *Geoestadística aplicada: generación de mapas de interpolación para el estudio de fenómenos distribuidos espacialmente*. Editorial Académica Española.
- Lynch, K. (1959). *La imagen de la ciudad*. Traducción por Luis Revol, 2008. España.
- Molina Gómez, N. (2021). *Incidencia de la calidad del aire en el desarrollo urbano sostenible. Metodología de pronóstico basado en herramientas de aprendizaje automático*. Universitat Politècnica de València.
- Organización Mundial de la Salud. (2021). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire*.
- Romero Placeres, M., Diego Olite, F., & Álvarez Toste, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud . In *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología* (Vol. 44, p. 0). scielocu .
- Sánchez, L. (2020). *Estimación e imputación de datos faltantes mediante métodos de interpolación espacial para precipitación mensual acumulada en el departamento de Antioquia durante el periodo 2014-2018*. Universidad Santo Tomás.
- Secretaría de Ambiente de Bogotá. (2024). *Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá - RMCAB*.
- Serna, A. D. G., Duque, C. M. G., Ramírez, J. F. F., Betancourt, R. M., Riveros, J. M. R., &

Zuluaga, B. H. A. (2020). Monitoring of Fine Particulate Matter and Black Carbon, in Micro-Environments of Manizales Andean City: Pilot Study. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 20(39 SE-Articles). <https://doi.org/10.22395/rium.v20n39a8>

Universidad de Antioquia, & Gobernación de Antioquia. (2020). *Plan de Adaptación al Cambio Climático desde Salud Ambiental para Antioquia PACCSA*.

Yassi, A., Kjellström, T., Kok, T. De, & Guidotti, T. L. (2002). *Salud Ambiental Básica*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Zhang, Y., & Gu, Z. (2013). Air quality by urban design. *Nature Geoscience*, 6(7), 506. <https://doi.org/10.1038/ngeo1869>

9 ANEXOS

Tabla 5. Número total de registros

Identificador Sensor	Sector	Fecha Primera de Emisión	Registros - Horas	Registros - Días
S01	La Cejeñita	26/06/2022	3.078	128,25
S02	El Palmar	14/07/2022	366	15,25
S03	Obra Llanos de la Argentina	19/07/2022	366	15,25
S04	Hipódromo, puente	30/06/2022	366	15,25
S05	Guayacanes	30/06/2022	366	15,25
S06	Rosales	13/07/2022	366	15,25
S07	La Colina	26/06/2022	366	15,25
S08	El Triunfo	29/06/2022	366	15,25
S09	Centro - Andrea	28/06/2022	366	15,25
S10	Payuco - Divino Niño	28/06/2022	8.774	365,58
S11	Centro - Riva	28/06/2022	366	15,25
S12	Centro, Daniela Villegas	09/07/2022	366	15,25
S13	Payuco - Camilo Flórez	11/07/2022	366	15,25
S14	La Cruz	11/07/2022	366	15,25
S15	Zona rural, El Capiro	11/07/2022	366	15,25
S16	Plaza de mercado	11/07/2022	366	15,25
S17	Plaza de mercado	13/07/2022	366	15,25
S18	Asilo Santa Ana	15/07/2022	366	15,25
S19	Los Sauces	15/07/2022	366	15,25
S20	Guayacanes	16/07/2022	366	15,25
S21	San Cayetano	16/07/2022	366	15,25
S22	Mobilia	16/07/2022	366	15,25
S23	Pinolinda	04/01/2023	366	15,25

Fuente: elaboración propia

Tabla 6. Estadística descriptiva - Datos originales

Sensor	Horas	Tendencia Central		Dispersión			Posición			Forma		
		Media	Mediana	Varianza	Desviación	Mínimo	Cuartil_1	Cuartil_2	Cuartil_3	Máximo	Asimetría	Curtosis
Sensor 23	366	11,96	10	60,23	7,76	1	6	10	17	42	0,97	3,47
Sensor 1	3.078	9,29	7	79,61	8,92	0	4	7	13	192	6,13	98,5
Sensor 11	366	8,85	7	52,24	7,23	0	4	7	11	46	1,91	7,44
Sensor 2	366	8,16	5	948	30,79	1	2	5	8,75	584	17,96	336,12
Sensor 14	366	8,01	6	57,51	7,58	1	3	6	10	58	2,45	11,28
Sensor 12	366	7,47	4	940,77	30,67	0	2	4	8	570	17,14	311,72
Sensor 18	366	7,27	5	34,47	5,87	1	3	5	9	34	1,93	7,34
Sensor 8	366	7,25	5	269,34	16,41	1	3	5	8	295	15,06	260,53
Sensor 17	366	7,07	5	51,57	7,18	1	3	5	9	73	3,59	25,38
Sensor 21	366	6,77	5	35,71	5,98	0	3	5	9	33	1,79	6,47
Sensor 19	366	6,75	5	39,39	6,28	0	2	5	8,75	36	1,9	7,03
Sensor 6	366	6,5	5	50,65	7,12	0	2	5	8	66	3,92	25,59
Sensor 4	366	6,29	5	29,36	5,42	1	3	5	8	46	2,92	16,59
Sensor 16	366	6,21	4	36,96	6,08	0	2	4	8	43	2,21	9,27
Sensor 22	366	6,17	4	37,89	6,16	0	2	4	8	45	2,52	11,79
Sensor 13	366	6,16	4	40,7	6,38	0	2	4	7	53	2,93	15,3
Sensor 9	366	5,75	4	24,39	4,94	0	2	4	8	30	1,79	7,17
Sensor 20	366	5,6	4	32,22	5,68	0	2	4	7	40	2,54	11,41
Sensor 15	366	5,28	4	33,97	5,83	0	2	4	6	40	2,65	11,52
Sensor 10	8.774	5,05	4	24,89	4,99	0	2	4	7	50	3,77	27,02
Sensor 7	366	4,75	3	24,96	5	1	2	3	6	45	4,08	26,03
Sensor 5	366	4,74	4	18,04	4,25	0	2	4	6,75	31	2,16	9,84
Sensor 3	366	4,45	3	15,44	3,93	0	2	3	6	26	2,03	8,59

Fuente: elaboración propia