



Análisis de los efectos de la calidad del aire en la percepción de la salud usando una metodología de participación comunitaria. Municipio de La Ceja - Antioquia

Sandra María Echeverri García

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Gestión Ambiental

Director

Vladimir G. Toro V. Doctor (PhD) en Oceanografía Física

Codirectora

Eliana Martínez Herrera Doctora (PhD) en Epidemiología

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Gestión Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	(Echeverri-García, Toro V & Martínez Herrera, 2023)
Referencia	Echeverri-García, S.M, Toro V, V& Martínez-Herrera, E. (2023). <i>Análisis de los efectos de la calidad del aire en la percepción de la salud usando una metodología de participación comunitaria. Municipio de La Ceja - Antioquia</i> [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Maestría en Gestión Ambiental, Cohorte VIII

Grupo de Investigación Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA).



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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Luis Alejandro Fletscher Bocanegra.

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.

A mi esposo.

A mi Mamá.

A mi Papá.

A Emma y a Daniel.

Agradecimientos

A Dios por la vida, por iluminar mi camino.

A mi esposo por acompañarme en este proceso con tanta paciencia, calma y amor, por creer en mí y por animarme todos los días.

A mi Mamá por ser inspiración, por su legado de bondad, fortaleza y valentía. A mi Papá que me sigue enseñando el valor de la naturaleza y es mi mayor ejemplo de compromiso con el cuidado del planeta que habitamos.

A Laura, Andrea, Julián, Isabel y Andrés por estar pendientes, por su cariño y compañía incondicionales. A Emma y a Daniel que son una fuente constante de alegría, fuerza y vida.

A mi director Vladimir Toro y a la codirectora, Eliana Martínez Herrera por su compromiso y generosidad, por enriquecer este proceso desde lo académico y desde lo humano.

A Jaume Piera y a todo su grupo de trabajo en el Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona por mostrarme el potencial de la ciencia ciudadana y por la apertura para compartir conmigo su conocimiento y experiencia.

Al equipo de Aire Ciudadano liderado por Daniel Bernal y a la Red Multidisciplinar de Ciencia e Innovación de La Ceja por su apoyo y empeño en el establecimiento y seguimiento de la red de monitoreo. A Leidys Arroyo, Elkin Bonet y Juan Guillermo Torres por su cuidadosa asesoría.

A los ciudadanos de La Ceja que desinteresadamente y con una enorme responsabilidad y compromiso participaron en este proyecto.

A los miembros de la familia Toro Valencia por sus palabras de ánimo constantes. A los familiares y amigos que desde un lugar de amor y paciencia entendieron y respetaron mis ausencias y me acompañaron con su cariño y energía bonita en este recorrido académico.

Tabla de contenido

Resumen	16
Abstract	17
Introducción	18
1 Objetivos	21
1.1 Objetivo general	21
1.2 Objetivos específicos.....	21
2 Marco teórico	22
2.1 Salud ambiental	22
2.2 Efectos de la calidad del aire en la salud.....	23
2.3 Percepción del estado de salud como indicador de salud pública.....	25
2.4 Ciencia ciudadana en el estudio de la calidad del aire	26
3 Metodología	29
3.1 Área de estudio: La Ceja del Tambo – Antioquia.....	29
3.2 Caracterización temporal y espacial de las concentraciones de PM _{2.5} en el municipio	31
3.2.1 Monitoreo ciudadano de PM _{2.5} con dispositivos de bajo costo	31
3.2.1.1 Dispositivos de medición	33
3.2.1.2 Campañas de validación.....	35
3.2.1.3 Análisis estadístico.....	36
3.3 Percepción de salud relacionada con la calidad del aire en los habitantes del municipio....	39
3.3.1 Análisis de los resultados de las encuestas	40
3.4 Relación entre los datos medidos de PM _{2.5} y los resultados de las encuestas de percepción ciudadana de la salud.....	41
4 Resultados y discusión	43
4.1 Campaña de validación	44

4.2 Medición de concentraciones de PM _{2.5}	50
4.2.1 Análisis temporales	50
4.2.1.1 Ciclo diurno	61
4.2.1 Análisis espaciales.....	66
4.3 Resultados de las encuestas	77
4.3.1 Caracterización de la población: Encuestas iniciales.....	77
4.3.2 Encuestas finales	79
4.3.3 Percepción estado de salud y calidad del aire.....	80
4.3.4 Relación entre los datos medidos de PM _{2.5} y los resultados de las encuestas de percepción ciudadana de la salud.....	82
4.3.4.1 Participantes con dispositivos a cargo.....	82
4.3.4.2 Participantes sin dispositivos a cargo.....	83
5 Conclusiones	88
6 Recomendaciones.....	90
Referencias	91
Anexo 1	108

Lista de tablas

Tabla 1 Puntos de corte del ICA para promedios de 24 horas de PM _{2.5} (Resolución 2254 de 2017)	37
Tabla 2 Niveles máximos permisibles de PM _{2.5} establecidos por la normatividad colombiana (Resolución 2254 de 2017)	38
Tabla 3 Niveles establecidos en las directrices vigentes sobre la calidad del aire de la OMS para PM _{2.5}	38
Tabla 4 Variables incluidas en el análisis de regresión logística	42
Tabla 5 Resumen estadístico descriptivo basado en mediciones horarias de PM _{2.5} campaña de validación, junio 7 al 23 de 2022	45
Tabla 6 Resultados correlación campaña de validación implementada entre el 7 y el 23 de junio de 2022.....	46
Tabla 7 Período de medición incluido en el análisis para cada uno de los sensores instalados....	51
Tabla 8 Resumen estadístico descriptivo basado en mediciones horarias de PM _{2.5} realizadas en el municipio de La Ceja entre el 22 de diciembre de 2021 y el 1° de enero de 2023	51
Tabla 9 Promedios anuales de PM _{2.5} en el municipio de La Ceja año 2022	57
Tabla 10 Promedios y desviaciones estándar de PM _{2.5} a las 0:00, 6:00, 12:00 y 18:00 en La Ceja Antioquia entre el 22 de diciembre de 2021 y el 1° de enero de 2023.....	63
Tabla 11 Resultados de la prueba t-Student para determinar la diferencia de medias entre los sensores urbanos, el sensor rural (S15) y el sensor periurbano (S27) para el período entre las 0:00 horas del 30 de diciembre de 2022 y las 23:00 horas del 1° de enero de 2023.....	75
Tabla 12 Resumen de distribución de frecuencias encuestas iniciales de estado de salud a) Participantes con dispositivos a cargo, b) Participantes sin dispositivos a cargo	78
Tabla 13 Resumen de distribución de frecuencias encuestas finales de estado de salud participantes a) Con dispositivos a cargo, b) Sin dispositivos a cargo	79
Tabla 14 Resumen de distribución de frecuencias encuestas de percepción participantes a) Con dispositivos a cargo; b) Sin dispositivos a cargo.....	80
Tabla 15 Resultados del modelo de regresión logística que se implementó para analizar la asociación de diversos factores con la percepción de salud. Casos participantes con dispositivos a cargo	83

Tabla 16 Resultados del modelo de regresión logística que se implementó para analizar la asociación de diversos factores con la percepción de salud. Caso 1 participantes sin dispositivos a cargo84

Tabla 17 Resultados del modelo de regresión logística que se implementó para analizar la asociación de diversos factores con la percepción de salud. Caso 2 participantes sin dispositivos a cargo85

Tabla 18 Resultados del modelo de regresión logística que se implementó para analizar la asociación de diversos factores con la percepción de salud. Caso 3 participantes sin dispositivos a cargo86

Lista de figuras

Figura 1 Localización geográfica de la zona de estudio y características ambientales y poblacionales relevantes del municipio de La Ceja	30
Figura 2 a) Ubicación de sitios y sectores con alto flujo vehicular. b) Ubicación de los dispositivos instalados en el municipio de La Ceja.....	32
Figura 3 Arriba. Dispositivos utilizados y componentes electrónicos. Abajo visualización de mediciones en tiempo real en la página de Grafana.....	34
Figura 4 Principio de medición de los sensores Sensirion.....	35
Figura 5 Zonas definidas para ejecutar el caso 2 (Regresión logística participantes sin dispositivos a cargo).....	43
Figura 6 Dispositivos instalados para campaña de validación. Junio de 2022	44
Figura 7 Serie de tiempo PM _{2.5} . Datos horarios durante la campaña de validación implementada entre el 7 y el 23 de junio de 2022	45
Figura 8 Matriz de correlación campaña de validación implementada entre el 7 y el 23 de junio de 2022	47
Figura 9 Diagramas de dispersión datos horarios campaña de validación implementada entre el 7 y el 23 de junio de 2022. a) WairaS5, b) WairaS6, c) WairaS10, d) WairaS11, e) WairaS13	47
Figura 10 Serie de tiempo de promedios diarios de PM _{2.5} en el municipio de La Ceja entre el 22 de diciembre de 2021 y el 1° de enero de 2023	53
Figura 11 ICA PM _{2.5} municipio de La Ceja entre el 22 de diciembre de 2021 y el 1° de enero de 2023	55
Figura 12 Promedio mensual de PM _{2.5} en el municipio de La Ceja durante 2022	58
Figura 13 Serie de tiempo 31/12/2021 – 01/01/2022 municipio de La Ceja	59
Figura 14 Serie de tiempo 31/12/2022 – 01/01/2023 municipio de La Ceja	60
Figura 15 Evolución horaria PM _{2.5} municipio de La Ceja entre el 22 de diciembre de 2021 y el 1° de enero de 2023	62
Figura 16 Comparativo por meses de la evolución horaria de PM _{2.5} en el municipio de La Ceja durante 2022	64
Figura 17 Diferencias en los promedios diarios de PM _{2.5} según el día de la semana. La Ceja, diciembre 2021 a enero 1° de 2022.....	65

Figura 18 Mapas de calor concentraciones promedio de PM _{2.5} entre diciembre 22 de 2021 a 1° de enero de 2023. Promedios para las 0:00 horas.	66
Figura 19 Mapas de calor concentraciones promedio de PM _{2.5} para el periodo del 22 de diciembre de 2021 al 1° de enero de 2023. Promedios horarios a) 0:00, b) 6:00, c) 12:00, d) 18:00.....	67
Figura 20 Mapas de calor concentraciones de PM _{2.5} municipio de La Ceja. Promedios horarios a) 12:00 diciembre 31 2021, b) 18:00 diciembre 31 2021, c) 00:00 1° de enero 2022, d) 6:00, e) 12:00 1° de enero 2022.....	69
Figura 21 Mapas de calor concentraciones de PM _{2.5} municipio de La Ceja. Promedios horarios a) 12:00 diciembre 31 2022, b) 18:00 diciembre 31 2022, c) 00:00 1° de enero 2023, d) 6:00, e) 12:00 1° de enero 2023.....	71
Figura 22 Comparativo mapas de calor concentraciones de PM _{2.5} municipio de La Ceja. Promedios horarios: a) 12:00 y b) 18:00 diciembre 31 2022, c) 00:00, d) 6:00, e) 12:00 1° de enero 2023 f) 12:00 y g) 18:00 diciembre 31 2022, h) 00:00, i) 6:00, j) 12:00 1° de enero 2023.....	73
Figura 23 Diferencias en promedios horarios entre dispositivos de la zona urbana y el dispositivo 27 ubicado en zona periurbana (línea naranja) y el dispositivo 15 ubicado en zona rural de La Ceja (línea azul). 30 de diciembre de 2022 a 1° de enero de 2023.	74
Figura 24 Diagrama de dispersión promedios diarios sensor 18 instalado en el interior del Centro de Bienestar del Anciano y dispositivos urbanos instalados en exteriores. La Ceja, julio 15 de 2022 a enero 1° de 2023.	76
Figura 25 Diagrama de dispersión promedios diarios sensor 18 instalado en el interior del Centro de Bienestar del Anciano y dispositivo instalado en exterior más cercano (S4). La Ceja, julio 15 de 2022 a enero 1° de 2023.....	76

Lista de abreviaturas

Abreviaturas

AMVA	Área Metropolitana del Valle de Aburra
CO	Monóxido de carbono
CORNARE	Corporación Autónoma Regional de las cuencas de los ríos Negro y Nare
ENCA	Estrategia Nacional de Calidad del Aire
EPOC	Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica
ICA	Índice de Calidad del Aire
IDA	Índice de Desempeña Ambiental
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Asuntos Ambientales
IDW	Inverse Distance Weighting (distancia inversa ponderada)
LAyC	Latinoamérica y el Caribe
MSPS	Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia
NO₂	Dióxido de nitrógeno
O₃	Ozono
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud
OPS	Organización Panamericana de la Salud
OR	Odds ratio (razón de probabilidad o posibilidad)
PM_{2.5}	Material particulado de diámetro aerodinámico igual o menor a 2.5 micras
PM₁₀	Material particulado de diámetro aerodinámico igual o menor a 10 micras
SIATA	Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá
SVCA	Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire

Glosario de términos

Antropogénico

Materiales, procesos o efectos derivados de la actividad humana (Agencia Estatal de Meteorología y Oficina Española de Cambio Climático, 2018).

Ciencia ciudadana

“Participación voluntaria del público en el proceso científico para el abordaje de diferentes problemáticas, normalmente en el marco de proyectos de colaboración con científicos profesionales. Incluye la formulación de preguntas de investigación, la realización de experimentos, la recolección y el análisis de datos, la interpretación de resultados y el desarrollo de tecnologías y aplicaciones”. En los últimos años los avances en las telecomunicaciones y las redes sociales han favorecido el auge de proyectos de este tipo (Golumbic et al., 2019; San Llorente Capdevila et al., 2020; U.S. General Services Administration, 2022).

Contaminación atmosférica

“Fenómeno de acumulación o de concentración de contaminantes que se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de estas”. La presencia de estos agentes contaminantes en la atmósfera altera sus principales características (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

Contaminante

Elemento o sustancia que tiene efectos adversos en el ambiente, los recursos naturales y la salud humana. Un contaminante puede originarse en fuentes naturales y/o antropogénicas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

Contaminantes criterio

Materiales y sustancias químicas que después de su inhalación tienen efectos nocivos sobre la salud humana. En Colombia, la Resolución 2254 de 2017 estableció las concentraciones máximas permisibles de seis contaminantes criterio: Material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), ozono troposférico (O₃), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂) y monóxido de carbono (CO) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Emisión

Descarga de elementos o sustancias a la atmósfera, provenientes de cualquier fuente que potencialmente pueda producir contaminación atmosférica (Real Academia Española, 2022).

Estación fija

Dispositivo que realiza un monitoreo permanente en el sitio en el que está ubicado, lo que permite conocer las variaciones y tendencias anuales de los contaminantes (IDEAM, 2022).

Estación indicativa

Dispositivo que realiza un monitoreo por campañas (período mínimo de 18 días) para conocer las principales características de la calidad del aire (IDEAM, 2022)

Estrés oxidativo

Alteración en el equilibrio entre tasa de producción y degradación de moléculas oxidantes como resultado de reacciones metabólicas. Este desequilibrio provoca oxidación de biomoléculas inhibiendo su estructura y alterando los procesos celulares (Bello-Medina et al., 2022).

Fuentes fijas

“Son aquellas que generan emisión de contaminantes en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca de forma dispersa” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

Fuentes móviles

“Fuente de emisión que por razón de su uso o propósito es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

Indicadores de salud

“Mediciones resumidas que capturan información relevante sobre distintos atributos y dimensiones del estado de salud y del desempeño de un sistema de salud”. Lo anterior para una población específica. (OMS, 2017).

Material particulado

“Mezcla de partículas sólidas y líquidas que se encuentran en el aire. Estas partículas son el resultado de reacciones químicas complejas que ocurren en la atmósfera y están compuestas por cientos de sustancias diferentes. Su inhalación puede provocar alteraciones en el estado de salud. El material particulado es el principal indicador de la calidad del aire en zonas residenciales e industriales” (EPA, 2022; Wilches & Castillo, 2021).

Morbilidad

“Estudio de una enfermedad en una población, en el sentido de la proporción de personas que se enferman en un sitio y tiempo determinado” (Secretaría Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia, 2022).

Mortalidad

“Tasa de muertes producidas en una población durante un tiempo dado, en general o por una causa determinada” (Real Academia Española, 2022). Esta categoría de medición poblacional, junto con la natalidad y los procesos migratorios constituye uno de los pilares para el estudio de las dinámicas demográficas. Sus estadísticas permiten efectuar análisis de la situación de salud en las poblaciones (OPS & OMS, 2017).

Muerte prematura

Muerte que se produce antes de la edad promedio de muerte que corresponde a la esperanza de vida al nacer en una población determinada (Martinez et al., 2019).

Percepción de salud

Valoración individual y subjetiva que hace una persona del estado general de su salud. Es el resultado de la influencia de factores biológicos, sociales y psicológicos. Esta información permite obtener indicadores como síntomas, conductas, comportamientos, riesgos y su influencia en el bienestar (Cortese, 2018).

Salud pública

En Colombia, la ley establece “salud pública es un conjunto de políticas que busca garantizar de manera integrada, la salud de la población por medio de acciones dirigidas tanto de manera individual como colectiva ya que sus resultados se constituyen en indicadores de las condiciones de vida, bienestar y desarrollo. Dichas acciones se realizarán bajo la rectoría del Estado y deberán promover la participación responsable de todos los sectores de la comunidad” (Ministerio de Salud y de Protección Social de Colombia, 2022).

Vulnerabilidad social

Concepto multidimensional asociado a las carencias que afectan las condiciones de vida y bienestar de los individuos y que pueden tener su origen en las políticas estatales, las desigualdades, las características del territorio, el trabajo, la situación económica y las condiciones ambientales. Se relaciona principalmente con debilidades socioeconómicas o inseguridad (Díaz Puerto, 2020).

Resumen

El monitoreo de la contaminación atmosférica favorece una adecuada planificación territorial y la implementación de políticas que garanticen la salud pública. La mayoría de los municipios de Colombia, exceptuando algunas ciudades capitales, carecen de redes de monitoreo de calidad del aire que permitan tomar decisiones sobre las condiciones que podrían afectar la salud. Es el caso de La Ceja (Antioquia), que ha experimentado un acelerado incremento de la urbanización y del parque automotor con posibles efectos en la calidad del aire. Atendiendo a esta situación, se desarrolló esta investigación con el fin de obtener información indicativa sobre la contaminación atmosférica y conocer la percepción de la salud que tiene la población. Con apoyo de la ciudadanía, se instalaron 28 dispositivos de bajo costo que midieron $PM_{2.5}$ entre diciembre de 2021 y enero de 2023. Con esta información, se caracterizó temporal y espacialmente el comportamiento del $PM_{2.5}$. Para entender la percepción ciudadana, se conformaron dos grupos, unas personas a cargo de los sensores y otro grupo que no tenía acceso a la información medida, ambos diligenciaron encuestas semanales. Los resultados sugieren que la categoría predominante de calidad aire para promedios de 24 horas en el municipio es buena según la normatividad colombiana. Durante eventos como las fiestas de fin de año se observaron mayores concentraciones del contaminante, asociadas al uso de pólvora. No se evidenció asociación entre la concentración de $PM_{2.5}$ y la percepción del estado de salud. Estos resultados plantean la posibilidad que la red de calidad del aire implementada sirva como apoyo para la gestión ambiental y de salud pública en municipios como La Ceja a mediano y largo plazo.

Palabras clave: calidad del aire, percepción de salud, material particulado, ciencia ciudadana

Abstract

Air pollution monitoring favors adequate territorial planning and the implementation of policies that guarantee public health. Most of Colombia's municipalities, with the exception of some capital cities, lack air quality monitoring networks that allow decisions to be made about conditions that could affect health. This is the case of La Ceja (Antioquia), which has experienced an accelerated increase in urbanization and the number of vehicles, with possible effects on air quality. In response to this situation, this research was carried out in order to obtain indicative information on air pollution and to learn about the population's perception of health. With citizen support, 28 low-cost devices were installed to measure $PM_{2.5}$ between December 2021 and January 2023. With this information, the behavior of $PM_{2.5}$ was characterized temporally and spatially. To understand citizen perception, two groups were formed, some people in charge of the sensors and another group that did not have access to the measured information, both filled out weekly surveys. The results suggest that the predominant category of air quality for 24-hour averages in the municipality is good according to Colombian regulations. During events such as New Year's Eve celebrations, higher concentrations of the pollutant were observed, associated with the use of gunpowder. No association was found between the concentration of $PM_{2.5}$ and the perception of health status. These results raise the possibility that the implemented air quality network could serve as a support for environmental and public health management in municipalities such as La Ceja in the medium and long term.

Keywords: air quality, health perception, particulate matter, citizen science

Introducción

La contaminación atmosférica es uno de los principales retos para una adecuada salud ambiental a nivel mundial. La morbilidad asociada a la exposición al aire contaminado es comparable a la generada por factores de riesgo como el tabaquismo y la dieta malsana (OMS, 2021). En 2018 la contaminación del aire con material particulado PM_{2.5} (partículas con un diámetro $\leq 2,5\mu\text{m}$) produjo más de tres millones de muertes a nivel global y 61.600 en Suramérica (Watts et al., 2021). La aparición y agudización de condiciones como las enfermedades respiratorias agudas, la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), el asma, el cáncer de pulmón, los accidentes cerebro vasculares y la cardiopatía isquémica pueden ser atribuidas a la mala calidad del aire (Medina Palacios, 2019; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019; Prüss-Ustün et al., 2016; Represa, 2020). Por otro lado, el costo económico anual de la contaminación atmosférica es de aproximadamente 4,6 billones de dólares (Manco Perdomo & Pérez Padilla, 2020).

El desarrollo urbano acelerado y poco planificado, está asociado al incremento en la densidad poblacional. Esto genera una alta demanda de servicios públicos, transporte e infraestructura y es uno de los principales factores asociados al aumento en los niveles de PM_{2.5} y al deterioro de la calidad del aire (Cubas, 2021; Gómez Peláez et al., 2020; Liang & Gong, 2020; Molina-Gómez et al., 2021; Neria-Hernández et al., 2023; Ulloa Ninahuamán et al., 2022). Según el Informe de Calidad del Aire Global, Colombia ocupa el puesto 72 en la lista de países con peor calidad del aire. En el país, aproximadamente 8.000 muertes al año estarían relacionadas con la contaminación atmosférica (IQAir, 2021). Durante el período 2005-2019 las enfermedades crónicas de las vías respiratorias inferiores fueron la causa del 23,5% de la mortalidad general y las enfermedades del sistema respiratorio del 14,9% de las muertes en menores de cinco años (Ministerio de Salud y Protección social, 2021). De acuerdo a los más recientes “Informes del estado de la calidad del aire”, los contaminantes predominantes en el país son PM_{2.5} y PM₁₀, originados principalmente por fuentes móviles (IDEAM, 2019, 2022). Otras fuentes importantes de contaminación son las fijas, como las actividades industriales (IDEAM, 2019; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).

La Política Nacional de prevención y control de la contaminación del aire en Colombia, busca dar lineamientos que permitan mejorar la calidad del aire involucrando a las autoridades

ambientales y a los generadores de contaminantes (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Según el IDEAM (2022), en 2021 funcionaron 22 Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) que contaron con 199 estaciones de monitoreo. Estas estaciones se ubicaron en solo 77 de los 1123 municipios del país, una cobertura menor al 7%. Es necesario tener en cuenta que, 182 de estas estaciones son fijas y 17 son indicativas. Antioquia cuenta con 58 estaciones, el mayor número por departamento. Son 90 los municipios que por el tamaño poblacional y la extensión del área urbana requieren implementar un SVCA y 28 deben mejorar su capacidad instalada de monitoreo. Resalta el IDEAM que es imperativa la generación de inventarios de emisiones y el fortalecimiento del monitoreo del aire en todas las regiones de Colombia por su alta influencia en el estado de salud y en la calidad de vida de la población. Adicionalmente, la Estrategia Nacional de Calidad del Aire (ENCA) recomienda la implementación de medidas que permitan avanzar en temas de gobernanza, actualización normativa, fomento de la investigación, educación y participación ciudadana (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).

En el Valle de Aburrá, la contaminación atmosférica se ha convertido es un problema de salud pública y está asociada a la acelerada urbanización, el crecimiento poblacional, la alta demanda de transporte y las condiciones topográficas. El contaminante crítico en esta subregión del departamento son las partículas $PM_{2.5}$ (Grisales et al., 2021; Londoño Pineda & Cano, 2021).

Entre los municipios que no cuentan todavía con un sistema de monitoreo de calidad del aire y que requieren implementar un SVCA indicativo Tipo I se incluye La Ceja (Antioquia). Esta es la segunda ciudad intermedia de la subregión Oriente y en la que están ubicadas el 4,5% de las fuentes fijas de contaminantes atmosféricos de la jurisdicción de CORNARE (Valencia Zapata, 2019). La Ceja ha presentado un acelerado crecimiento urbanístico y poblacional en los últimos años, pasando de 46.268 habitantes en 2005 a 64.889 en 2020 y 70.470 en 2022 (Alcaldía de La Ceja del Tambo, 2020; Secretaría de Protección Social La Ceja, 2019; Secretaría Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia, 2023). Esto ha generado una transformación del territorio, con disminución de asentamientos en la zona rural y una expansión del espacio urbano, desencadenando una alta demanda de servicios y el aumento del parque automotor (Gómez, 2022). Las últimas administraciones municipales, con el fin de mejorar las condiciones ambientales y de salud pública, han promovido el uso de medios de transporte sostenibles como la bicicleta y la

responsabilidad ambiental del sector productivo y de la comunidad (Alcaldía de La Ceja del Tambo, 2020; Tobón Ramírez, 2020).

En términos de responsabilidad, en años recientes, la implementación de redes comunitarias ha resultado exitosa para el monitoreo ambiental, permitiendo obtener datos de procesos biológicos y atmosféricos. Prueba de ello, son redes como Mosquito Alert en Barcelona y Europa (Palmer et al., 2017a), la red de ciudadanos científicos impulsada por el Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá SIATA (SIATA, 2021) y la red de monitoreo Aire Ciudadano que cuenta con sensores en Cundinamarca, algunas ciudades de Perú y Ecuador (Aire ciudadano, 2022). Los datos y resultados obtenidos por estas redes han demostrado que una comunidad capacitada para estas actividades puede contribuir al monitoreo de condiciones ambientales.

Por otro lado, con el fin de determinar el estado de salud de las comunidades se ha usado la percepción de salud. Esta es una metodología no convencional y cada vez con mayor uso para el abordaje de problemáticas ambientales. Sin embargo, diferentes investigaciones han demostrado que resulta muy útil para promover cambios en el comportamiento humano y para orientar el establecimiento de políticas públicas (Y. H. Kim et al., 2018). Así mismo, se ha observado que el conocimiento ciudadano de la calidad del aire influye en la respuesta conductual permitiendo el reconocimiento de los riesgos que genera para la salud y favoreciendo la implementación de medidas de autocuidado (Casilimas Fajardo & Maestre Felizzola, 2017; Y. H. Kim et al., 2018; Mendoza et al., 2019; Muñoz-Pizza et al., 2020).

De acuerdo a lo mencionado anteriormente y conociendo los procesos acelerados de urbanización y posible contaminación atmosférica en La Ceja, en el marco de esta investigación se instaló un conjunto de dispositivos de bajo costo para monitorear material particulado $PM_{2.5}$ dentro de un marco de participación comunitaria. De forma simultánea, se realizaron encuestas semanales para conocer la percepción de la salud de los habitantes. Posteriormente se evaluó la relación entre los datos obtenidos en el monitoreo y la información sobre la percepción de su salud provista por los participantes.

De esta manera, esta investigación buscó dar respuesta a la pregunta: ¿Cuál es la relación entre el acceso a información de concentraciones de $PM_{2.5}$ y la percepción del estado de salud en los habitantes del municipio de La Ceja? que parte de la hipótesis que las personas que tienen información sobre la calidad del aire perciben más claramente los cambios asociados en su estado de salud.

Con los resultados que se presentan en este documento, se espera sumar evidencia a la propuesta para la formulación de políticas y estrategias municipales de prevención y control de la contaminación atmosférica.

Cabe anotar que cuando se inició este estudio y durante los primeros meses de su implementación, aún existían en el país restricciones asociadas a la pandemia de COVID-19.

Este trabajo está organizado por secciones de la siguiente manera: en la sección 1 se listan los objetivos, en la sección 2 se presenta el marco teórico, en la sección 3 la metodología y finalmente en la sección 4 los resultados y la discusión atendiendo a los objetivos específicos planteados en la investigación. Finalmente, en las secciones 5 y 6 se relacionan las conclusiones generales y recomendaciones y por último el listado de referencias que fueron revisadas durante la ejecución de esta investigación.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Determinar los efectos de la calidad del aire en la percepción ciudadana de la salud en el municipio de La Ceja - Antioquia.

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar temporal y espacialmente las concentraciones de $PM_{2.5}$ en el municipio por medio de ciencia ciudadana y medidores de bajo costo.
- Conocer la percepción de salud relacionada con la calidad del aire en los habitantes del municipio.
- Determinar la relación entre los datos medidos de $PM_{2.5}$ y los resultados de las encuestas de percepción ciudadana de la salud.

2 Marco teórico

El marco teórico se ha dividido en cuatro secciones: Salud ambiental, efectos de la calidad del aire en la salud, percepción del estado de salud como indicador de salud pública y ciencia ciudadana en el estudio de la calidad del aire. En estas secciones se presentan los conceptos relevantes, los antecedentes y estado actual del conocimiento relacionados con la temática de esta investigación.

2.1 Salud ambiental

El concepto de salud ambiental permite analizar la interacción del ser humano con los factores químicos, físicos, biológicos y sociales del medio en el que habita, promueve la evaluación y control de los factores ambientales que potencialmente pueden deteriorar las condiciones de salud de la población. La salud ambiental explora todas las prácticas de uso, manipulación, explotación y apropiación del medio ambiente, buscando que se suplan las necesidades actuales sin limitar esa posibilidad para generaciones futuras. Entre los objetivos de la salud ambiental están la evaluación y control de los factores ambientales que potencialmente puedan deteriorar las condiciones de salud de la población (WHO, 2016).

Existen factores ambientales que afectan directa o indirectamente la salud humana. Para disminuir su impacto, es necesario usar datos robustos, métricas adecuadas y un análisis exhaustivo que permita orientar la formulación e implementación de políticas públicas. En este sentido, el Índice de Desempeño Ambiental (IDA) desarrollado en la universidad de Yale, evalúa la sostenibilidad de los países, la vitalidad de sus ecosistemas y apoya los esfuerzos en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Este es un índice compuesto, centrado en los resultados de indicadores vinculados a metas políticas y que pueden seguirse en el tiempo. Tiene como objetivos disminuir las tensiones ambientales que afectan la salud humana y proteger los recursos naturales (Alcaldía de Medellín, 2018).

A nivel global, es cada vez más crítica la problemática ambiental, lo que hace necesaria la búsqueda de alternativas novedosas para su prevención y manejo y para la implementación de estrategias de solución. La contaminación atmosférica, es uno de los principales retos ambientales ya que constituye una amenaza para la salud pública mundial por sus efectos sobre la calidad de

vida. El 90% de la población mundial respira diariamente aire contaminado (English et al., 2018; Rojas et al., 2019). Para el año 2020 Colombia ocupó el puesto 60 a nivel mundial y el puesto 13 a nivel regional, en la evaluación del IDA correspondiente a la calidad del aire (Yale Center for Environmental Law & Policy, 2021).

2.2 Efectos de la calidad del aire en la salud

La contaminación atmosférica se produce por la presencia en la atmósfera de agentes polutantes que tienen un efecto nocivo sobre la salud humana y los ecosistemas. La calidad del aire es un fenómeno complejo con influencia de múltiples factores naturales y antropogénicos (Represa, 2020). Las causas más relevantes de la contaminación atmosférica son de origen antropogénico, entre las que se incluyen en zonas urbanas, el crecimiento poblacional que trae como consecuencia el incremento de la actividad industrial, del parque automotor, y el uso de calefacción doméstica. Y en zonas rurales, los incendios forestales y las quemadas a cielo abierto. Entre estos factores, los vehículos automotores de combustión fósil son la fuente que produce la mayor contaminación atmosférica a nivel mundial por su elevada emisión de dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos volátiles y partículas en suspensión (Calasans Souza, 2019; Casilimas Fajardo & Maestre Felizzola, 2017; Faccioli, 2018).

La evaluación de la calidad del aire requiere la recolección exhaustiva de datos, el análisis de los mismos y su integración con otros factores como el marco normativo, las características geomorfológicas del territorio y las condiciones climáticas. Variables meteorológicas como temperatura, lluvia y presión atmosférica tienen influencia en el transporte y concentración de los contaminantes. Las temperaturas cálidas y la alta radiación favorecen la formación de ozono. De otro lado, las concentraciones de contaminantes disminuyen con la precipitación, sin embargo, el material particulado puede aumentar con la humedad. Se reconocen dos tipos de transporte de contaminantes atmosféricos: convectivo (vertical), influenciado por la diferencia de temperatura y advectivo (horizontal) que depende de la dirección y velocidad del viento (Abel et al., 2018; Faccioli, 2018; Represa, 2020).

La calidad del aire se cuantifica por medio de la concentración de contaminantes que llegan a un receptor después de ser transportados al suponer un área de influencia. Para su monitoreo se recomienda que las mediciones se realicen con una alta frecuencia, dada la alta variabilidad que

pueden presentar los contaminantes en la atmósfera. Los valores medidos permiten determinar si el área es segura para el desarrollo de actividades humanas y para los ecosistemas. Con este fin se establecen márgenes de confianza por medio de los límites máximos aceptables. En Colombia, se utiliza el Índice de Calidad del Aire -ICA- el cual hace seguimiento a seis contaminantes: Material particulado menor a 10 micrómetros (PM_{10}), material particulado menor a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), monóxido de carbono (CO), ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2) y dióxido de nitrógeno (NO_2). La resolución 2254 de 2017 establece los niveles máximos permisibles de cada uno de estos contaminantes y determina que deben evaluarse individualmente en cada punto de monitoreo. Entre estos contaminantes, el $PM_{2.5}$ resultante principalmente de emisiones del parque automotor, la combustión de diésel, la construcción y la quema de biomasa es considerado uno de los más nocivos para la salud humana. Debido a su estructura compleja que puede incluir metales pesados, carbono negro, hidrocarburos aromáticos policíclicos y sulfatos y a su reducido tamaño, puede ingresar y depositarse en el torrente sanguíneo y en los alvéolos pulmonares (Hernández López. & Baloco Vega, 2019; IQAir, 2021; Represa, 2020).

Por otra parte, los niveles más altos de emisiones vehiculares se producen en momentos en los que los vehículos están en condiciones de no marcha -vehículo detenido- o marcha irregular -vehículo frena, gira, se detiene bruscamente- que son comunes durante episodios de congestión vehicular o debido al mal estado de la malla vial (Rojas et al., 2019). Los niveles máximos permisibles de $PM_{2.5}$ en el país son $25\mu g/m^3$ para el promedio anual y de $37\mu g/m^3$ para los promedios de 24 horas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). Las ciudades capitales con mayores niveles de contaminación atmosférica en el país son Bogotá y Medellín, en las que la mala calidad del aire tiene una relación con los índices de morbilidad y mortalidad (Aguilar Gil & Correa Ochoa, 2020; IDEAM, 2022; Rodríguez-Villamizar et al., 2018).

La exposición prolongada al aire contaminado induce estrés oxidativo, aumento de la respuesta inflamatoria e irregularidades en el metabolismo de las proteínas a nivel tisular. Estas alteraciones generan efectos sobre la salud humana que desencadenan: enfermedades respiratorias agudas, EPOC, asma, cáncer de pulmón, enfermedades cardíacas, vasculares y neurológicas, irritación ocular y de la piel (Casilimas Fajardo & Maestre Felizzola, 2017). Algunas de estas enfermedades son prevenibles y se inician de forma subclínica, siendo los menores de cinco años y los mayores de 60 años las personas con mayor vulnerabilidad, aunque en general todos los grupos de edad están en riesgo (Represa, 2020). Asociados a esta contaminación, se han

evidenciado efectos adversos preconceptionales, bajo peso al nacer, parto prematuro, aumento en la morbimortalidad perinatal y muerte prematura y desórdenes del neurodesarrollo (Khilnani & Tiwari, 2018; Ortega-García et al., 2018; Zhang et al., 2017; Zhou et al., 2020).

Existen evidencias de una fuerte asociación entre la exposición a altos niveles de ruido y contaminación atmosférica con el riesgo de disminución en la función cognitiva (Hankey & Marshall, 2017). Se ha demostrado que la exposición frecuente a PM_{2.5}, aún a bajos niveles, genera trastornos cardiovasculares y en algunos casos la muerte debido a que por su tamaño reducido las partículas ingresan y se depositan con facilidad en los tejidos (Papadogeorgou et al., 2019). El monóxido de carbono (CO) interfiere en el metabolismo del oxígeno. Al llegar al alvéolo pulmonar sufre una combinación irreversible con la hemoglobina formando carboxihemoglobina, un compuesto que disminuye la capacidad de transporte de oxígeno a nivel sanguíneo. Por esta razón, la exposición a altos niveles de CO puede provocar cefalea, náuseas, dificultades de percepción, somnolencia y ataques cardíacos (Calasans Souza, 2019).

Por lo tanto, la cercanía a las fuentes emisoras de contaminantes, la densidad poblacional y el grado de urbanización determinan el comportamiento epidemiológico de las enfermedades asociadas a la contaminación atmosférica. Todas estas enfermedades tienen un fuerte impacto a nivel socioeconómico, generan ausentismo estudiantil y laboral, disminución de productividad y altos costos para el sistema de salud (Faccioli, 2018; Molina-Gómez et al., 2021).

2.3 Percepción del estado de salud como indicador de salud pública

La percepción del estado de salud, riesgo y bienestar es un indicador que puede ser utilizado para evaluar la salud poblacional (Mendoza et al., 2019; Razo González et al., 2018). Esta percepción está influenciada por factores demográficos, socioeconómicos y culturales (Assari & Lankarani, 2015; Muñoz-Pizza et al., 2020; Razo González et al., 2018). La percepción del estado de salud no se considera una metodología convencional para el estudio de problemas ambientales pero diferentes investigaciones han demostrado que resulta muy útil para orientar la toma de decisiones por parte de instituciones públicas y para promover cambios en el comportamiento ciudadano (Mendoza et al., 2019; Rodríguez Hernández et al., 2018).

En México, se han realizado varias investigaciones usando este enfoque, una de ellas desarrollada en 2016 permitió identificar las diferencias en la percepción de salud en diversos

grupos etarios y concluyó que a medida que aumenta la edad y se han tenido más enfermedades, hay una percepción más negativa del estado de salud (Razo González et al., 2018). Otro estudio desarrollado en Mexicali confirmó que la cercanía a fuentes fijas de contaminación atmosférica está asociada a una mala percepción de la calidad del aire y que es común el desconocimiento de la población de los efectos crónicos que sobre la salud tiene la mala calidad del aire, principalmente en comunidades con alta vulnerabilidad social (Muñoz-Pizza et al., 2020). En Chile, uno de los países con mayores índices de contaminación urbana en Latinoamérica y el Caribe (LAyC), se utilizó la perspectiva de la satisfacción vital para identificar el impacto de la calidad del aire en el bienestar de la población. Este estudio logró demostrar que los altos niveles de contaminantes en el aire disminuyen la percepción de bienestar que tienen los ciudadanos (Mendoza et al., 2019). Investigadores europeos y asiáticos han desarrollado estudios para evaluar la relación entre los niveles de contaminantes atmosféricos (PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_x) y la percepción del riesgo para la salud que tienen los habitantes de diferentes ciudades, concluyendo que la exposición a una deficiente calidad del aire aumenta la percepción de los síntomas y el reconocimiento de los riesgos asociados para la salud (Bergstra et al., 2018; Dong et al., 2019; Gao et al., 2017; Orru et al., 2018).

Con el fin de evaluar la asociación entre la percepción ciudadana y los niveles de contaminantes del aire, se ha reportado el uso de modelos empíricos, técnicas estadísticas y la inclusión de variables demográficas, geográficas, socioeconómicas, meteorológicas en el análisis (Muñoz-Pizza et al., 2020). Entre los métodos estadísticos utilizados, se destacan: a) la regresión lineal múltiple (Reames & Bravo, 2019); b) la regresión logística (Bergstra et al., 2018; Muñoz-Pizza et al., 2020); c) la evaluación cuantitativa a partir de datos obtenidos de búsquedas en internet y de resultados de modelos empíricos que simulan el índice de percepción de la calidad del aire (Ryu & Min, 2020); d) los modelos vectoriales auto regresivos (Dong et al., 2019); e) los modelos econométricos que usan mínimos cuadrados ordinarios y probit ordenado para incluir en el análisis la satisfacción vital (Mendoza et al., 2019).

2.4 Ciencia ciudadana en el estudio de la calidad del aire

El monitoreo ambiental comunitario promueve el seguimiento y la gestión adecuada de los recursos naturales, así como el reconocimiento de su impacto en el bienestar social e individual (Enda América Latina, 2017). Es un proceso de colaboración que permite medir y analizar datos,

identificar problemáticas y posteriormente comunicar los principales resultados. Las redes comunitarias de monitoreo favorecen el beneficio común, la responsabilidad y el aprendizaje e involucran la dimensión científica, social, política y cultural (Zuluaga & Perea, 2020). La participación comunitaria promueve mejores relaciones entre la población, las administraciones locales y la academia. Adicionalmente, permite el fortalecimiento de capacidades técnicas y científicas en las comunidades y mejora el conocimiento de su entorno (den Broeder et al., 2017).

La ciencia ciudadana es una estrategia emergente, que usa tecnologías móviles y plataformas Web para fomentar la participación de la ciudadanía en la medición de datos ambientales. La ciencia ciudadana favorece la integración de múltiples conocimientos, intereses y experiencias, permite el acercamiento a situaciones complejas y promueve el fortalecimiento de capacidades de la población involucrada (Fritz et al., 2019). Con la combinación de datos medidos en estaciones convencionales científicas y de datos obtenidos con ciencia ciudadana, es posible consolidar resultados de utilidad para las comunidades y los científicos (Bartumeus et al., 2018; Palmer et al., 2017b).

Reconociendo la influencia de la contaminación atmosférica en la salud y el bienestar, se han propuesto diferentes estrategias a nivel internacional que promueven el acceso en tiempo real a información medida por estaciones convencionales y de bajo costo con participación ciudadana. Es el caso de Inglaterra donde se ha implementado el envío de alertas vía mensaje de texto a la población cuando la calidad del aire disminuye recomendando cambios inmediatos de actividades y/o conductas (D'Antoni et al., 2019). Es frecuente también el uso de aplicativos para dispositivos móviles que proporcionan información en tiempo real de la calidad del aire y los posibles efectos en la salud del aire contaminado. En Bogotá, se diseñó la aplicación Geo Visor Web Adaptativo el cual permite a la ciudadanía el acceso y comprensión de la información sobre la calidad del aire proporcionada por el Observatorio Ambiental (Casilimas Fajardo & Maestre Felizzola, 2017).

Por otro lado, usando avances tecnológicos y científicos se han desarrollado desde 2013 dispositivos de bajo costo para el monitoreo de la contaminación atmosférica (material particulado y gases). Las principales ventajas de estos medidores en relación con las estaciones certificadas son además del menor precio, su reducido tamaño que favorece su instalación y los bajos costos de operación y mantenimiento. Estos sensores están conectados con servidores y plataformas web que permiten la integración de los datos generados ofreciendo información a una escala espacial y temporal fina en tiempo real que es complementaria a las estaciones convencionales. Algunas

desventajas de estos dispositivos son la ausencia de estandarización en sus principios de diseño y funcionamiento, y en algunos casos la falta de métodos de calibración y validación de la información que generan (García Navarrete & Rico Soto, 2020; Ochoa Duarte et al., 2018; Roncancio, 2019; Scagliotti & Jorge, 2022; Ulloa Ninahuamán et al., 2022).

Los sensores de bajo costo disponibles a nivel comercial para el monitoreo de material particulado pueden clasificarse de acuerdo a sus principios de operación en tres tipos:

- Ópticos: Utilizan un haz de luz u otras ondas electromagnéticas que interactúan con las partículas químicas de interés. Algunas marcas comerciales son: Clarity, PurpleAir, NuboAir, Modulair-PM y Aire Ciudadano.
- Electroquímicos: Son usados principalmente para la caracterización de contaminantes gaseosos. Utilizan una reacción química entre los gases atmosféricos y el electrodo en un líquido en el interior del sensor. Son dispositivos con alta sensibilidad a las variaciones de temperatura y humedad. Entre las marcas comerciales disponibles están: AQMesh, Aeroqual y α Sense (García Navarrete & Rico Soto, 2020; Liu et al., 2019; Pinzón et al., 2023; Roncancio, 2019).
- De foto-ionización: Estos sensores usan un detector de foto-ionización, que ioniza los compuestos orgánicos volátiles del ambiente y mide la corriente eléctrica resultante. Se encuentran en el mercado sensores de este tipo de las marcas: NEO y Ametek.

Aire Ciudadano es una iniciativa de ciencia ciudadana que en Cundinamarca y otros lugares de LAYC realiza el monitoreo de la calidad del aire usando dispositivos de bajo costo para medir PM_{2.5} (Aire ciudadano, 2022). En el área metropolitana del Valle de Aburrá, el programa Ciudadanos Científicos, actualmente en su tercera fase, cuenta con la participación de cerca de 400 ciudadanos voluntarios que en sus domicilios o bicicletas realizan mediciones de PM_{2.5}, temperatura, humedad y ruido ambiental. Los datos resultantes de este monitoreo son recopilados y analizados permitiendo obtener un panorama de la distribución de estos contaminantes en el territorio y son accesibles en tiempo real desde la página web del SIATA (SIATA, 2021).

Finalmente, el más reciente informe de calidad del aire global (2021) evidencia un aumento del 50% en la disponibilidad de datos de calidad del aire en tiempo real en LAYC. Este reporte resalta que el 55% de las nuevas estaciones en la región son operadas por organizaciones locales sin ánimo de lucro y ciudadanos científicos. Es así como Chile (51%), Colombia (38%) y México

(28%) son los países con mayor incremento en el número de estaciones de vigilancia en el período 2020 – 2021.

3 Metodología

Se propuso un estudio no experimental mixto en el cual las observaciones se analizaron como se dieron naturalmente en su medio. En este sentido, la participación comunitaria se constituyó en un elemento clave para la implementación y sostenibilidad del monitoreo de la calidad del aire planteado.

3.1 Área de estudio: La Ceja del Tambo – Antioquia

La Ceja es un municipio del departamento de Antioquia (Colombia) ubicado en la subregión Oriente a 50 kilómetros del Valle de Aburrá. Tiene valores promedios de altitud de 2143 m.s.n.m, temperatura de 18 °C y una precipitación anual de 2000 mm. El 84% de los habitantes está ubicado en el área urbana, la cual tiene una densidad poblacional de 484 habitantes/km² (Figura 1). El 21% de la población es menor de 5 años y mayor de 60 años, siendo estos grupos de edad los que tienen una alta vulnerabilidad a las enfermedades (Secretaría de Protección Social La Ceja, 2019). La principal actividad económica en el municipio desde hace 20 años es la floricultura a gran escala. Otras industrias son las empresas transformadoras de madera, productoras de cerrajería, baldosas y papel, así como los talleres de confecciones. Los primeros renglones de producción agrícola son los cultivos de tomate de árbol, mora, papa, fríjol, café y la ganadería lechera (Alcaldía de La Ceja del Tambo, 2020). La ubicación estratégica del municipio y su cercanía al aeropuerto internacional José María Córdova y a Medellín, han generado en la última década un incremento poblacional y un acelerado crecimiento urbanístico. Esto se ha reflejado en una alta presión por servicios públicos, acceso a salud, educación y vivienda (Tobón Ramírez, 2020).

Figura 1

Localización geográfica de la zona de estudio y características ambientales y poblacionales relevantes del municipio de La Ceja



Nota. Fuente Adaptación de imagen tomada de Wikimedia Commons (2010)

En La Ceja son comunes enfermedades que pueden estar asociadas a la mala calidad del aire como infecciones respiratorias y cardiopatías. La primera causa de mortalidad son las enfermedades del sistema circulatorio con 194 muertes por cada 100.000 habitantes, siendo la enfermedad isquémica del corazón la más frecuente. Las enfermedades transmisibles son la cuarta causa de mortalidad, con 39 muertes por cada 100.000 habitantes, las más frecuentes en este grupo de enfermedades son las infecciones respiratorias agudas. La principal causa de morbilidad en la infancia son las infecciones respiratorias (55,3%) (Secretaría de Protección Social La Ceja, 2019).

La expansión urbanística, el crecimiento poblacional y la ubicación del municipio en un territorio con un proceso de urbanización y crecimiento comercial acelerado, han generado en los últimos años aumento en el tránsito vehicular y el posible deterioro de la calidad del aire en el municipio. La Ceja cuenta con una malla vial de 77.472 metros lineales, de los cuales 1.888 se encuentran en mal estado lo que genera retrasos en el tráfico que pueden contribuir al deterioro de la calidad del aire. Es de notar que el número de vehículos matriculados al año 2020 en el municipio fue de 20.969 (Alcaldía de La Ceja del Tambo, 2020; MiOriente, 2019; Orientese.co, 2019).

3.2 Caracterización temporal y espacial de las concentraciones de PM_{2.5} en el municipio

3.2.1 Monitoreo ciudadano de PM_{2.5} con dispositivos de bajo costo

Con esta investigación se implementó el primer conjunto de dispositivos para monitoreo de la calidad del aire en La Ceja. Este es un estudio pionero que permite un acercamiento a las condiciones de contaminación atmosférica en el municipio (MiOriente, 2018; Tobón Ramírez, 2020) y potencialmente demostrativo para otros con condiciones similares en Colombia. De esta manera se definieron 28 puntos fijos de monitoreo los cuales se ubicaron principalmente en la zona urbana y se contó con uno en la zona rural.

La selección de los puntos de medición se realizó en función de las actividades sociales y económicas que se desarrollan en el municipio. De esta manera se identificaron sectores residenciales y de expansión urbana, instituciones educativas y las principales vías de transporte del municipio. Se consideraron como zonas con riesgo alto de contaminación, aquellas en las que el tráfico de vehículos es constante y sectores con una clara vocación comercial, industrial y de servicios. Así como zonas con un riesgo moderado los barrios residenciales y sectores de expansión urbanística cercanos a las zonas de riesgo alto y zonas de riesgo bajo las ubicadas en el sector rural.

En la zona urbana se instalaron sensores en áreas que se caracterizan por su alto y constante flujo vehicular y/o actividad industrial o comercial (alrededores de la Central Integrada de transporte, la plaza de mercado e instituciones educativas, vías de ingreso y salida a ciudades vecinas, parque principal, entre otros). Se ubicaron también algunos sensores en sitios con una exposición media/baja a fuentes de contaminación, como algunos sectores residenciales. Adicionalmente, se incluyó un dispositivo ubicado en el área rural (Vereda El Capiro) con pocas o nulas fuentes cercanas de contaminación (Figura 2).

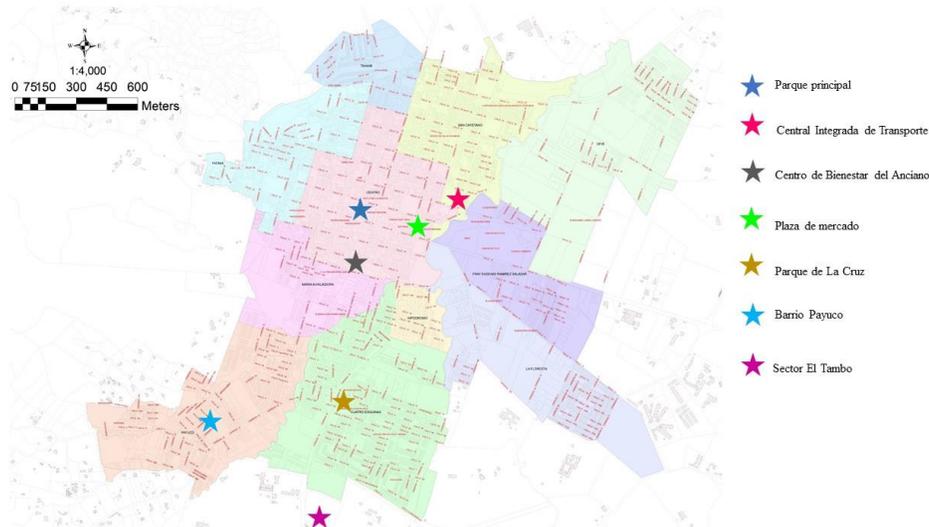
A cargo de los sensores estuvieron personas mayores de edad residentes permanentes del municipio de La Ceja. Para esto se publicó una convocatoria en redes sociales buscando voluntarios para participar en esta investigación. Del listado de inscritos se escogieron 44 personas. Se conformaron dos grupos, el primero, aquellos que por razones laborales o académicas no permanecen todo el día en sus hogares (este grupo de personas no tuvo sensores a su cargo). Se incluyó este grupo con el fin de identificar diferencias en la percepción, asociadas al acceso a los datos medidos de PM_{2.5}.

El otro grupo de personas estuvo conformado por aquellos que permanecían el mayor tiempo en sus hogares (en sus residencias se instalaron los sensores buscando garantizar que en lo posible estuvieran pendientes de interrupciones en los servicios de electricidad e internet que comprometieran la continuidad de la serie de datos). En este grupo se tuvieron en cuenta, entre otros, la ubicación de la vivienda respecto a condiciones de alta/baja movilidad vehicular. Adicionalmente, considerando que los efectos nocivos sobre la salud del $PM_{2.5}$, dependen de la edad, se incluyeron en el estudio personas mayores de 18 años en diferentes intervalos de edad: entre 18 y 25 años, entre 26 y 40 años, entre 41 y 60 años y mayores de 61 años.

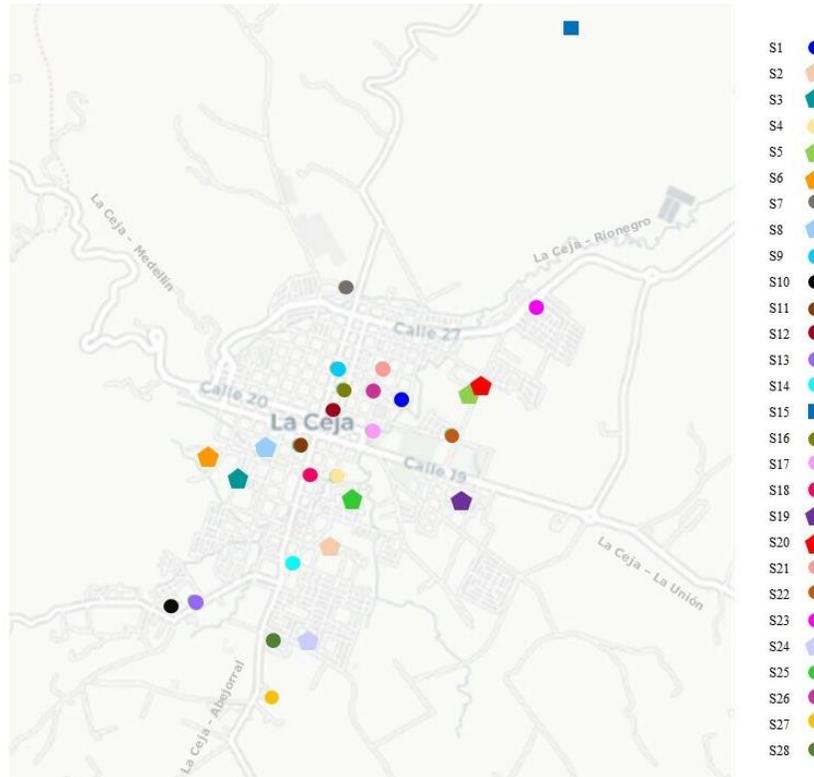
Se utilizó un conjunto de 28 dispositivos fijos de bajo costo para el monitoreo ciudadano de $PM_{2.5}$. Es importante mencionar que inicialmente se instalaron 5 de los 28 sensores y que los 23 restantes (por temas de financiamiento) se pusieron en funcionamiento posteriormente, entre los meses de marzo y noviembre de 2022. La red de monitoreo se denominó WAIRA, vocablo quechua que significa aire. En el análisis, se incluyeron los datos medidos entre las 0:00 horas del 22 de diciembre de 2021 y las 23:00 horas del 1° de enero de 2023.

Figura 2

a) Ubicación de sitios y sectores con alto flujo vehicular en la zona urbana. b) Ubicación de los dispositivos instalados en el municipio de La Ceja. Los círculos representan los sensores ubicados en zonas de alto riesgo de contaminación atmosférica, los pentágonos los sensores ubicados en zonas de riesgo moderado y los rectángulos los sensores ubicados en zonas de bajo riesgo



a)



b)

Nota. Fuente a) Adaptación de imagen Alcaldía de La Ceja (2019).

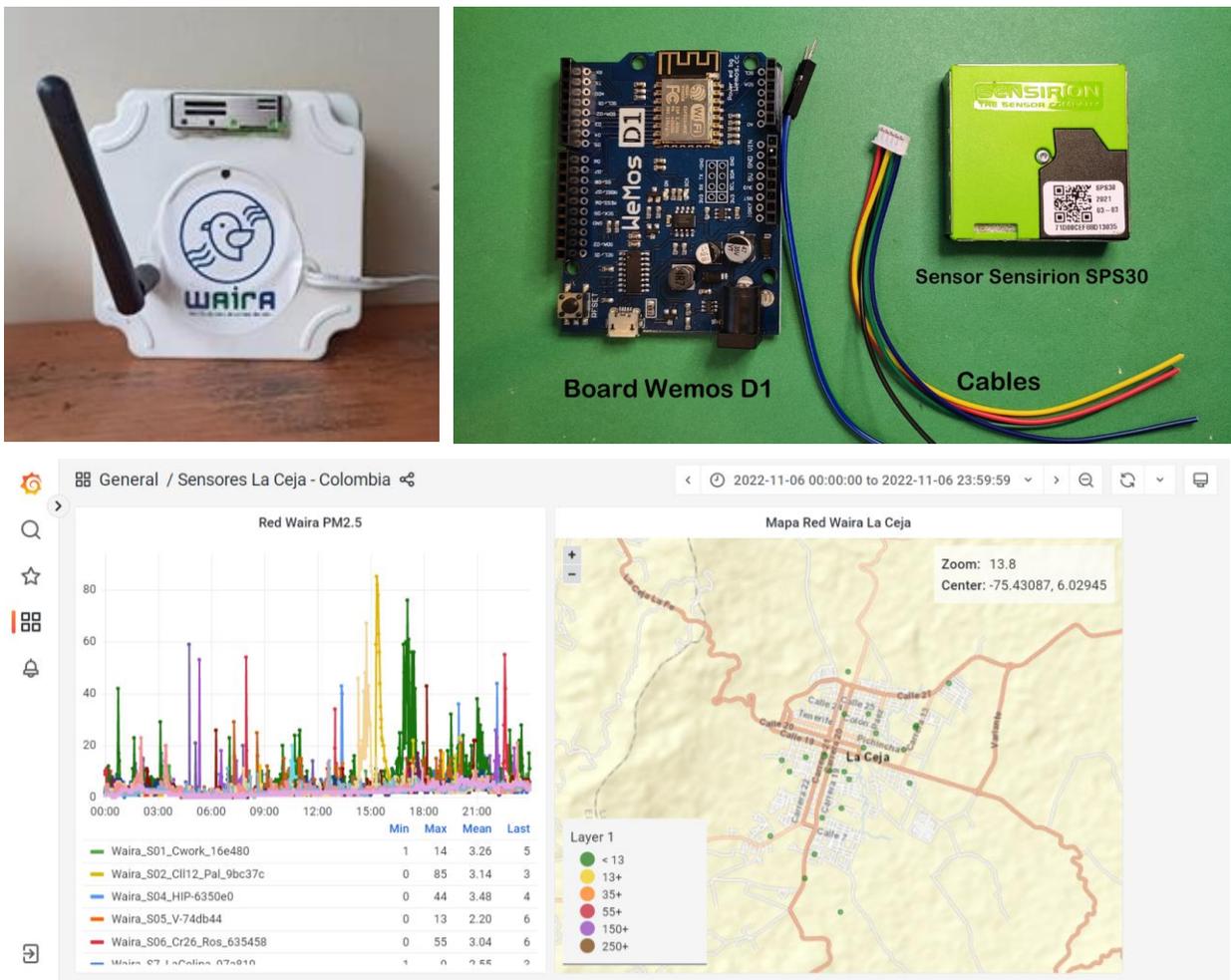
3.2.1.1 Dispositivos de medición

Los medidores utilizados para el monitoreo fueron diseñados y construidos en Colombia por Aire Ciudadano (<https://aireciudadano.com/>), un proyecto de ciencia ciudadana que cuenta con dispositivos móviles y fijos para la medición de $PM_{2.5}$, temperatura y humedad (Aire ciudadano, 2022). Se seleccionaron estos medidores porque además de su bajo costo y de ser ensamblados en Colombia, cuentan con un excelente servicio de asesoría, garantía, reparación y mantenimiento y de despliegue en tiempo real de los datos. Los dispositivos tienen una arquitectura de código abierto y vía Wi-Fi se conectan y envían los datos en tiempo real a una página web en la que se pueden almacenar, visualizar y descargar los datos cuantitativos medidos de $PM_{2.5}$, temperatura y humedad (<https://sensor.aireciudadano.com/d/xTDbNb87z/general?orgId=1&refresh=1m>) (Figura 3). Es de notar que en esta investigación solo se analizaron los datos de material particulado ($PM_{2.5}$)

considerando que después de realizar análisis a los datos medidos de humedad y temperatura, se observaron inconsistencias en las mediciones realizadas debido probablemente al inadecuado funcionamiento de los sensores de estas variables.

Figura 3

Arriba. Dispositivos utilizados y componentes electrónicos. Abajo visualización de mediciones en tiempo real en la página de Grafana.

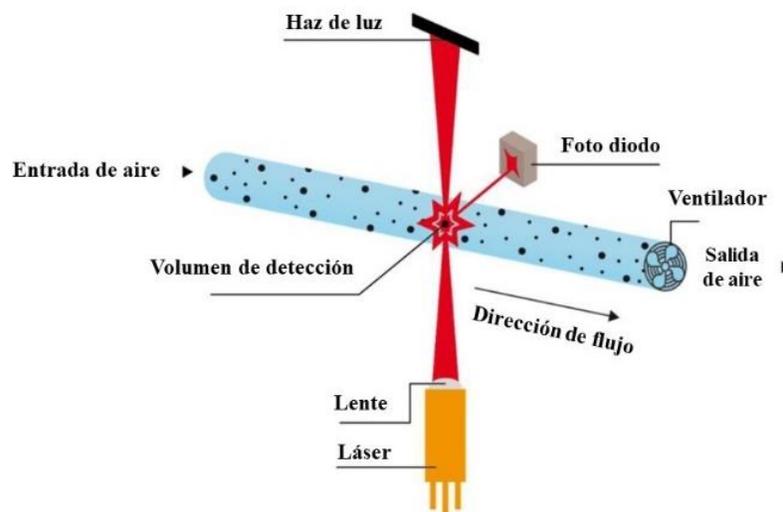


Los dispositivos cuentan con un sensor óptico tipo Sensirion SPS30 para la medición de PM_{2.5}. Los sensores Sensirion tienen certificación de calidad MCERTS y cuentan con un sistema óptico de partículas basados en dispersión láser que generan un tiempo de respuesta rápido, lo que favorece su desempeño y la confiabilidad de los datos. Las partículas suspendidas son guiadas al interior del dispositivo hasta una celda de medición formada por una fuente de luz y un fotodetector,

después de la interacción entre las partículas y la luz una parte de la luz se dispersa hacia el fotodetector. La señal recibida se convierte en valores de recuento de partículas y concentración de masa en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 4) (Sensirion, 2020). Los dispositivos tienen una antena externa de Wi-Fi y funcionan con conexión a la energía eléctrica. Se instalaron a alturas entre los 2.50 y los 3.50 m. Un total de 27 dispositivos se ubicaron en exteriores (ventanas, corredores y balcones) y solo 1 sensor se ubicó en uno de los corredores interiores que rodean el patio central del Centro de Bienestar del Anciano del municipio localizado en una vía con alto tráfico vehicular. Los datos fueron compilados en series temporales horarias.

Figura 4

Principio de medición de los sensores Sensirion



Nota. Fuente (Sensirion, 2020).

3.2.1.2 Campañas de validación

Con el fin de evaluar el adecuado funcionamiento de los dispositivos de bajo costo, se realizaron dos campañas de medición en las que se evaluaron los requerimientos de conexión e instalación para su correcta operación. La primera de ellas el 30 y 31 de mayo de 2021 en donde se seleccionaron al azar dos dispositivos y se hicieron mediciones simultáneas de 48 horas en el sector San Cayetano. La segunda, entre el 7 y el 23 de junio de 2022. Es importante aclarar que la

duración de esta última campaña y el número de sensores usados se definieron con base en la autorización de la institución encargada del mantenimiento de la estación de referencia. Dicha institución limitó el espacio disponible para la instalación, la cantidad de datos transmitidos y definió la fecha de finalización de la campaña (23 de junio) debido a la expiración del contrato de mantenimiento, lo que impidió extender las mediciones por un período de tiempo mayor. Para esta campaña, siete dispositivos fueron escogidos aleatoriamente e instalados y puestos en funcionamiento de manera simultánea junto a una estación de monitoreo convencional. Esta estación cuenta con un monitor de partículas Teledyne T640 que utiliza espectrometría de luz difusa para la medición de concentraciones de $PM_{2.5}$. Esta metodología de validación/comparación, con algunas variaciones en la duración del período de mediciones simultáneas – que van desde dos semanas y hasta cuatro meses –, se ha utilizado en algunos estudios implementados previamente en Colombia (Gamba Gallego, 2022; Roncancio, 2019). Al finalizar la campaña, se compararon los datos horarios de $PM_{2.5}$ medidos por los dispositivos y por la estación de referencia por medio de un análisis estadístico que incluyó la generación de gráficos de dispersión y de series de tiempo. En estos análisis no se incluyó la comparación de temperatura y humedad debido a que no se contó con datos medidos de una estación cercana.

3.2.1.3 Análisis estadístico

Revisión preliminar y preprocesamiento de los datos

Se descargaron desde la plataforma de Aire Ciudadano datos horarios de $PM_{2.5}$. Las series temporales medidas por los 28 dispositivos se recopilaron en una base de datos. El propósito de esta fase inicial de revisión fue asegurar la calidad de los datos garantizando un proceso exitoso de análisis y posterior interpretación de los resultados.

Se realizó una selección de los datos después de identificar el ruido (valores atípicos o errores aleatorios) que podían indicar errores del sensor de $PM_{2.5}$ o de registro o envío de los mismos. De esta manera se tuvo en cuenta que el sensor tiene un intervalo de medición de 0 a $1000\mu\text{g}/\text{m}^3$ y para garantizar la calidad de los resultados se eliminaron los datos que se encontraban por fuera de este, probablemente resultantes de errores en el registro o fallas en el funcionamiento de los dispositivos.

Estadística descriptiva con datos

Con los datos resultantes del preprocesamiento mencionado, se determinaron las concentraciones medias diarias, semanales, mensuales y anuales de $PM_{2.5}$ para cada punto de monitoreo y se calculó el Índice de Calidad del Aire (ICA). Para el cálculo de los promedios (anual, mensual, semanal, diaria), solo se consideraron las estaciones que contaban con un porcentaje de datos válidos mayor o igual al 75% para la escala analizada.

El valor del ICA permite identificar el estado de la calidad del aire de acuerdo a un código de colores establecido que se asocia a la presencia de efectos sobre la salud de la población (Ver Tabla 1). Se calcula de acuerdo a lo establecido por la Resolución 2254 de 2017 a partir de la siguiente ecuación (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017):

$$ICA_p = I_{Alto} - I_{Bajo} / PC_{Alto} - PC_{Bajo} \times (C_p - PC_{Bajo}) + I_{Bajo}$$

Donde:

ICA_p = Índice de Calidad del Aire para el contaminante p

C_p = Concentración medida para el contaminante p

PC_{Alto} = Punto de corte mayor o igual a C_p

PC_{Bajo} = Punto de corte menor o igual a C_p

I_{Alto} = Valor del ICA correspondiente al PC_{Alto}

I_{Bajo} = Valor del ICA correspondiente al PC_{Bajo}

Los resultados obtenidos se compararon con normas de calidad del aire nacionales e internacionales (Tabla 2 y Tabla 3). De esta manera se pudo establecer el nivel de riesgo para la población expuesta en el área de estudio.

Tabla 1

Puntos de corte del ICA para promedios de 24 horas de $PM_{2.5}$ (Resolución 2254 de 2017)

ICA	CATEGORÍA	PUNTOS DE CORTE
		PM _{2.5} µg/m ³ 24 horas
0-50	Buena	0 – 12
51 - 100	Aceptable	13 – 37
101 - 150	Dañina a la salud grupos sensibles	38 – 55
151 - 200	Dañina a la salud	56 – 150
201 - 300	Muy dañina a la salud	151 – 250
301 - 500	Peligrosa	251 – 500

Nota. Fuente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Tabla 2

Niveles máximos permisibles de PM_{2.5} establecidos por la normatividad colombiana (Resolución 2254 de 2017)

PM _{2.5} µg/m ³	24 horas	Anual
		37

Nota. Fuente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Tabla 3

Niveles establecidos en las directrices vigentes sobre la calidad del aire de la OMS para PM_{2.5}

PM _{2.5} µg/m ³	24 horas	Anual
		15

Nota. Fuente (World Health Organization WHO/OMS, 2021).

Se obtuvieron los valores mínimos y máximos y las medidas de tendencia central y variabilidad, y se utilizaron gráficos Boxplot para identificar datos atípicos. Las series de tiempo se recopilaban mediante gráficos de series de tiempo.

Se usaron métodos estadísticos descriptivos univariados para determinar las medidas de tendencia central (media, mediana y moda) y de variabilidad (desviación estándar) y multivariados (análisis de correlación). Con lo anterior se analizaron las series de datos horarios de PM_{2.5}. Los resultados obtenidos permitieron generar tablas de estadística descriptiva para cada uno de los sitios monitoreados buscando identificar diferencias entre ellos, patrones y tendencias y matrices de correlación para evaluar la relación lineal entre las estaciones de medición.

El análisis estadístico descriptivo permitió la elaboración de histogramas de frecuencia y mapas de calor usando el método de interpolación Distancia Inversa Ponderada (IDW) en los que se identificaron los puntos críticos de calidad del aire en el municipio. Para el procesamiento y análisis de los datos se utilizó el software estadístico R y su entorno RStudio que son de uso libre, para la generación de tablas y gráficos Microsoft Excel © y para la elaboración de los mapas de calor el software ArcGis ©.

3.3 Percepción de salud relacionada con la calidad del aire en los habitantes del municipio

Se evaluaron las condiciones de salud y la percepción de la salud relacionada con la calidad del aire por medio de tres instrumentos tipo encuesta. Las encuestas fueron diligenciadas de manera virtual por los participantes a través de un formulario de Google. Se seleccionó la opción de encuesta online considerando que, al iniciar el estudio, aunque había finalizado el confinamiento estricto, aún existían restricciones asociadas a la contingencia por la pandemia del COVID-19. Dos de los instrumentos identificaron por una sola vez las condiciones iniciales y finales del estado de salud de las personas durante el período de realización de esta investigación (este instrumento se llamó encuesta de situación de salud). El tercer instrumento estuvo relacionado con la percepción semanal (aproximadamente 52 encuestas) de la calidad del aire y del estado de salud de los participantes durante el período de estudio (este instrumento se llamó encuesta semanal de percepción de salud y calidad del aire). Se solicitó el consentimiento de las personas (todas ellas mayores de edad) para la realización de las encuestas.

Las encuestas inicial y final incluyeron datos personales y detallados de salud. Entre ellos sexo, edad, nivel educativo, ocupación, sector de residencia, hábitos, condiciones crónicas y actuales de salud, consumo de medicamentos y frecuencia de asistencia a la consulta médica. Es de notar que en la encuesta final se incluyó una pregunta sobre el diagnóstico de COVID-19 durante el año en el que se realizó el estudio.

Las encuestas semanales se enfocaron en determinar la percepción de la calidad del aire y del estado de salud haciendo énfasis en síntomas respiratorios. Permitieron obtener información sobre aspectos subjetivos relacionados con la salud y la calidad del aire y percibidos por las personas que participaron en el estudio (Ver Anexo 1).

Para evaluar la hipótesis planteada se conformaron dos grupos de ciudadanos. En el primero de ellos estaban aquellos que tenían a cargo los dispositivos de medición (28 personas). En el segundo grupo se incluyeron aquellos que no tenían acceso a las mediciones de calidad del aire y no tenían sensores a su cargo (16 ciudadanos). Ambos grupos diligenciaron la encuesta inicial y final de situación de salud y las encuestas semanales de percepción de su estado de salud y de la calidad del aire durante el tiempo de ejecución del estudio. Los resultados de las encuestas iniciales y finales de situación de salud y de percepción de salud y calidad del aire, se recopilaron en una base de datos.

3.3.1 Análisis de los resultados de las encuestas

Con los datos de las encuestas de situación de salud (inicial y final) se realizaron análisis estadísticos descriptivos univariados y multivariados que permitieron caracterizar demográficamente la población de estudio, identificar los comportamientos de riesgo y la situación de salud al iniciar y al finalizar el estudio. Así como definir los antecedentes de salud más significativos. Para las variables de naturaleza cualitativa (“Sexo”, “Nivel de escolaridad”, “Ocupación”, “Síntomas durante la semana”, “Percepción del estado de salud”, “Percepción de la calidad del aire”), se elaboraron tablas de frecuencia simple, indicando frecuencias absolutas, relativas y porcentuales, acompañadas de gráficos de sectores circulares para las variables dicotómicas y gráficos de barras para las variables politómicas. Para las variables de naturaleza cuantitativa (“Edad”, “Número de habitantes en el hogar”, “Frecuencia de actividad física”, “Número de cigarrillos consumidos al día”) se emplearon tablas de frecuencia simple con frecuencias acumuladas. Se generaron gráficos de barras simples y se reportaron la moda, el promedio y la desviación estándar.

Se utilizaron métodos estadísticos descriptivos para el análisis de las encuestas semanales de percepción de salud y calidad del aire diligenciadas por las personas con y sin dispositivos a cargo. Se identificó la presencia y tipo de síntomas reportados, la asistencia a consulta médica, la presencia de síntomas de otros habitantes del hogar y la percepción del estado de salud y de la calidad del aire.

3.4 Relación entre los datos medidos de PM_{2.5} y los resultados de las encuestas de percepción ciudadana de la salud

Los datos resultantes del monitoreo de PM_{2.5} y de las encuestas de percepción de salud diligenciadas, permitieron evaluar su posible asociación. Con el fin de evaluar esta relación entre la percepción de salud (resultados de las encuestas semanales) y las concentraciones de PM_{2.5} medidas por los dispositivos, se realizó un análisis de regresión logística multinomial.

La regresión logística es de amplio uso en investigaciones epidemiológicas, ya que permite conocer el valor de la asociación entre una variable dependiente o respuesta de tipo cualitativo que puede tomar dos categorías (dicotómica) o más de dos categorías diferentes y mutuamente excluyentes (politómica) y una o más variables independientes o explicativas que pueden ser de tipo cualitativo o cuantitativo. Una de las ventajas de la regresión logística es que puede usarse para conocer la asociación de cada variable explicativa con la variable respuesta de una manera independiente (Fiuza & Rodríguez Pérez, 2000; Hosmer & Lemeshow, 2000; Martínez González et al., 1985; Moral Peláez, 2016).

El análisis estima los parámetros de la ecuación $\beta_1, \beta_2, \beta_k$ de la función:

$$Z = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k$$

Donde:

Z = logaritmo neperiano del odds del resultado que se está estudiando (variable dependiente)

β_0 = ordenada en el origen de la función de regresión

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ = coeficientes de la pendiente de la recta

X_1, X_2, \dots, X_k = variables explicativas.

Después de obtener el modelo de regresión se evalúan los coeficientes de regresión (β_i) de cada variable explicativa para estimar y analizar su razón de probabilidades (OR: siglas en inglés de odds ratio). Los coeficientes β_i expresan el logaritmo neperiano de la OR para cada una de las variables explicativas. La OR es una medida de asociación entre dos variables y para su estimación se usa la siguiente fórmula:

$$OR = \text{antilog}(\beta_i) = e^{\beta_i}$$

Para el análisis de la OR debe considerarse que los valores diferentes a 1, expresan niveles de asociación significativos:

OR = 1 (No hay asociación)

OR < 1 (Asociación inversa)

OR > 1 (Asociación positiva)

En esta investigación, se incluyeron en el modelo de regresión logística las variables respuesta y explicativas listadas en la Tabla 4.

Tabla 4

Variables incluidas en el análisis de regresión logística

Variable respuesta o dependiente	Variables explicativas o independientes
Percepción estado de salud	PM _{2.5} (Promedios semanales)
	Síntomas
	Visitas al médico
	Síntomas otras personas en el hogar
	Percepción calidad del aire
	Momento del día con mejor calidad del aire

Se implementaron modelos de regresión logística para cada una de las variables explicativas con el fin de evaluar de manera independiente el valor de su asociación con la variable respuesta. Se utilizó un intervalo de confianza del 95% y se consideraron estadísticamente significativos los resultados con un valor p inferior a 0,05. Adicionalmente, se ejecutó el Test de Wald para comprobar si las variables explicativas incluidas eran o no representativas.

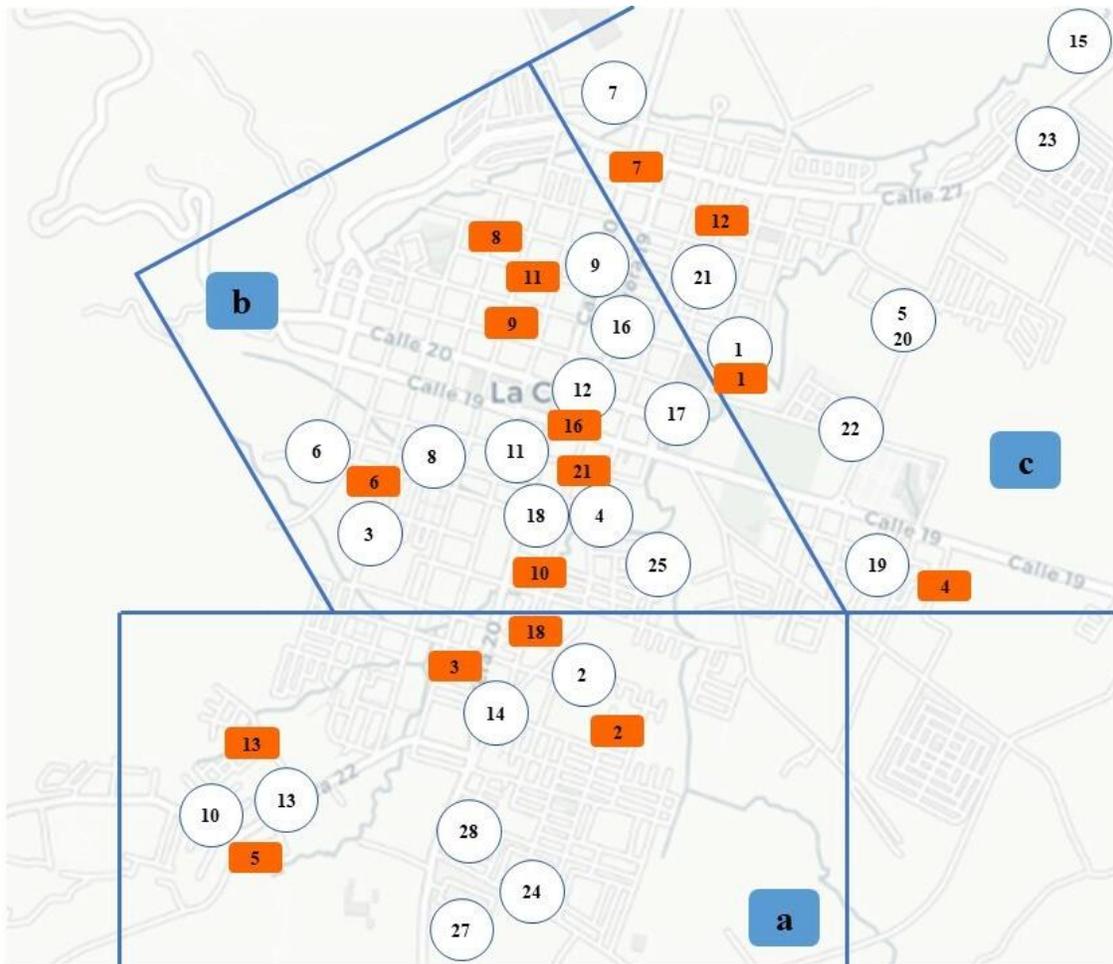
En el caso de los promedios semanales de PM_{2.5}, para los participantes con dispositivos a cargo, se utilizaron las concentraciones medidas por el correspondiente sensor. Para los participantes sin dispositivos a cargo, se ejecutaron tres casos:

- ✓ CASO 1: Se utilizaron los promedios semanales de PM_{2.5} de todos los dispositivos en funcionamiento.

- ✓ CASO 2: Se definieron tres zonas considerando sus características urbanísticas y de infraestructura de servicios. Se calculó el promedio semanal de $PM_{2.5}$ para los dispositivos ubicados en cada una de ellas. En el análisis se consideraron para cada participante los promedios semanales de la zona en la que está ubicada su residencia (Ver Figura 5).
- ✓ CASO 3: Se utilizó para el análisis el promedio semanal de $PM_{2.5}$ del dispositivo más cercano a la residencia del participante.

Figura 5

Zonas definidas para ejecutar el caso 2 (Regresión logística participantes sin dispositivos a cargo)



Nota. a) Zona sur, b) Zona Centro, c) Zona de expansión norte. Los círculos representan los sensores, los rectángulos representan los participantes sin sensores a cargo. Se aclara que, para favorecer la visualización, la ubicación del sensor 15 en el mapa es aproximada.

4 Resultados y discusión

4.1 Campaña de validación

Se realizó la primera campaña en la cual se hizo una comparación durante 48 horas de dos de los dispositivos seleccionados al azar. Los resultados sugieren una alta similitud, con diferencias promedio de $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, otros estudios han reportado diferencias de hasta $1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Liu et al., 2019; Roncancio, 2019). Este resultado sugirió que en general los dispositivos usados en la investigación podían realizar mediciones similares. La segunda campaña se ejecutó según lo descrito anteriormente, en el mes de junio de 2022 (Ver Figura 6). Como ya se mencionó, el tamaño de la muestra y la duración de la campaña, se determinaron teniendo en cuenta las condiciones definidas por la institución a cargo (espacio para la ubicación y disponibilidad de transmisión de los datos). Con la revisión de la serie de datos obtenidos se pudo determinar que dos de los dispositivos utilizados tuvieron fallas en su funcionamiento lo que generó ausencia de más del 50% de la información y por esta razón no se consideraron para los siguientes análisis. En la Tabla 5 se presenta el resumen de los principales estadísticos descriptivos asociados a los datos horarios medidos por la estación de referencia y por los cinco dispositivos.

Figura 6

Dispositivos instalados para campaña de validación. Junio de 2022



Tabla 5

Resumen estadístico descriptivo basado en mediciones horarias de PM_{2.5} campaña de validación, junio 7 al 23 de 2022

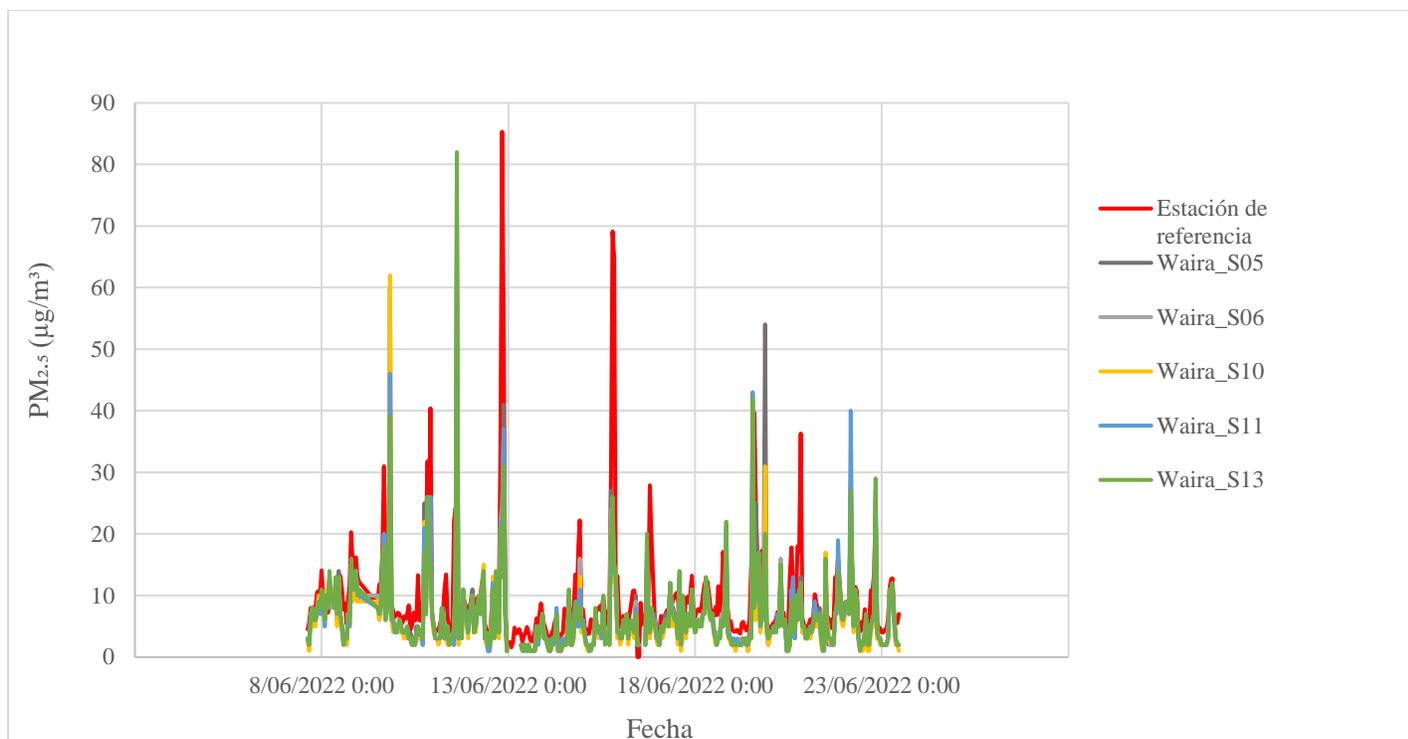
ESTADÍSTICOS					
	Promedio	Mediana	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Estación de referencia	9,4	7,3	1,6	85,3	8,6
WairaS05	6,4	5	1	60	6,3
WairaS06	6,3	5	1	77	6,5
WairaS10	5,8	4	1	70	6,5
WairaS11	6,3	5	1	66	6,6
WairaS13	6,4	5	1	82	6,7

De acuerdo con la Tabla 5, puede evidenciarse que los valores de los cinco dispositivos presentaron una alta similitud. Estos resultados sugieren la robustez de los resultados de la primera campaña. Así mismo, otros estudios han reportado coeficientes de correlación cercanos a 1,0 (0,97, 0,98 y 0,99) al comparar entre si dispositivos de bajo costo (Escobar Jiménez, 2020; Roncancio, 2019).

La Figura 7 muestra las series de tiempo mencionadas, puede evidenciarse que en general los datos siguen el mismo patrón. Aunque se pueden observar algunos picos en las concentraciones medidas por la estación de referencia que no fueron captados por los dispositivos y algunos momentos en los que los dispositivos reportaron concentraciones mayores a las reportadas por la estación de referencia.

Figura 7

Serie de tiempo PM_{2.5}. Datos horarios durante la campaña de validación implementada entre el 7 y el 23 de junio de 2022



Se realizaron otros análisis estadísticos, los cuales incluyeron el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson y del coeficiente de determinación. Se encontró una correlación positiva moderada con valores entre los 0,54 y 0,62 entre la estación de referencia y los dispositivos, el valor p para todas las correlaciones es $<0,001$ (Tabla 6). Es de notar que los valores del coeficiente de correlación entre los dispositivos de bajo costo están entre 0,79 y 0,98 lo que sugiere que estas mediciones tienen un alto grado de relación entre sí y que los dispositivos tienen la misma calibración (Figura 8).

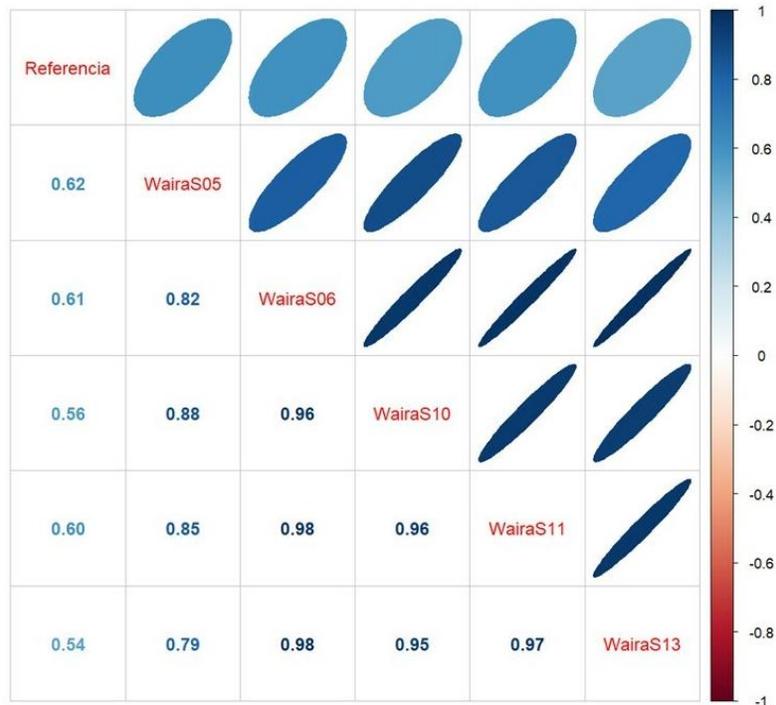
Tabla 6

Resultados correlación campaña de validación implementada entre el 7 y el 23 de junio de 2022

Variables	Coefficiente de correlación R	Coefficiente de determinación R²	Valor p
Estación de referencia-WairaS05	0,62	0,39	<0,001
Estación de referencia-WairaS06	0,61	0,37	<0,001
Estación de referencia-WairaS10	0,56	0,32	<0,001
Estación de referencia-WairaS11	0,61	0,37	<0,001
Estación de referencia-WairaS13	0,54	0,30	<0,001

Figura 8

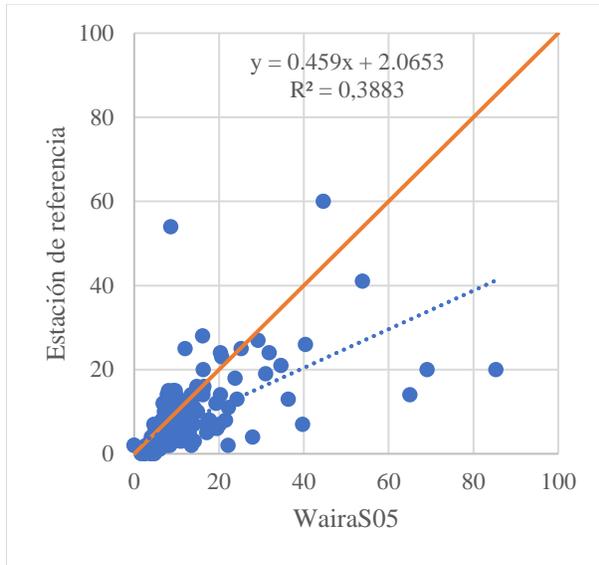
Matriz de correlación campaña de validación implementada entre el 7 y el 23 de junio de 2022



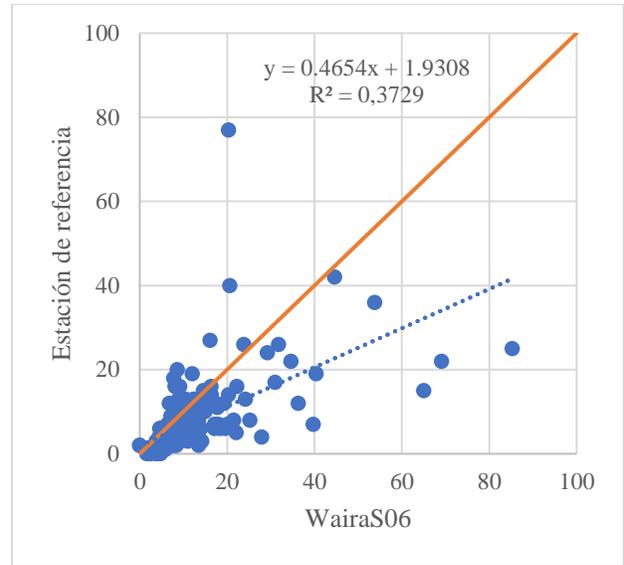
En la Figura 9 puede visualizarse la variabilidad entre la estación de referencia y los cinco dispositivos evaluados usando diagramas de dispersión, la ecuación lineal de ajuste y el coeficiente de determinación R^2 . Para este cálculo, los datos medidos por el sensor se consideraron como variable dependiente X y los datos medidos por la estación de referencia como variable independiente Y. Con los resultados obtenidos se pudo concluir que los coeficientes de determinación son todos menores a 0,5.

Figura 9

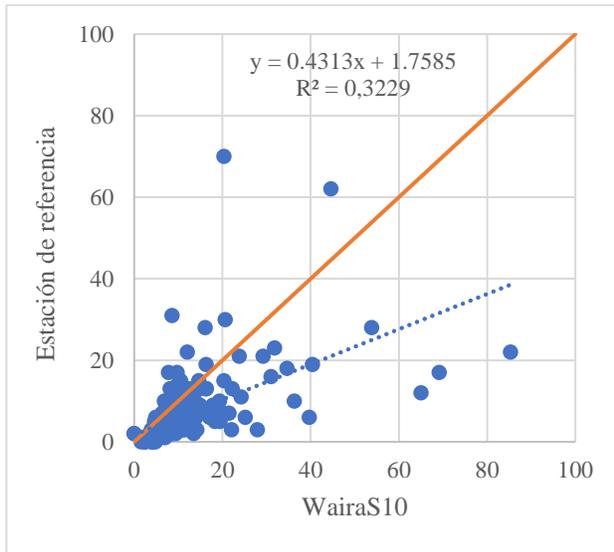
Diagramas de dispersión datos horarios campaña de validación implementada entre el 7 y el 23 de junio de 2022. a) WairaS5, b) WairaS6, c) WairaS10, d) WairaS11, e) WairaS13



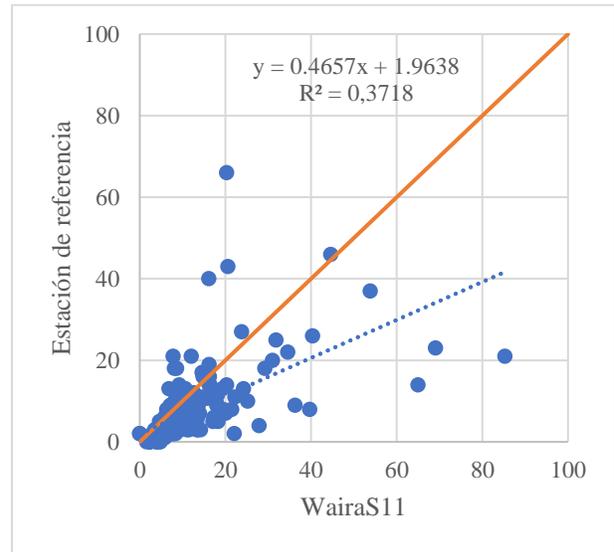
a)



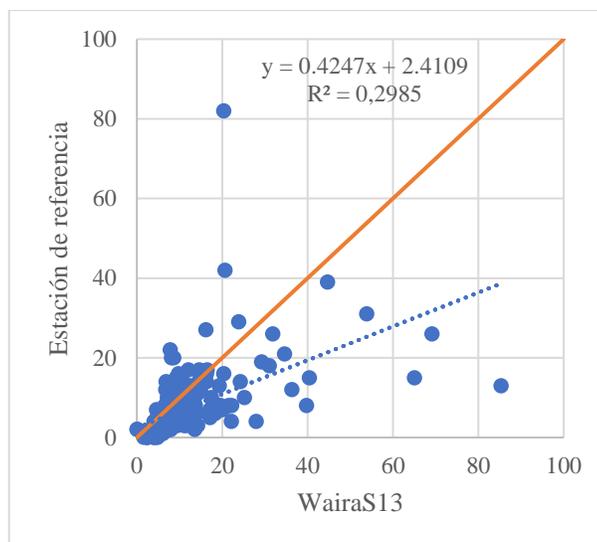
b)



c)



d)



e)

Estudios realizados en Colombia en los que se ha evaluado la precisión de los dispositivos de bajo costo con base en mediciones de estaciones oficiales, han reportado resultados similares a los encontrados durante esta última campaña con coeficientes de determinación entre 0,23 y 0,58 (Roncancio, 2019). Estos resultados sugieren que los dispositivos de bajo costo, subestiman/sobreestiman las mediciones de los instrumentos de referencia, lo que se expresa en coeficientes de determinación menores a 0,5. (Escobar Jiménez, 2020; Roncancio, 2019) En Estados Unidos y Europa se han encontrado valores mayores de los coeficientes entre dispositivos y equipos de referencia (desde 0,72 hasta 0,89) lo que podría estar asociado al principio de medición y marca comercial de los dispositivos de bajo costo y al protocolo de validación implementado (Kelly et al., 2017; Liu et al., 2019; Papapostolou et al., 2017; Roncancio, 2019; Wang et al., 2015).

Con base en lo anterior se confirma, que con los dispositivos de bajo costo usados en esta investigación es posible obtener datos indicativos (exactitud de mediana a alta) de material particulado que pueden complementar los datos oficiales de estaciones de referencia y que una de sus mayores fortalezas está en la posibilidad de aumentar la cobertura espacio/temporal del monitoreo a un menor costo. Por lo tanto, para esta investigación, que pretende un primer acercamiento al conocimiento de la contaminación atmosférica en La Ceja por medio de la implementación de una red de medición de $PM_{2.5}$, los dispositivos usados resultan adecuados. Lo anterior considerando que se reportaron datos indicativos, que la variabilidad de los valores entre

los dispositivos es baja, que su instalación y mantenimiento son sencillos y que debido a su bajo costo fue posible financiar mediante varios proyectos una cantidad suficiente de dispositivos para obtener una densidad adecuada de dispositivos/km².

4.2 Medición de concentraciones de PM_{2.5}

En este apartado se presentan los análisis de las mediciones realizadas con los 28 dispositivos de monitoreo que fueron instalados en diferentes sectores del municipio de La Ceja. Se alcanzó una densidad de 6 dispositivos/km² en el área urbana. Con los datos horarios recopilados se implementaron análisis estadísticos descriptivos que permitieron caracterizar temporal y espacialmente las concentraciones de PM_{2.5}. Cabe recordar que los datos obtenidos son indicativos, pueden considerarse como un primer acercamiento al diagnóstico de la contaminación atmosférica y como punto de partida para la implementación de medidas de gestión de dicha contaminación y de la salud pública en el municipio. Los dispositivos se instalaron priorizando sectores críticos del municipio por su localización cercana a vías con alto flujo de vehículos. Así mismo y como ya se mencionó, al iniciar esta investigación, aunque todavía existían algunas restricciones establecidas para atender la emergencia generada por la pandemia por COVID-19, ya había finalizado el confinamiento estricto. Del mismo modo vale la pena recordar que en La Ceja no se contaba previamente con datos medidos de calidad del aire que pudieran usarse como línea base para comparar los resultados obtenidos en este estudio y evaluar el posible impacto de las medidas implementadas durante la contingencia en los niveles de contaminación atmosférica.

4.2.1 Análisis temporales

Como se mencionó previamente, la instalación de los sensores no se realizó en forma simultánea. En la Tabla 7 se pueden conocer los períodos de medición analizados para cada uno de los sensores.

Tabla 7

Período de medición incluido en el análisis para cada uno de los sensores instalados

SENSOR	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Fecha inicial	22/12/2021	31/12/2021	22/12/2021	10/03/2022	27/12/2021	26/12/2021	19/03/2022
Fecha final	1/01/2023	1/01/2023	1/01/2023	1/01/2023	1/01/2023	1/01/2023	1/01/2023

SENSOR	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
Fecha inicial	29/06/2022	28/06/2022	28/06/2022	28/06/2022	9/07/2022	11/07/2022	11/07/2022
Fecha final	1/01/2023	1/01/2023	31/12/2022	1/01/2023	21/12/2022	1/01/2023	1/01/2023

SENSOR	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21
Fecha inicial	11/07/2022	11/07/2022	13/07/2023	15/07/2023	15/07/2023	16/07/2022	16/07/2022
Fecha final	1/01/2023	1/01/2023	1/01/2023	1/01/2023	1/01/2023	1/01/2023	30/12/2022

SENSOR	S22	S23	S24	S25	S26	S27	S28
Fecha inicial	16/07/2022	25/07/2023	29/07/2023	30/10/2022	31/10/2022	31/10/2022	2/11/2022
Fecha final	1/01/2022	6/11/2022	23/10/2022	1/01/2023	1/01/2023	1/01/2023	1/01/2023

En la tabla a continuación (Tabla 8), se pueden observar los resultados de los análisis estadísticos descriptivos de las mediciones horarias de PM_{2.5}.

Tabla 8

Resumen estadístico descriptivo basado en mediciones horarias de PM_{2.5} realizadas en el municipio de La Ceja entre el 22 de diciembre de 2021 y el 1° de enero de 2023

ESTADÍSTICO	S1●	S2◆	S3◆	S4●	S5◆	S6◆	S7●	S8◆	S9●	S10●	S11●	S12●	S13●	S14●
Número de datos horarios analizados	6561	7596	5851	6266	8595	5502	6115	4258	4124	3165	3855	991	3531	3772
Mínimo	0,01	0,15	0,01	0,1	0,05	0,01	0,07	1	1	1	1	1	1	1
Máximo	156	584	105	199	93	344	242	295	263	106	116	137	978	236
Mediana	6,9	6	4	6	6	6,6	5	6	6	6	7	5	5	6
Promedio	8,5	7,8	6	8	7,4	8,4	7,3	8,2	8,3	7,4	9,6	6,2	14,2	8,7
Desviación estándar	7,4	10,2	6,8	7,8	6,4	8,5	8,9	9,4	8,8	7,05	8,5	6,6	57,7	9,9

ESTADÍSTICO	S15 ■	S16 ●	S17 ●	S18 ●	S19 ◆	S20 ◆	S21 ●	S22 ●	S23 ●	S24 ◆	S25 ◆	S26 ●	S27 ●	S28 ●
Número de datos horarios analizados	2649	2177	3228	4080	4074	4005	3887	4062	2311	2027	1518	959	1499	1449
Mínimo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Máximo	350	95	190	98	224	88	90	105	877	73	101	410	184	184
Mediana	4	5	5	6	6	4	5	5	5	4	6	13	6	6
Promedio	6,6	7,2	7	7,7	7,7	5,8	6,7	6,8	7,9	6	7,5	16,4	8,1	8,1
Desviación estándar	12,8	7,07	7,2	6,1	10,1	5,3	5,7	6,3	26,3	5,5	7,1	22,3	7,9	9,7

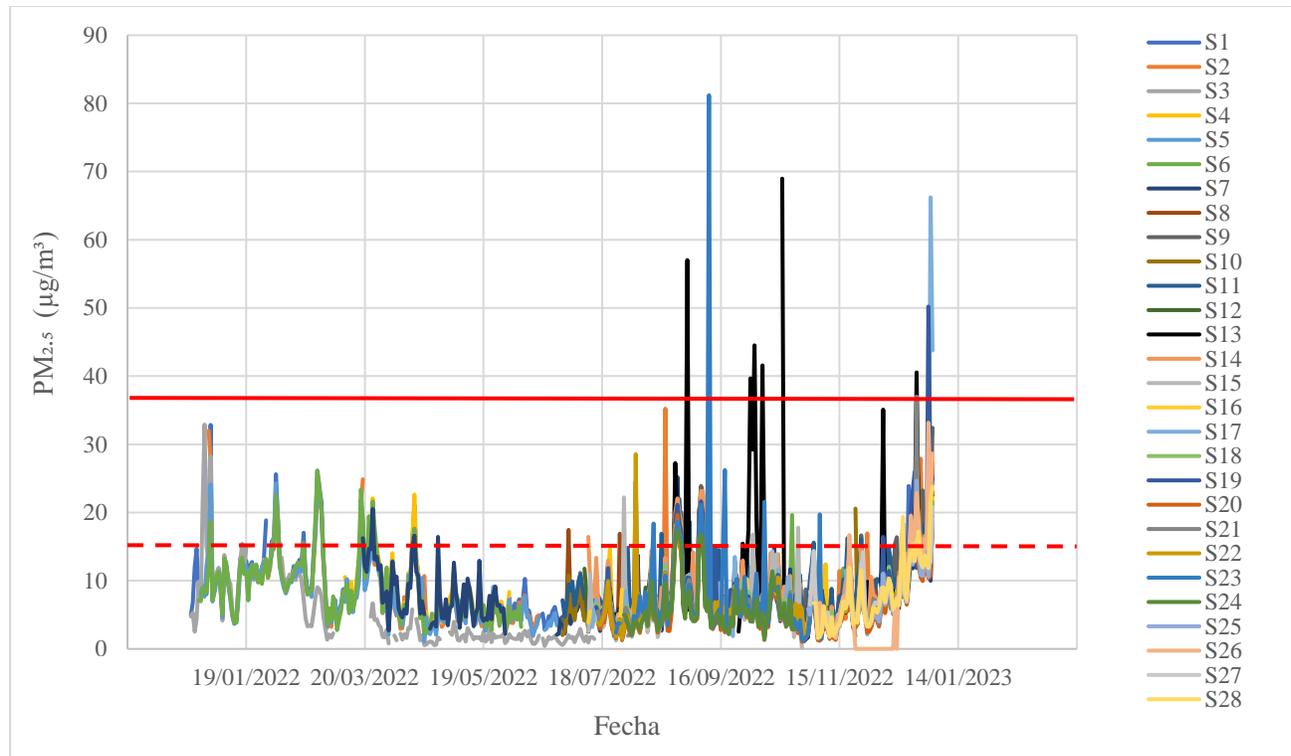
Nota. Los círculos representan los sensores ubicados en zonas de alto riesgo de contaminación atmosférica, los pentágonos los sensores ubicados en zonas de riesgo moderado y los rectángulos los sensores ubicados en zonas de bajo riesgo.

La concentración horaria promedio durante el período de estudio fue de $7,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La concentración horaria más alta fue de $978 \mu\text{g}/\text{m}^3$ medida por el sensor 13 (ubicado en una zona clasificada al inicio del estudio como de alto riesgo de contaminación atmosférica) el 11 de octubre de 2022 a las 9:00. Para esta misma fecha y hora, la concentración horaria promedio de los demás sensores fue de $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En Colombia, para la ciudad de Bogotá se han evidenciado promedios horarios que varían entre los 86 y $91 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para Medellín entre 50 y $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Builes-Jaramillo et al., 2020) en zonas con alto tráfico vehicular (Rodríguez-Camargo et al., 2020), y en China se han observado promedios horarios que alcanzan los $139 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en ciudades como Shangai y Shenyang (Javed et al., 2021). El 20% de los datos horarios medidos por el sensor 13 entre el 30 de septiembre y el 17 de octubre de 2022 superaron los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y de estos, el 10% alcanzaron valores superiores a los $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las mayores concentraciones se presentaron a las 11:00, 16:00, 18:00 y 21:00 horas. Cabe anotar que, aunque no fue posible determinar las causas de estos incrementos en las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ que se extendieron por dos semanas, la presencia de altas concentraciones en las horas mencionadas, sugieren la posible influencia de un factor local cercano al sensor. Adicionalmente, conviene mencionar, que esta estación reportó concentraciones que superan los $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 7 y el 24 de diciembre de 2022 a las 21:00 y 23:00 y el 1° de enero de 2023 a la 1:00. Este sensor está ubicado en el barrio Payuco al suroeste del municipio, en una zona urbanizada, con alto desarrollo habitacional, alto tráfico vehicular y en la que se encuentra la vía alterna que comunica La Ceja con el municipio de El Retiro. Se decidió reportar estos datos medidos y se usaron para realizar análisis descriptivos univariados.

Con la información de los datos horarios, también fueron calculados los promedios diarios (ver Figura 10). Adicionalmente se calcularon los valores del ICA mediante la ecuación presentada previamente en la sección de metodología.

Figura 10

Serie de tiempo de promedios diarios de PM_{2.5} en el municipio de La Ceja entre el 22 de diciembre de 2021 y el 1° de enero de 2023



Nota. La línea roja punteada representa el nivel establecido por las directrices de la OMS para los promedios diarios de PM_{2.5} (15 µg/m³). La línea roja continua, representa el nivel máximo permisible establecido por la normatividad colombiana para un tiempo de exposición de 24 horas (37 µg/m³)

La concentración diaria promedio de todos los dispositivos durante el período de estudio fue de 8 µg/m³. La concentración media diaria más alta fue de 170 µg/m³ medida por el dispositivo 13 el 11 de octubre de 2022, como se aclaró previamente estos datos se reportaron y por su carácter irregular no fueron incluidos en análisis multivariados. Después de comparar los promedios diarios con los valores de referencia establecidos como seguros para la salud humana por la OMS y por la normatividad colombiana, se evidenció que el 9% de los promedios diarios superan el valor recomendado por la OMS (15 µg/m³) y el 1,0% el nivel establecido para Colombia (37 µg/m³). Fueron cuatro los dispositivos que registraron excedencias al nivel máximo permisible diario de

Colombia. El dispositivo 13 presentó excedencias durante ocho días, el 17 durante dos días y los dispositivos 21 y 23 durante un día. Estos cuatro dispositivos están ubicados en zonas de alto riesgo de contaminación atmosférica.

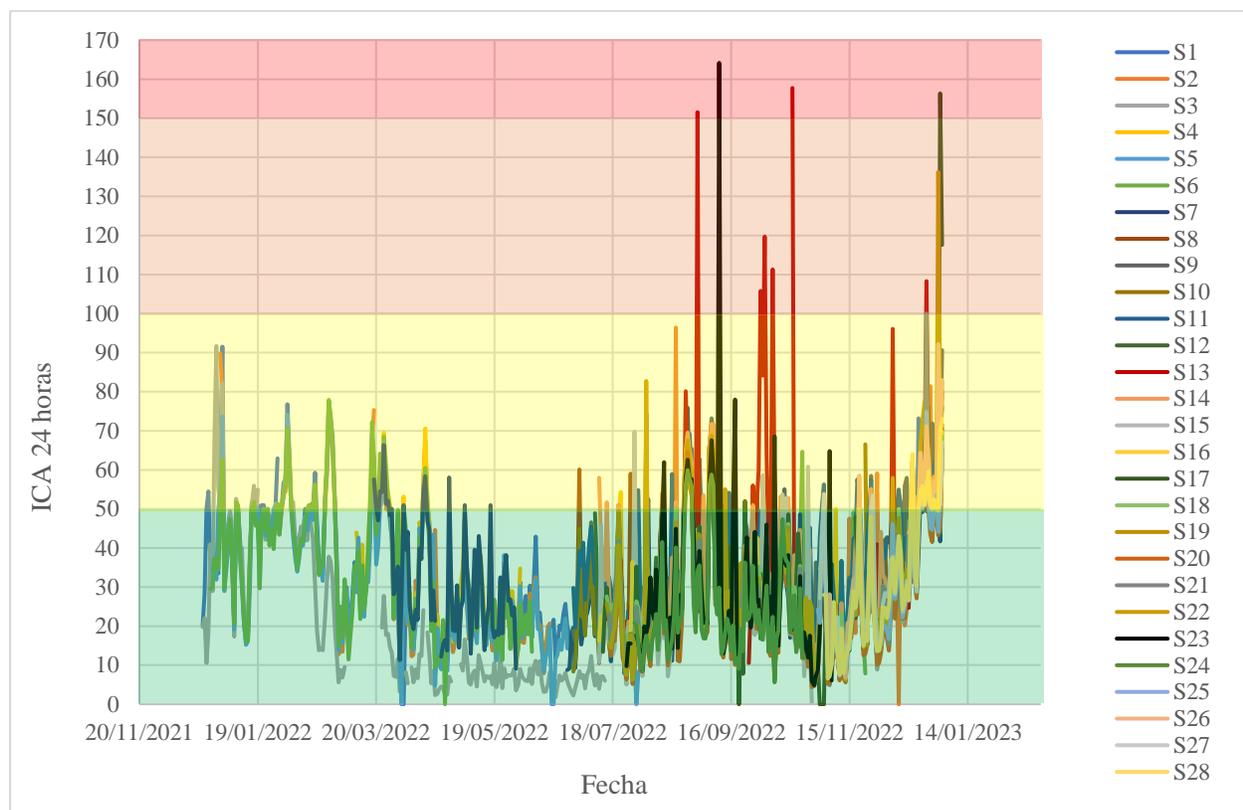
Como se evidencia en la Figura 10, durante el mes de agosto se presentaron concentraciones que superan el valor promedio en todas las estaciones de monitoreo, lo que sugiere la ocurrencia durante ese período de un evento con efectos regionales de contaminación atmosférica. Para la semana del 23 al 29 de agosto, el Servicio Geológico Colombiano reportó anomalías térmicas en el cráter Arenas del volcán Nevado del Ruiz que generaron emisiones que alcanzaron alturas de 2000 metros medidos desde la cima del volcán con una tendencia predominante de dispersión hacia el noroccidente (Servicio Geológico Colombiano, 2022), dirección en la cual está ubicado el municipio de La Ceja. Las emisiones volcánicas se han asociado a aumentos en las concentraciones de gases y partículas en la atmósfera. Estos contaminantes alcanzan alturas influenciadas por el tipo de erupción y se dispersan de acuerdo a la dirección del viento (Prats Porta et al., 2022). Estudios realizados después de la erupción volcánica ocurrida en 2021 en la isla La Palma en España, concluyeron que aunque el contaminante que tuvo un impacto mayor y más prolongado sobre las condiciones atmosféricas a nivel regional fue el SO_2 , se registraron aumentos notables en las concentraciones de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ aún en zonas alejadas (Filonchyk et al., 2022; Milford et al., 2023).

Otro período en el que se evidenció un aumento generalizado en las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ fue el mes de diciembre. Este incremento puede asociarse al uso de pólvora que es tradición en el municipio en el marco de las celebraciones de navidad y año nuevo. El mayor pico en los valores medidos para estas fechas se presentó entre la noche del 31 de diciembre de 2022 y la madrugada del 1° de enero de 2023 ($263\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Se calcularon los valores de ICA entre el 22 de diciembre de 2021 y el 1 de enero de 2023. Los resultados del cálculo del ICA pueden observarse en la Figura 11.

Figura 11

ICA PM_{2.5} municipio de La Ceja entre el 22 de diciembre de 2021 y el 1° de enero de 2023



Nota. La escala de colores en el fondo representa las categorías del ICA para PM_{2.5} (Verde: Buena – Amarilla: Aceptable – Naranja: Dañina a la salud de grupos sensibles – Roja: Dañina a la salud). No se presentaron valores en las categorías Muy dañina a la salud y Peligrosa.

El cálculo del ICA permitió evidenciar las concentraciones de PM_{2.5} con posibles efectos en la salud. Puede observarse que en un mayor porcentaje los dispositivos reportaron un estado de calidad del aire bueno (86%) y aceptable (13%). Sin embargo, cuatro dispositivos (13, 17, 19 y 23) presentaron momentos puntuales en los cuales los valores del ICA en las categorías dañina a la salud de grupos sensibles (Menores de 5 años, mayores de 60 años, embarazadas y personas con enfermedades cardiacas y pulmonares) y dañina a la salud. Cabe resaltar que como ya se mencionó, el dispositivo 13 se instaló en una zona de alto tráfico vehicular y en un sector que ha experimentado una creciente urbanización en los últimos años. Este dispositivo también presentó concentraciones críticas durante las dos primeras semanas del mes de octubre de 2022, que pudieron estar relacionadas con el desarrollo de actividades de construcción e intervención de infraestructura en el sector. Los dispositivos 17, 19 y 23 se ubicaron en inmediaciones de la Central

Integrada de Transporte, de la vía que conduce al municipio de La Unión y de la vía que conduce hacia Rionegro respectivamente.

En los sectores del municipio cercanos a vías con alto volumen de circulación vehicular, se evidenciaron mayores concentraciones de $PM_{2.5}$ lo que puede representar un mayor riesgo de exposición y posibles efectos en la salud de la población que vive a su alrededor. Estos resultados están en consonancia con las conclusiones del más reciente informe del estado de la calidad del aire, en el que se señala que la mayor fuente de este contaminante en el país son los vehículos (IDEAM, 2022). Por otro lado, la urbanización acelerada se asocia al incremento del parque automotor con consecuencias sobre los niveles de contaminación atmosférica (Anenberg et al., 2019; Quirama-Aguilar et al., 2021). De los municipios del Valle de San Nicolás, La Ceja y Rionegro son los que tienen mayores índices de urbanización. Para La Ceja se han reportado variaciones en este índice que van de 57,1 en 1964 hasta 71,9 en 2005 (Gaviria, 2014). De igual manera, se han presentado cambios en el uso del suelo y transformación de la vocación económica generando presión sobre el suelo rural y crecimiento urbano hacia la periferia (Tobón Ramírez, 2020). Como se mencionó anteriormente, en el año 2022 la población total del municipio fue de 70.470 personas, así mismo, la actualización del análisis de situación de salud reporta para ese mismo año, el aseguramiento de 2.172 migrantes (Secretaría Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia, 2023). Al aumento de la población migrante se suma el flujo poblacional desde municipios aledaños (Abejorral, La Unión, Sonsón, Argelia, Nariño) y desde la ciudad de Medellín. En comunicación establecida el 31 de marzo de 2023 con la Ing. Juliana Uribe, funcionaria de la Secretaría de Movilidad de La Ceja, se pudo confirmar que, con corte al 30 de marzo del presente año, el número de vehículos en el municipio sin incluir las bicicletas era de 25.500 (J. Uribe, comunicación personal, 31 de marzo de 2023), 4.531 más que los matriculados a 2020 (Alcaldía de La Ceja del Tambo, 2020).

Por otro lado, solo fue posible calcular los promedios anuales con los dispositivos 1, 2, 3, 5 y 6. Estos fueron los primeros en ser instalados y los cuales que contaban con un porcentaje de datos válidos mayor o igual al 75% (Ver Tabla 9).

Tabla 9

Promedios anuales de PM_{2.5} en el municipio de La Ceja año 2022

SENSOR	S1	S2	S3	S5	S6
PROMEDIO	8,5	7,9	5,8	7,4	8,3

En relación con los promedios anuales, todos superan el límite establecido por la OMS de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De acuerdo a las directrices de la Resolución 2254 de 2017 de Colombia ninguno de los promedios anuales supera el valor definido como seguro de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Un informe reciente de calidad del aire a nivel mundial reporta que solo el 5% de los países cumple con las directrices definidas por la OMS para PM_{2.5} (IQAir, 2021). Según lo evidencia la Organización Panamericana de la Salud (OPS), son más de 150 millones de personas las que habitan en ciudades de LAyC que exceden los valores seguros de calidad del aire establecidos por la OMS (OPS/OMS, 2021). En una revisión publicada en 2020, se encontró que 11 de las principales ciudades de Suramérica excedieron en el período entre 2010 y 2017 los límites anuales establecidos por la OMS para PM_{2.5} (Gómez Peláez et al., 2020).

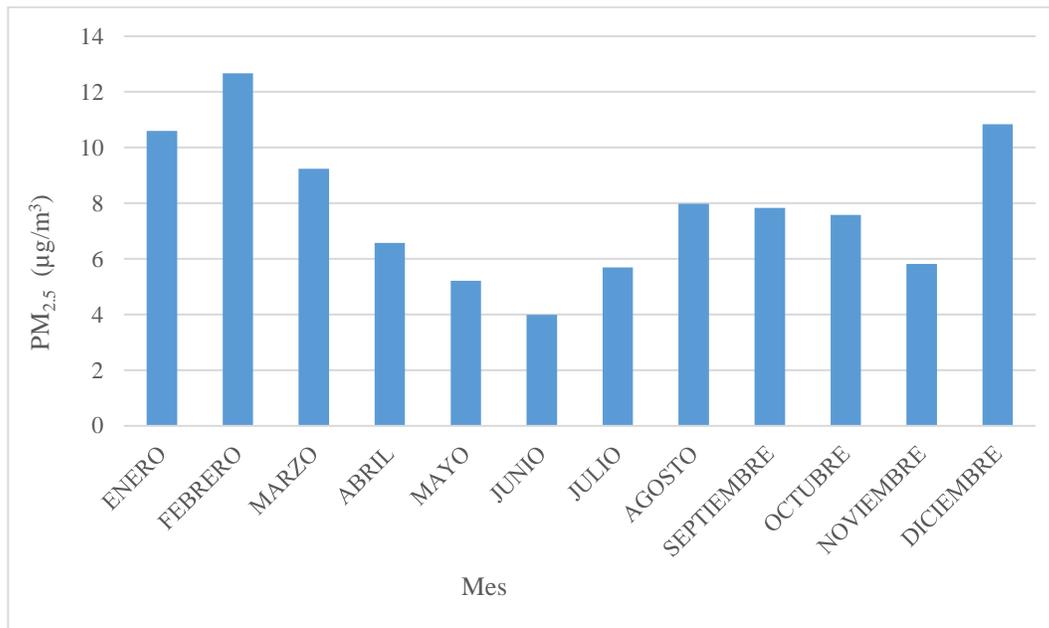
La mayoría de los países de LAyC, han establecido como seguros valores de exposición a PM_{2.5} menos estrictos que los definidos por la OMS (Calasans Souza, 2019). En Colombia, los límites actuales están alineados con el objetivo intermedio 3 de las guías de calidad del aire de la organización.

Según el informe del Estado de la Calidad del Aire en el país, en 2021 Colombia cumplió la meta de los indicadores nacionales de calidad del aire definidas en el Plan Nacional de Desarrollo y se presentó un incremento en la cantidad de estaciones oficiales de monitoreo que cumplen con la normatividad establecida para PM₁₀ y PM_{2.5}. Sin embargo, se reportan 40 estaciones con excedencias a la norma diaria y cuatro estaciones que no cumplen con lo establecido para el promedio anual (IDEAM, 2022).

Por otro lado, se calcularon los valores mensuales promedios de PM_{2.5}. Con los valores de las medias mensuales calculadas, se pudo concluir que los meses del año 2022 en los que se presentaron los mayores promedios de PM_{2.5} fueron enero, febrero y diciembre (Figura 12).

Figura 12

Promedio mensual de $PM_{2.5}$ en el municipio de La Ceja durante 2022

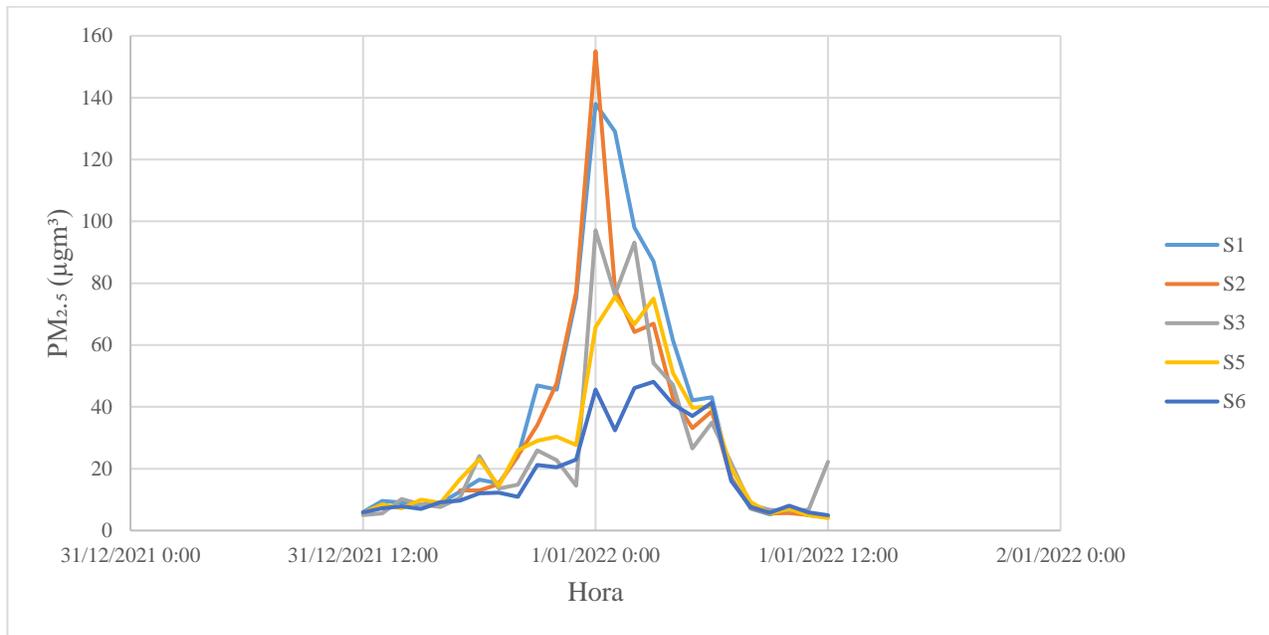


Para el Valle de Aburrá y la ciudad Bogotá, se ha observado que los meses con más altas concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ son: enero, febrero, marzo, octubre, noviembre y diciembre. Los resultados obtenidos en La Ceja coinciden con los momentos más críticos en febrero y marzo para el Valle de Aburrá y diciembre para Bogotá. Este comportamiento se asocia a factores meteorológicos que permiten la generación de condiciones favorables para el desarrollo de incendios en el norte del país y en la frontera Colombia-Venezuela. El material particulado generado por estos incendios es transportado por el viento al interior del país aumentando la contaminación del aire. En el Valle de Aburrá las principales causas de la mala calidad del aire son los incendios generados al norte del país (Ballesteros-González et al., 2020; Casallas et al., 2022; Londoño Pineda & Cano, 2021).

Como ya se mencionó, es tradicional en La Ceja el uso de material pirotécnico, principalmente durante las celebraciones de año nuevo. Con el fin de analizar el comportamiento del $PM_{2.5}$ se generaron gráficos de serie de tiempo con los datos horarios del 31 de diciembre de 2021 al 1° de enero de 2022 y del 31 de diciembre de 2022 al 1° de enero de 2023. Como se puede observar en la Figura 13, para el primer período (2021-2022), las concentraciones de $PM_{2.5}$ aumentaron considerablemente a partir de las 18:00 horas del 31 de diciembre y alcanzaron valores por encima de los $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 0:00 horas.

Figura 13

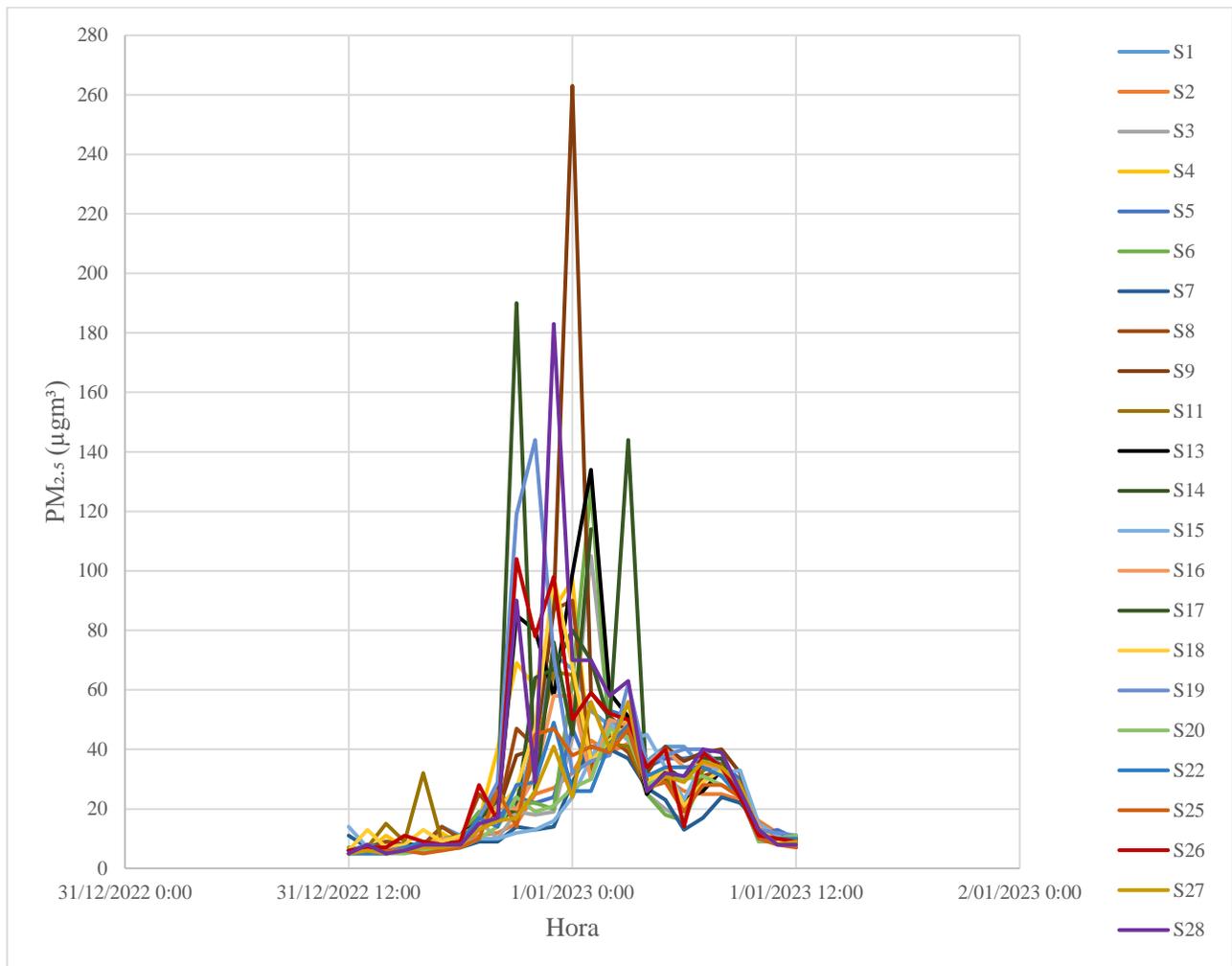
Serie de tiempo 31/12/2021 – 01/01/2022 municipio de La Ceja



Por otro lado, en la noche del 31 de diciembre de 2022 los niveles de PM_{2.5} se incrementaron desde las 21:00 alcanzando en la madrugada del 1° de enero de 2023 concentraciones asociadas al uso de pólvora que superaron los 260 µg/m³ (dispositivo 9) (ver Figura 14). El sensor 9 está ubicado en la zona centro del municipio, en un sector residencial altamente poblado y con riesgo alto de contaminación atmosférica. Con relación al año anterior, para este período se contó con un mayor número de dispositivos en funcionamiento. Este evento presentó un comportamiento más disperso en comparación con el 2021, comenzó más temprano y se presentaron concentraciones que superaron los 40 µg/m³ durante un período de tiempo más prolongado.

Figura 14

Serie de tiempo 31/12/2022 – 01/01/2023 municipio de La Ceja



A nivel mundial, son múltiples las festividades en las que es tradicional el uso de material pirotécnico. Su utilización es masiva en muchas ciudades durante las celebraciones de año nuevo (Singh et al., 2019). El material pirotécnico constituye una importante fuente antrópica de contaminación atmosférica que puede generar efectos de contaminación localizados espacialmente y de corto plazo. El uso de este tipo de material se asocia a un incremento repentino en las concentraciones de contaminantes, predominantemente material particulado. Así como a la disminución de la visibilidad, a la presencia de altos niveles de ruido que afectan la fauna, a la liberación de sustancias químicas que pueden contaminar las fuentes de agua superficiales y a efectos adversos sobre la salud humana que incluyen crisis asmáticas, tos y alergias respiratorias

(Hoyos et al., 2020; Yao et al., 2019). Durante los eventos en los que se usa material pirotécnico se han reportado valores que superan entre 2 y 4 veces las concentraciones promedio de PM_{10} y $PM_{2.5}$. Así mismo, diferentes investigaciones han demostrado que los altos niveles de estos contaminantes disminuyen de manera gradual y se estabilizan generalmente en el transcurso de las 24 horas posteriores (Garaga & Kota, 2018; Masiol et al., 2014; Oroji et al., 2020; Singh et al., 2019).

Los datos obtenidos con este estudio evidenciaron el impacto que el uso de pólvora tuvo sobre las concentraciones de $PM_{2.5}$ en La Ceja en las noches de fin de año de 2021 y 2022, alcanzando valores horarios que superaron los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y llegaron hasta los $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2021 y $263 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2022. En ambos eventos, se pudo observar el fenómeno de disminución paulatina del material particulado alcanzando concentraciones promedio de $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y de $7,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 23:00 del 1° de enero de 2022 y del 1° de enero de 2023 respectivamente.

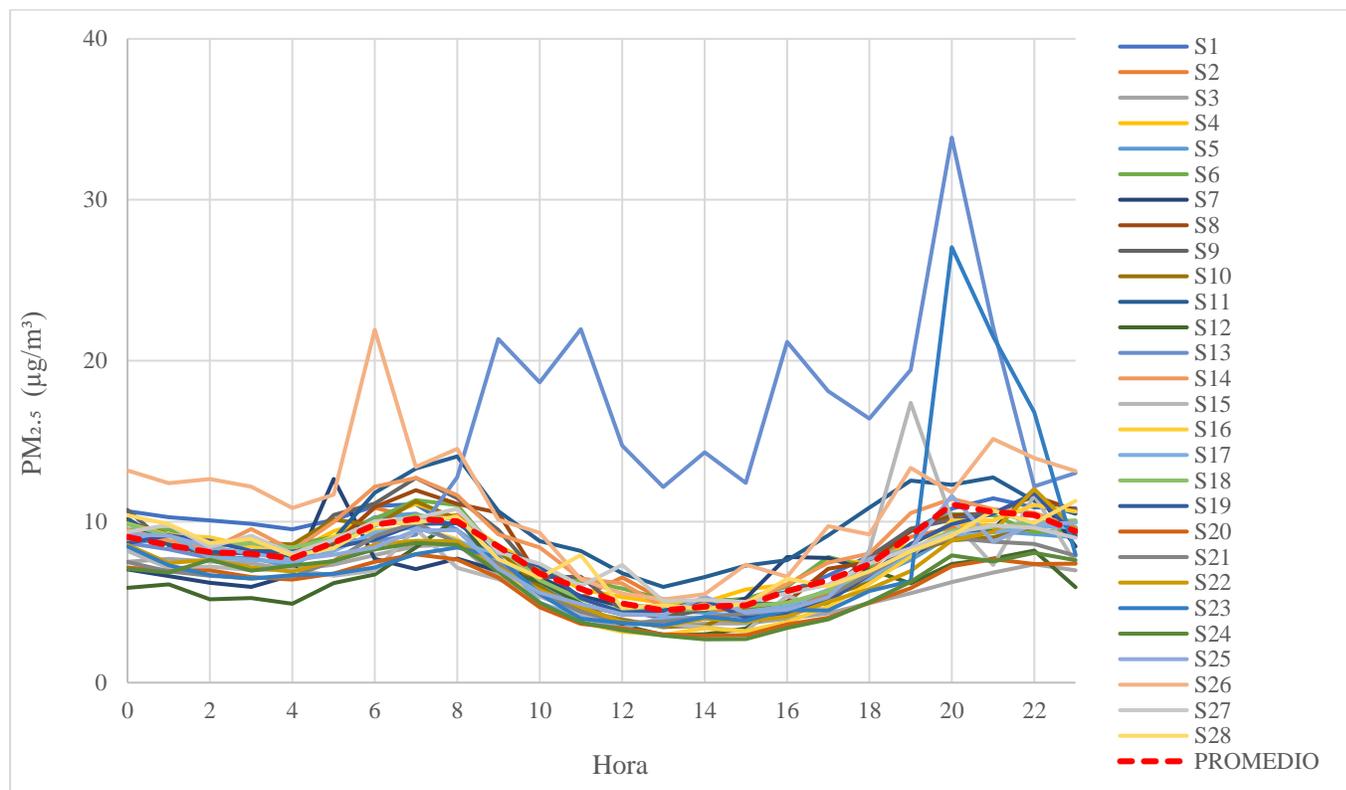
4.2.1.1 Ciclo diurno

El ciclo diurno de los contaminantes atmosféricos está influenciado por las variaciones en las condiciones meteorológicas, por las características topográficas y por factores antrópicos como el tráfico vehicular y la actividad industrial. Su variación puede estar influenciada por el fenómeno de inversión térmica. Este se presenta cuando el gradiente de temperatura se invierte. El aire de la superficie tiene entonces una menor temperatura que va aumentando a medida que asciende en la tropósfera, lo que genera una acumulación de contaminantes que quedan atrapados entre dos capas frías sin posibilidad de dispersarse. Este fenómeno es común en las horas de la noche y en las primeras horas de la mañana y se puede intensificar en condiciones de alta nubosidad. La inversión térmica disminuye al medio día cuando se alcanza la máxima radiación solar (Aguiar Gil et al., 2017; Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2021).

Con los valores horarios medidos por los 28 dispositivos fueron calculados los valores promedios para un ciclo diurno. En la Figura 15 puede visualizarse el ciclo diurno del $PM_{2.5}$ en La Ceja durante el período de estudio.

Figura 15

Evolución horaria PM_{2.5} municipio de La Ceja entre el 22 de diciembre de 2021 y el 1° de enero de 2023



En la Figura 15 es evidente la presencia de dos picos en las concentraciones del contaminante, el primero entre las 4:00 y las 8:00 horas y el segundo entre de las 18:00 y las 20:00 horas. Las concentraciones disminuyen notablemente entre las 12:00 y las 13:00 horas. Este patrón de variaciones diurnas se ha reportado en ciudades como Santiago en Chile, Bogotá, Itagüí y Medellín (Aguiar Gil et al., 2017; Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2021). Las variaciones en las concentraciones de material particulado se asocian también a los patrones de tráfico que suelen presentar picos entre las 8:00 y las 9:00 y entre las 19:00 y 21:00 y a la intensidad del viento que aumenta entre las 14:00 y las 15:00 y alcanza valores menores entre las 17:00 y las 18:00 (Casallas et al., 2022; Castillo-Camacho et al., 2020).

Se observa irregularidad en los valores medidos por el sensor 13, que como ya se mencionó, presentó episodios de altas concentraciones entre el 30 de septiembre y el 17 de octubre de 2022. Este dispositivo está ubicado en una zona de alto tráfico en la que se realizaron obras de

mejoramiento de la infraestructura vial durante buena parte del año 2022 y es además una zona de amplio desarrollo habitacional.

En la Tabla 10 se consignaron los valores promedio y la desviación estándar a las 0:00, 6:00, 12:00 y 18:00 para todos los dispositivos. Estos datos confirman lo mencionado anteriormente, el mayor promedio se presentó a las 6:00 ($9,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y el menor a las 12:00 ($4,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En general se observa una baja variabilidad entre sensores. Vale la pena destacar que el Sensor 13 a las 12:00 y las 18:00 tiene desviaciones estándar que superan el promedio, esto se asocia a las altas concentraciones medidas por dicho dispositivo en el mes de octubre de 2022.

Tabla 10

Promedios y desviaciones estándar de $\text{PM}_{2.5}$ a las 0:00, 6:00, 12:00 y 18:00 en La Ceja Antioquia entre el 22 de diciembre de 2021 y el 1° de enero de 2023

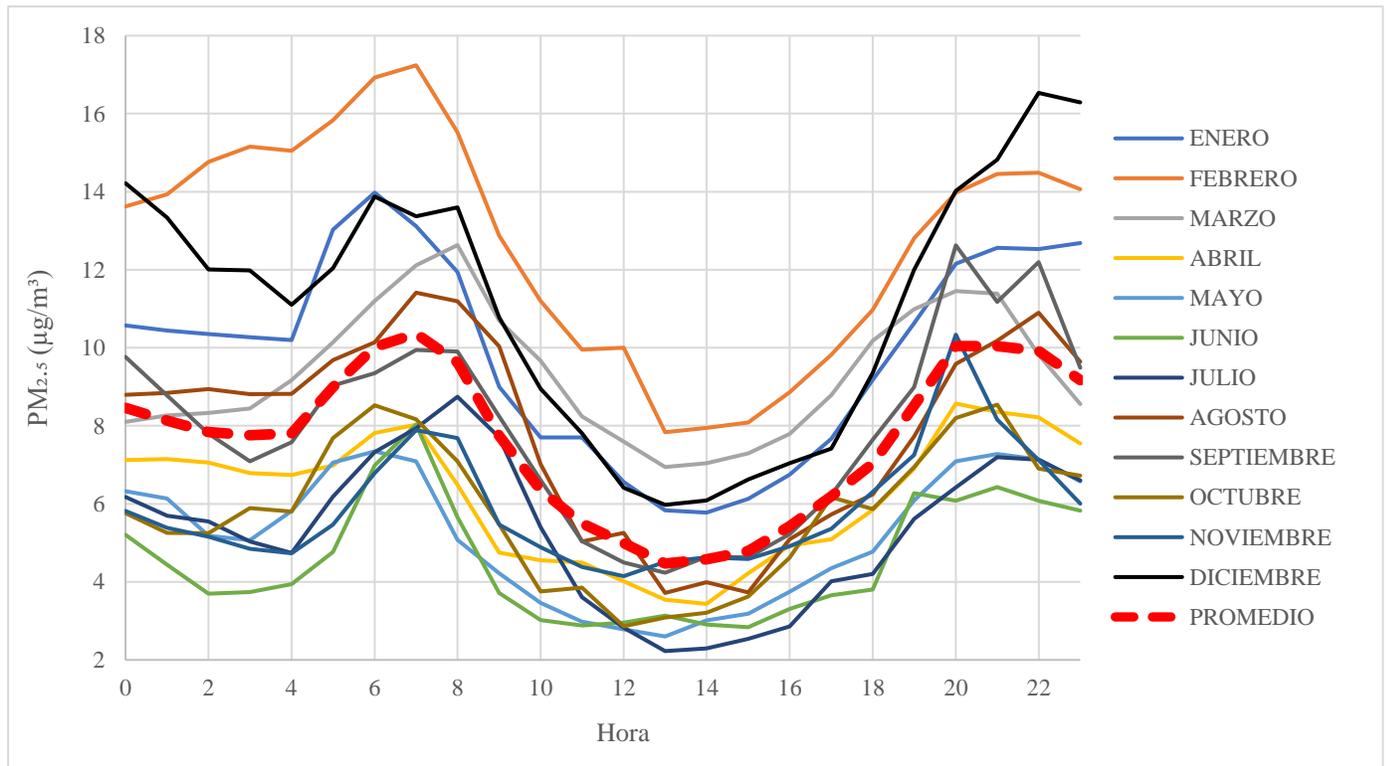
	0:00		6:00		12:00		18:00	
	PROMEDIO	DESVEST	PROMEDIO	DESVEST	PROMEDIO	DESVEST	PROMEDIO	DESVEST
S1	10,7	10,7	11	7,5	4,8	3,3	7,9	4,9
S2	9,4	11,5	10,9	11,5	6,6	3,8	7,1	5,2
S3	7,2	8,8	7,6	7	3,9	4,4	5	4,6
S4	9	8,7	10,2	6,8	5,3	4,9	7,4	5
S5	8,9	7,3	10,3	7,6	4,2	3,5	6,5	4,8
S6	9,5	7,5	10,2	7,5	5,8	5,8	7,2	5,1
S7	7	5,1	7,7	5,9	4,8	4,5	7	6,4
S8	10	12,5	10,9	8,2	4,3	3	7,5	5,4
S9	10,7	20,9	11,1	8,1	4,5	6,2	7,8	6,1
S10	9,5	7,8	9,4	7,1	3,9	2,9	6,2	5,4
S11	10,2	8,4	11,8	7,5	6,8	6,8	10,9	10
S12	5,9	4	6,7	4,4	3,6	2,1	7	9,1
S13	8,7	11,2	8,8	7,8	14,7	5,3	16,4	54,9
S14	9,5	10,4	12,2	12,4	6,2	3,4	8	5,5
S15	8,2	12,6	7	5,8	3,7	4,7	6,4	7,1
S16	9,9	8,7	9,5	6,9	3,2	2,5	6,1	4,9
S17	8,5	6,9	9,1	6,9	3,4	3	6,2	5,2
S18	9,9	9	9,8	6,4	4,4	2,6	6,9	3,6
S19	8,7	7,3	8,9	6,7	4,4	3,6	6,7	5,8
S20	7,2	5,8	7,5	6	3,4	3,6	5	3,8
S21	7,5	6,2	9,1	6	3,7	2,6	6,7	4,5
S22	8,6	8,6	8,6	6,5	3,8	3,3	5,8	4
S23	8,5	11	7,2	5,6	3,7	3,9	5,7	4,7
S24	7,1	5,6	8,3	6,3	3,3	3	5	3,7
S25	9,2	6,6	8,4	5,2	4,3	2,4	7,7	12,2
S26	13,2	11	11,7	7,2	5,5	3,7	9,2	6

S27	9,4	7,2	10	7,5	7,3	2,5	7,4	6
S28	10,4	11,3	9,9	7,6	4,7	3	6,9	4,2
Promedio	8,7	8,8	9,3	6,3	4,9	3	6,2	6,2

El patrón del ciclo diurno mencionado anteriormente se mantuvo durante los doce meses del año como se muestra en la Figura 16. Vale la pena mencionar que durante el mes de febrero se evidenciaron concentraciones que superaron el promedio en horas de la mañana, probablemente asociadas al primer episodio anual de deterioro de la calidad del aire en el Valle de Aburrá que habitualmente se presenta entre febrero y marzo y que en 2022 comenzó el 14 de febrero (El Tiempo, 2022; SIATA & Area Metropolitana del Valle de Aburrá, 2022). En el mes de diciembre se presentaron concentraciones más altas en horas de la noche influenciadas probablemente por el uso de pólvora.

Figura 16

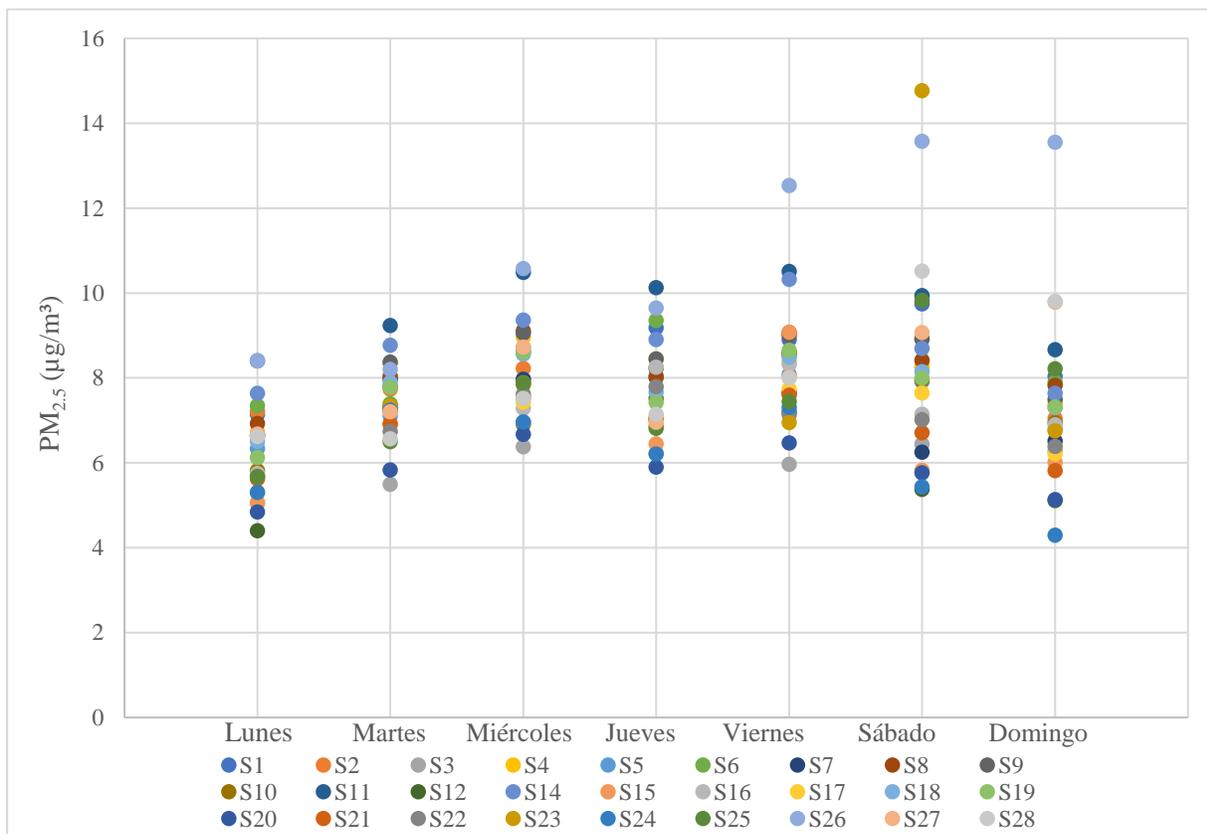
Comparativo por meses de la evolución horaria de PM_{2.5} en el municipio de La Ceja durante 2022



Adicionalmente, se evaluó el comportamiento de las concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ para cada uno de los siete días de la semana. En los dispositivos 1, 13, 23, 26, 27 y 28 se observaron concentraciones ligeramente mayores durante el fin de semana. Los demás dispositivos presentaron sus promedios más altos entre lunes y viernes (Figura 17). Estudios han reportado una notable disminución en las concentraciones de $PM_{2.5}$ en Bogotá y Medellín durante el fin de semana, esto asociado a una disminución en la circulación vehicular sumada a la reducción de las actividades industriales (Casallas et al., 2022; Huneus et al., 2020). Por el contrario, el municipio de La Ceja tiene una vocación turística y por lo tanto recibe un alto número de visitantes durante el fin de semana y no tiene industrias asentadas cerca a la cabecera municipal. Estas podrían ser algunas de las razones por las que este efecto de disminución esperado en el fin de semana no se presentó.

Figura 17

Diferencias en los promedios diarios de $PM_{2.5}$ según el día de la semana. La Ceja, diciembre 2021 a enero 1° de 2022



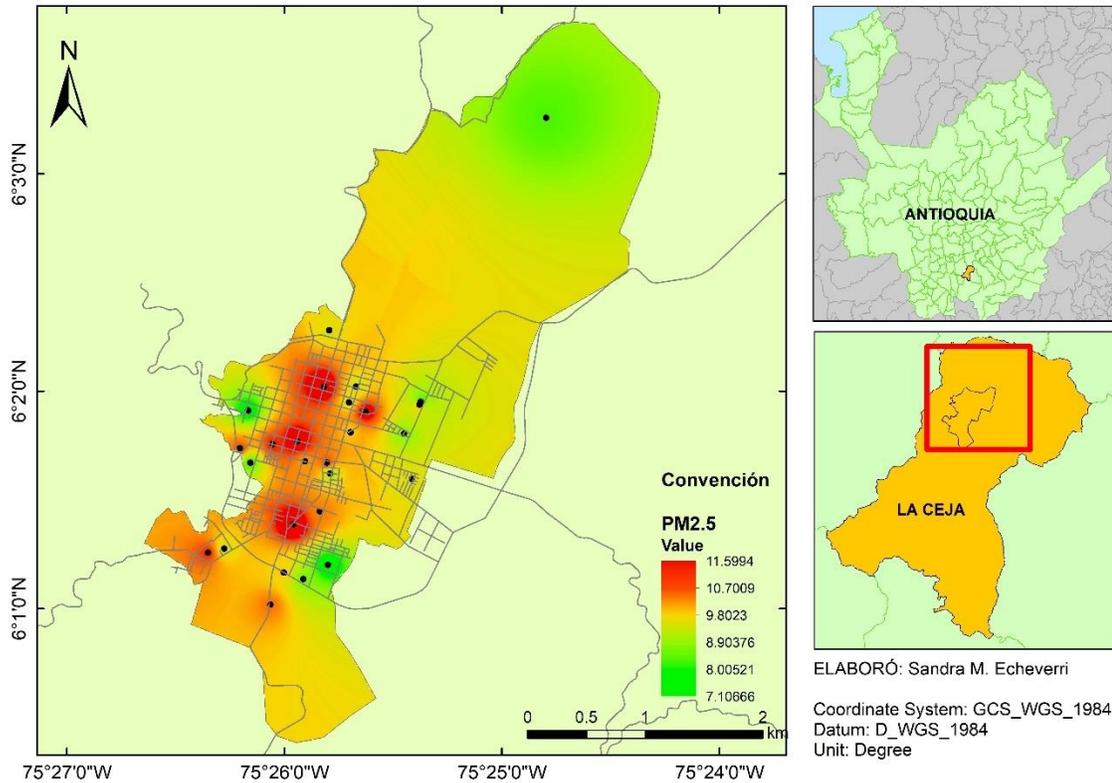
4.2.1 Análisis espaciales

Para analizar el comportamiento geoespacial del $PM_{2.5}$ en La Ceja se utilizó el programa ArcGIS® y el método de interpolación IDW. Aunque este método no proporciona errores estándar de predicción tiene como ventajas que puede usarse con datos espaciados con relativa uniformidad y con una adecuada densidad como los generados en esta investigación (Achilleos, 2008). Se utilizaron los promedios horarios de las concentraciones medidas por los dispositivos y la información de su localización. A partir de un mapa base del municipio se cartografió la concentración del contaminante a las 0:00 horas para el período de estudio incluyendo todos los sensores; en la zona urbana a las 0:00, 6:00, 12:00 y 18:00 durante el período de estudio, y también en la zona urbana para dos de los períodos críticos identificados: 31 de diciembre de 2021 - 1° de enero de 2022 y 31 de diciembre de 2022 - 1° de enero de 2023.

Inicialmente se analizaron los valores promedio (zona urbana y zona rural) de las 0:00 horas (Figura 18). Para este mapa se incluyeron todos los sensores, con el fin de identificar los patrones espaciales, teniendo en cuenta que, aunque los dispositivos no estuvieron en funcionamiento por el mismo período de tiempo, el análisis del ciclo diurno sugiere que no existe una variabilidad importante entre ellos.

Figura 18

Mapa de calor concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ entre diciembre 22 de 2021 a 1° de enero de 2023. Promedios para las 0:00 horas

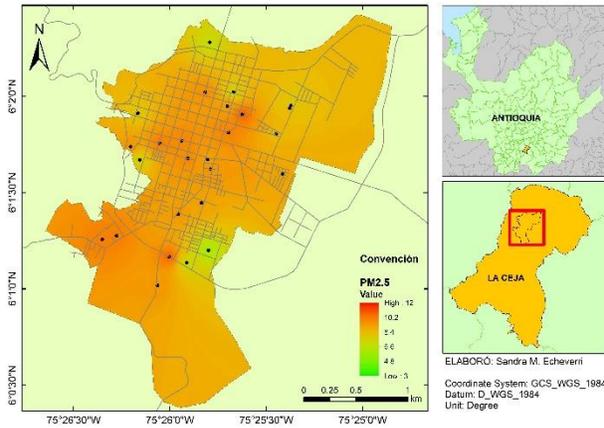


En este mapa inicial se incluyó el dispositivo 15 ubicado en la zona rural. Sin embargo, se observa como los puntos con mayores concentraciones están todos ubicados en el área urbana. Vale la pena notar que las concentraciones medidas no superan los $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Teniendo en cuenta lo retirado que está el dispositivo 15 de la zona urbana y que espacialmente podría incorporar valores poco adecuados, en los análisis de superficies espaciales que se presentan a continuación no se tuvieron en cuenta sus datos.

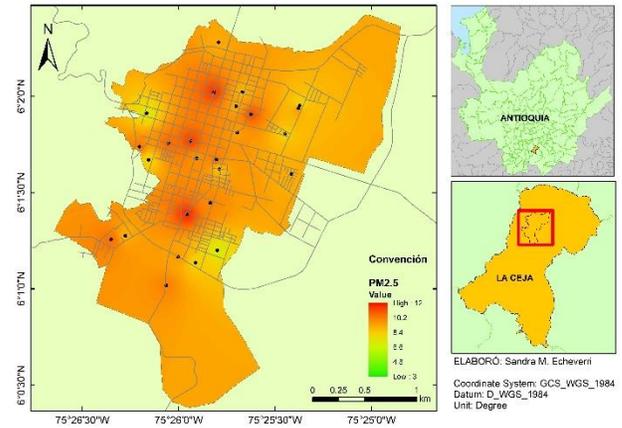
Se analizaron los valores promedio del contaminante en la zona urbana de todos los dispositivos cada 6 horas a las 0:00, 6:00, 12:00 y 18:00 durante el período de estudio (Figura 19).

Figura 19

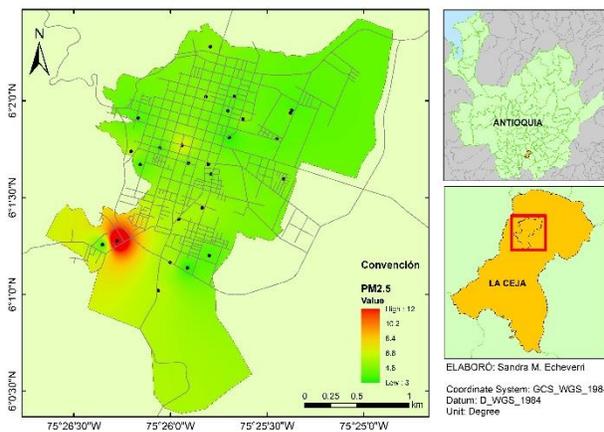
Mapas de calor concentraciones promedio de $\text{PM}_{2.5}$ para el período del 22 de diciembre de 2021 al 1° de enero de 2023. Promedios horarios a) 0:00, b) 6:00, c) 12:00, d) 18:00



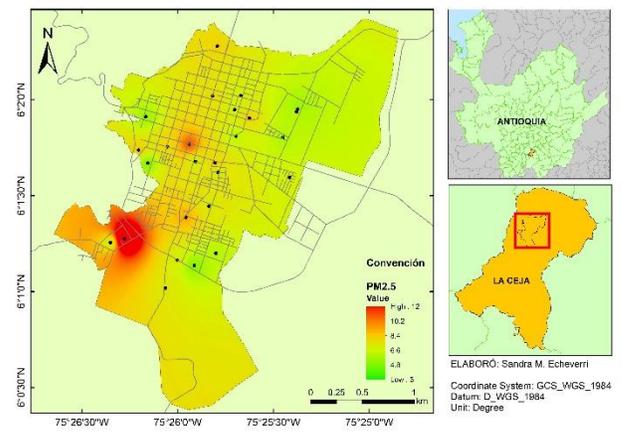
a)



b)



c)



d)

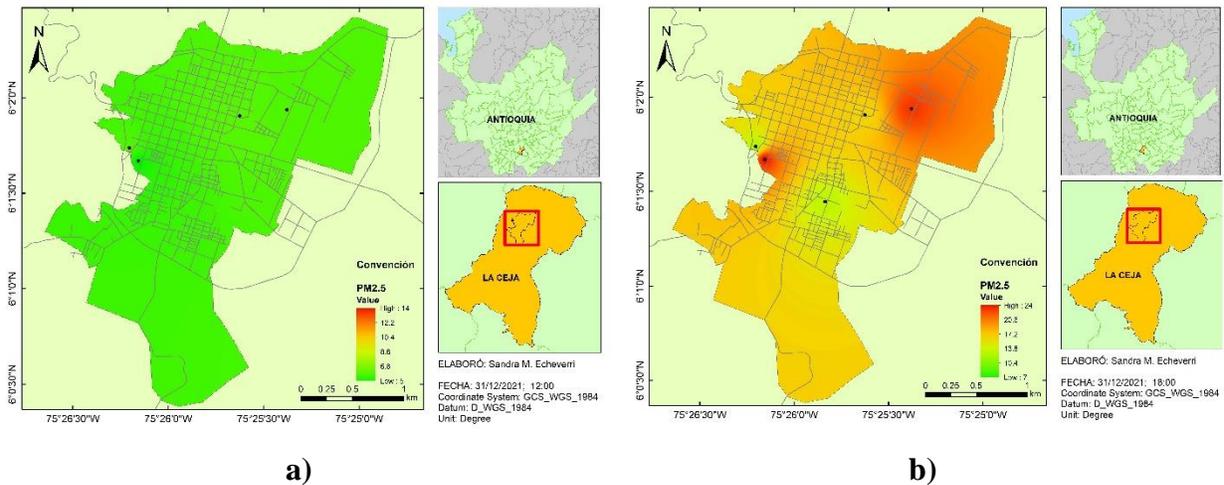
Al observar los mapas, se confirma que las mayores concentraciones espaciales se presentaron a las 6:00, con valores promedio que estuvieron por debajo de los $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, es importante mencionar que a las 0:00 la concentración es mayor en el sector La Aldea (dispositivo 28) y en la carrera 16 entre calles 20 y 21 (dispositivo 28). A las 6:00 se evidencian las más altas concentraciones cerca al parque principal (dispositivo 11), en una zona residencial ubicada en inmediaciones de la Central Integrada de Transporte (dispositivo 1), en la carrera 20 entre calles 23 y 24 (dispositivo 9) y en el sector del parque de La Cruz (dispositivo 14). En el horario de las 12:00, momento del día en el que disminuyen de manera generalizada las concentraciones de PM_{2.5}, el barrio Payuco (dispositivo 13) presentó la mayor concentración. A las 18:00 los valores más altos se observaron cerca al parque principal (dispositivos 11 y 12), cerca de la plaza de mercado (dispositivo 17) y nuevamente en el barrio Payuco (dispositivo 13). Uno de los factores que puede influir en el comportamiento espacial del contaminante es el tipo de

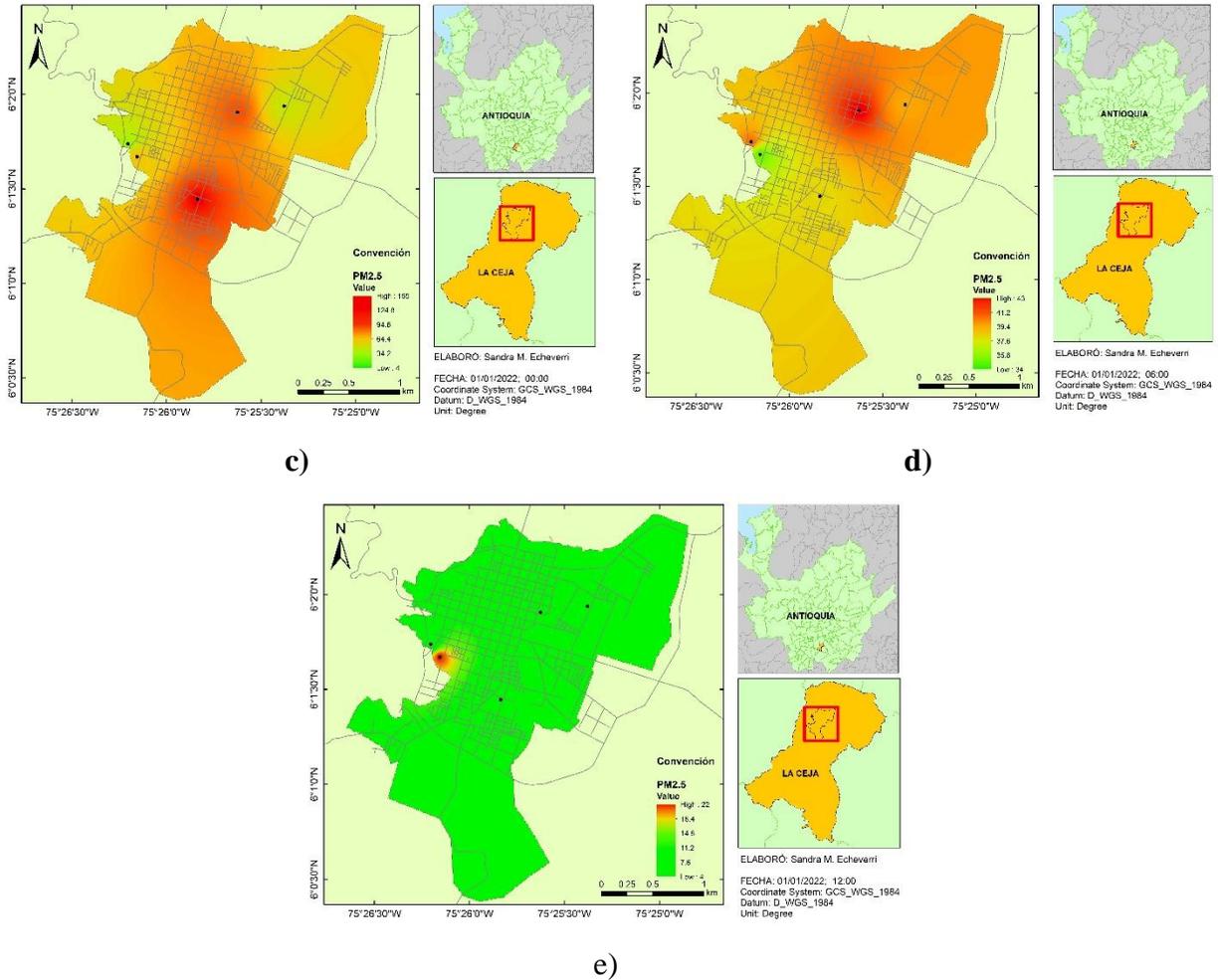
actividades que se desarrollan en cada sector y la dinámica de esas actividades en diferentes momentos de un día laboral regular. Zonas como el parque principal, las aledañas a la plaza de mercado y a la Central Integrada de Transporte sufren un notable cambio en su dinámica en horas de la mañana y al finalizar la tarde, ya que son momentos en los que hay un alto desplazamiento de personas en transporte público o privado para llegar hacia sus lugares de estudio, de trabajo o de regreso a su casa. Al igual que un mayor volumen de vehículos de carga que llevan productos a supermercados y otros centros de distribución.

Se cartografiaron también las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la zona urbana para dos casos de los períodos críticos identificados. En primer lugar, se analizaron los valores espaciales del 31 de diciembre de 2021 - 1° de enero de 2022 (Figura 20).

Figura 20

Mapas de calor concentraciones de $PM_{2.5}$ municipio de La Ceja. Promedios horarios a) 12:00, b) 18:00 diciembre 31 2021, c) 00:00, d) 6:00, e) 12:00 1° de enero 2022





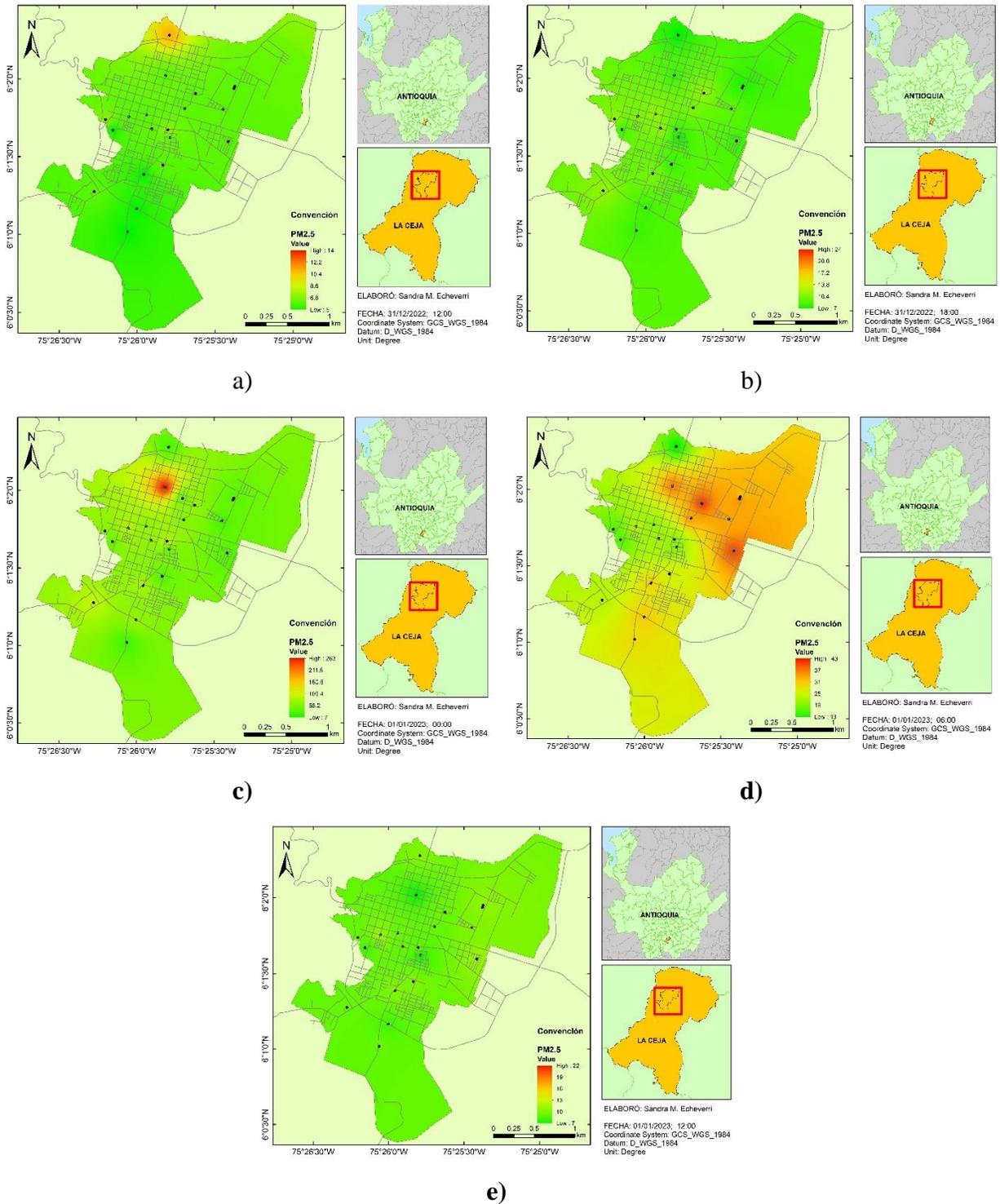
Nota: Se utilizaron escalas diferentes entre los mapas, para favorecer el contraste que permitiera la visualización de la evolución temporal y espacial en las concentraciones de PM_{2.5}.

Durante la celebración de fin de año del 2021 los sectores críticos fueron La Palma (dispositivo 2) y la zona cercana a la Central Integrada de Transporte (dispositivo 1). Estos dos sectores son residenciales. Como puede observarse, las concentraciones de PM_{2.5} presentaron una disminución generalizada a las 12:00 del 1° de enero de 2022. Cabe aclarar que, para esta fecha, solo estaban en funcionamiento cinco dispositivos.

El segundo caso analizado corresponde a los valores espaciales del 31 de diciembre de 2022 - 1° de enero de 2023. Estos valores se observan en la Figura 21.

Figura 21

Mapas de calor concentraciones de $PM_{2.5}$ municipio de La Ceja. Promedios horarios a) 12:00, b) 18:00 diciembre 31 2022, c) 00:00, d) 6:00, e) 12:00 1° de enero 2023



Nota: Se utilizaron escalas diferentes entre los mapas, para favorecer el contraste que permitiera la visualización de la evolución temporal y espacial en las concentraciones de $PM_{2.5}$.

Para el año 2022, el patrón espacial es similar al del 2021. En general, los sectores más críticos son los residenciales. Resulta importante aclarar que para esta fecha se tenía un mayor número de dispositivos, lo que favoreció el análisis del comportamiento del PM_{2.5}. Sin embargo, esa noche, se alcanzaron concentraciones horarias que superaron los 250 µg/m³ en la carrera 20 entre las calles 23 y 24 (dispositivo 9).

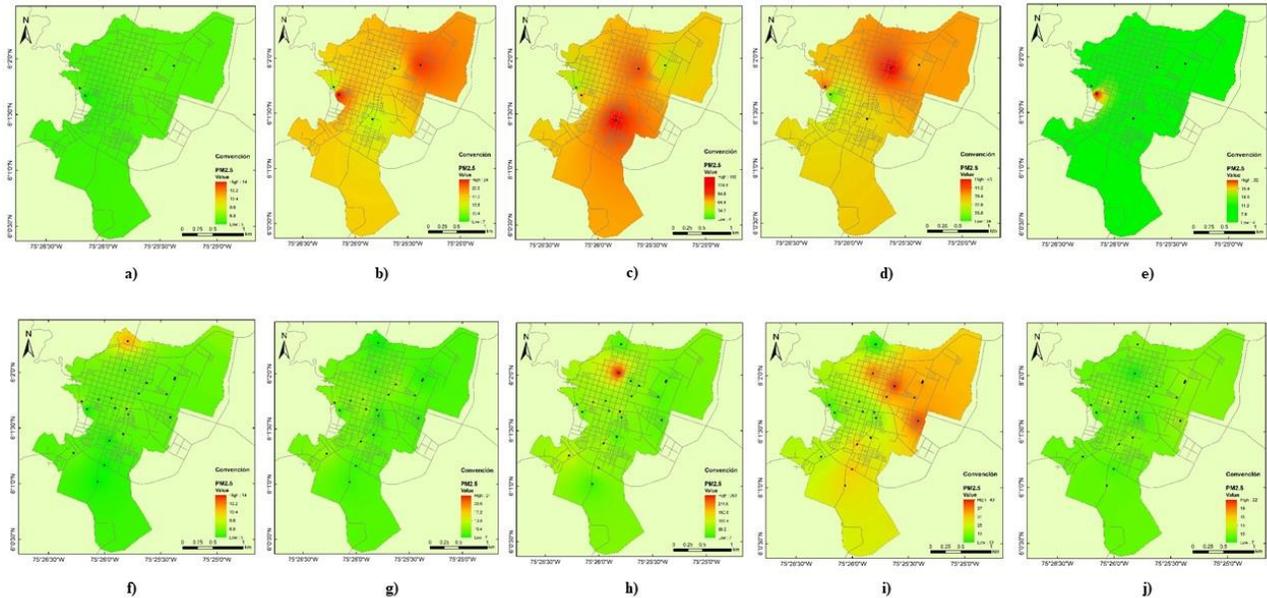
En la zona urbana de La Ceja, las celebraciones decembrinas son generalmente familiares, se llevan a cabo en los barrios e incluyen actividades que se desarrollan en exteriores haciendo uso de la vía pública. Esto explica que, en la noche de año nuevo, las mayores concentraciones de PM_{2.5} se presentaron en sectores residenciales. En otros países de LAyC como Guatemala y Perú también se reporta un aumento en el uso de material pirotécnico en el mes de diciembre asociado a las festividades de navidad y fin de año (Calderón Bancayan, 2020; Sarceño Zepeda, 2021).

Como ya se mencionó, el uso indiscriminado de pólvora constituye un factor de riesgo para la salud. En Bogotá y Cartagena se ha reportado que entre el 3% y el 4% de las quemaduras atendidas en los hospitales son producto del uso de pólvora y que la mayoría de estos casos ocurren en barrios con alta densidad poblacional en los meses de diciembre y enero (Gaviria Castellanos et al., 2019; Herazo Beltran et al., 2015; Montealegre Gomez et al., 2021). En el área metropolitana del Valle de Aburrá, durante las fiestas decembrinas se han encontrado las más altas concentraciones de PM_{2.5} en las comunas con mayor densidad poblacional (Hoyos et al., 2020).

Al comparar la información de las celebraciones de fin de año de 2021 y 2022, resulta evidente que el mayor número de dispositivos en funcionamiento en 2022 favoreció una mejor caracterización espacial del comportamiento del PM_{2.5}. Se realizó una comparación espacial de los dos casos mencionados. Con esta comparación se confirma que para ambos períodos se presentó un pico en las concentraciones justo después de la media noche y que las concentraciones alcanzaron niveles cercanos al promedio hacia el mediodía del siguiente día (Figura 22).

Figura 22

Comparativo mapas de calor concentraciones de $PM_{2.5}$ municipio de La Ceja. Promedios horarios: a) 12:00 y b) 18:00 diciembre 31 2021, c) 00:00, d) 6:00, e) 12:00 1° de enero 2022 f) 12:00 y g) 18:00 diciembre 31 2022, h) 00:00, i) 6:00, j) 12:00 1° de enero 2023



Nota: Se utilizaron escalas diferentes en los mapas de las 0:00, considerando que en 2022 se presentaron concentraciones mayores, para favorecer la mejor visualización de la evolución temporal y espacial del $PM_{2.5}$.

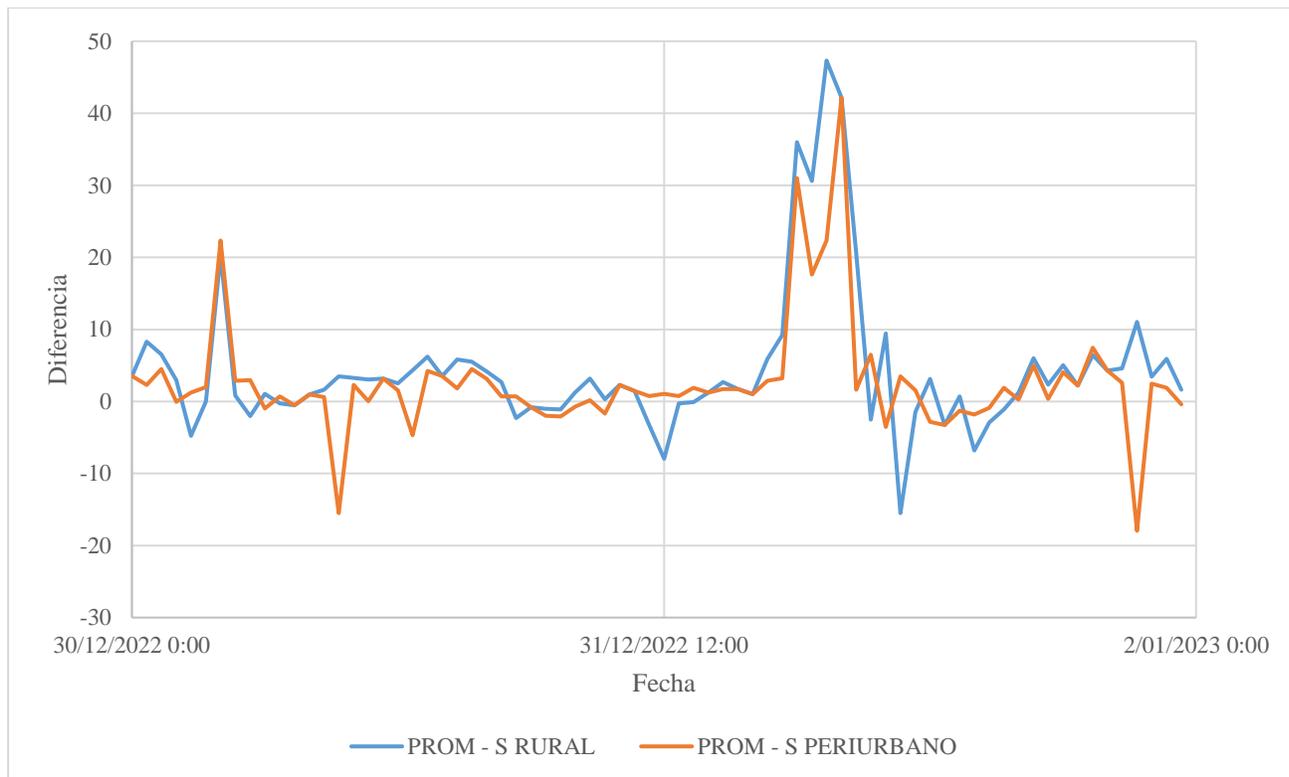
Un estudio publicado por Hoyos et al. (2020) incluyó entre otros, datos de material particulado medidos por la Red de Ciudadanos Científicos del SIATA. Estos autores resaltan que, debido a la alta densidad de esta red, fue posible caracterizar de manera adecuada la variabilidad espacio temporal del contaminante durante La Alborada y en la media noche de fin de año en 2018 en Medellín y su área metropolitana. Una de las mayores fortalezas de las redes ciudadanas con dispositivos de bajo costo, la constituye la ampliación de la cobertura de monitoreo como pudo evidenciarse con esta investigación.

En términos de las diferencias espaciales mencionadas al inicio de esta sección, se evidenció como los valores medidos en la zona rural son más bajos que los de la zona urbana. Con el fin de confirmar esto, se calcularon las diferencias entre los dispositivos 15, instalado en la zona rural de La Ceja -vereda El Capiro- y 27 ubicado, en zona periurbana -sector El Tambo- con el promedio de los dispositivos de la zona urbana entre el 30 de diciembre de 2022 y el 1° de enero de 2023 (Figura 23). Se evaluó la diferencia para este período de tiempo considerando que se contaba con más del 75% de los datos medidos de la mayoría de los sensores urbanos, del sensor periurbano y

del sensor rural. Se propuso este análisis con el fin de evidenciar diferencias espaciales en el comportamiento del contaminante generadas por el uso extendido de pólvora el 31 de diciembre y el 1° de enero.

Figura 23

Diferencias en promedios horarios entre dispositivos de la zona urbana y el dispositivo 27 ubicado en zona periurbana (línea naranja) y el dispositivo 15 ubicado en zona rural de La Ceja (línea azul). 30 de diciembre de 2022 a 1° de enero de 2023



Como se observa en la figura anterior, las diferencias más altas con los dispositivos de la zona urbana se presentaron en la noche del 31 de diciembre. Estas diferencias son mayores en el dispositivo 15 que en el 27. Estos resultados sugieren que el $PM_{2.5}$ en la noche del 31 de diciembre se concentró en el área urbana y que posiblemente, la influencia y uso de material pirotécnico en la zona periurbana y rural es menor. Sin embargo, en la mañana y al medio día del 1° de enero se presentaron valores más altos para el dispositivo 15. En la tarde del 30 de diciembre y en la noche del primero de enero, los valores medidos por el dispositivo 27 superaron el promedio de los dispositivos urbanos. Exceptuando los momentos de la media noche del 31 de diciembre, para este

período analizado no se evidencia una diferencia notoria que permita afirmar que se presentaron menores concentraciones de $PM_{2.5}$ en el sector periurbano y rural respecto a la zona urbana.

Así mismo, suponiendo normalidad de los datos se usó la prueba t-Student con el fin de identificar las diferencias entre las medias de los dispositivos urbanos con los dispositivos S15 y S27. Los resultados de esta prueba pueden observarse en la Tabla 11.

Tabla 11

Resultados de la prueba t-Student para determinar la diferencia de medias entre los sensores urbanos, el sensor rural (S15) y el sensor periurbano (S27) para el período entre las 0:00 horas del 30 de diciembre de 2022 y las 23:00 horas del 1° de enero de 2023

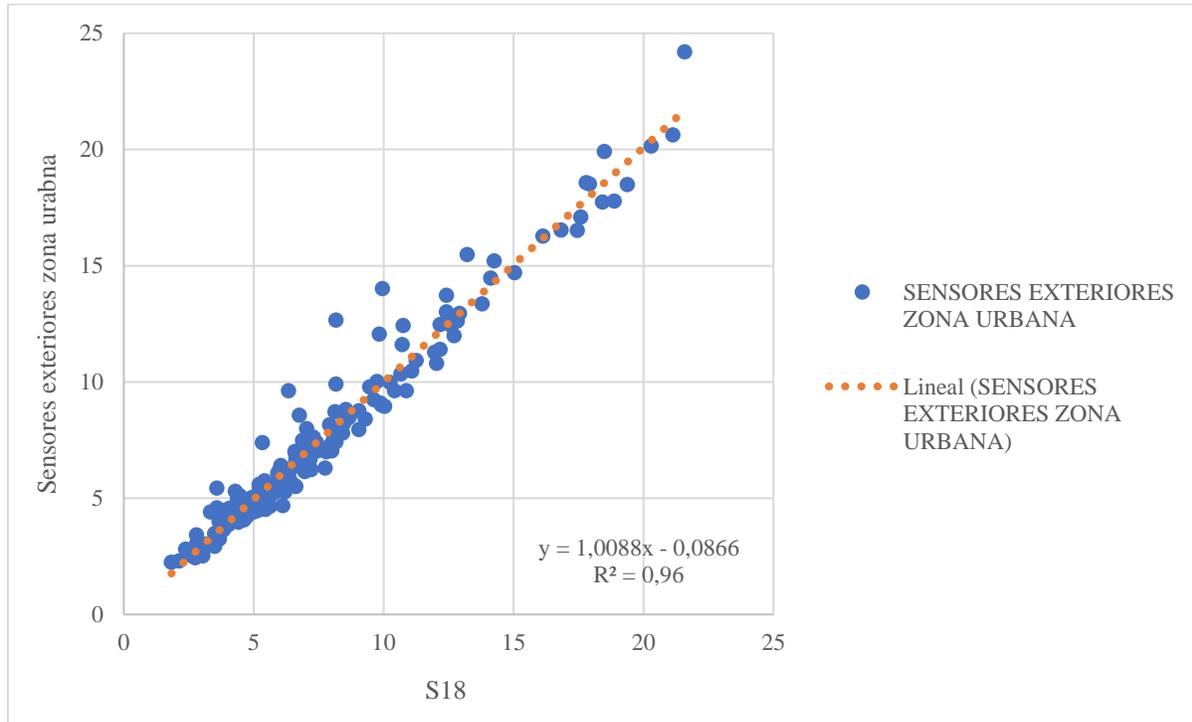
Variables	Valor <i>p</i>
S15 - Sensores urbanos	0,0003
S27 - Sensores urbanos	0,0006
S15 - S27	0,034

Los resultados obtenidos con la prueba t-Student, sugieren diferencias significativas entre las medias del sensor rural (S15) y del sensor periurbano (S27) y los sensores urbanos, y entre el sensor rural (S15) y el sensor periurbano (S27). Para los dos primeros casos la media de los sensores urbanos es mayor y para el tercero es mayor la media del sensor periurbano.

Por otro lado, como se mencionó al inicio, solo uno de los dispositivos (18) fue ubicado al interior de una institución, la cual cuenta con un patio de una gran área en su interior. Este dispositivo es el del Centro de Bienestar del Anciano de La Ceja ubicado sobre la carrera 20 entre calles 16 y 17 a solo dos cuadras del parque principal y en un sector con alto tráfico. Buscando evaluar el nivel de riesgo de exposición para las personas adultas que habitan este lugar, se analizaron sus valores respecto al valor promedio de los dispositivos urbanos. En la Figura 24 se puede observar el diagrama de dispersión de los promedios diarios de este dispositivo y el valor promedio calculado para los demás dispositivos urbanos. El valor del R^2 es de 0,96 lo que confirma que los valores medidos son muy similares entre sí y que, en este sitio, el nivel de exposición intramural es similar al nivel de exposición en exteriores.

Figura 24

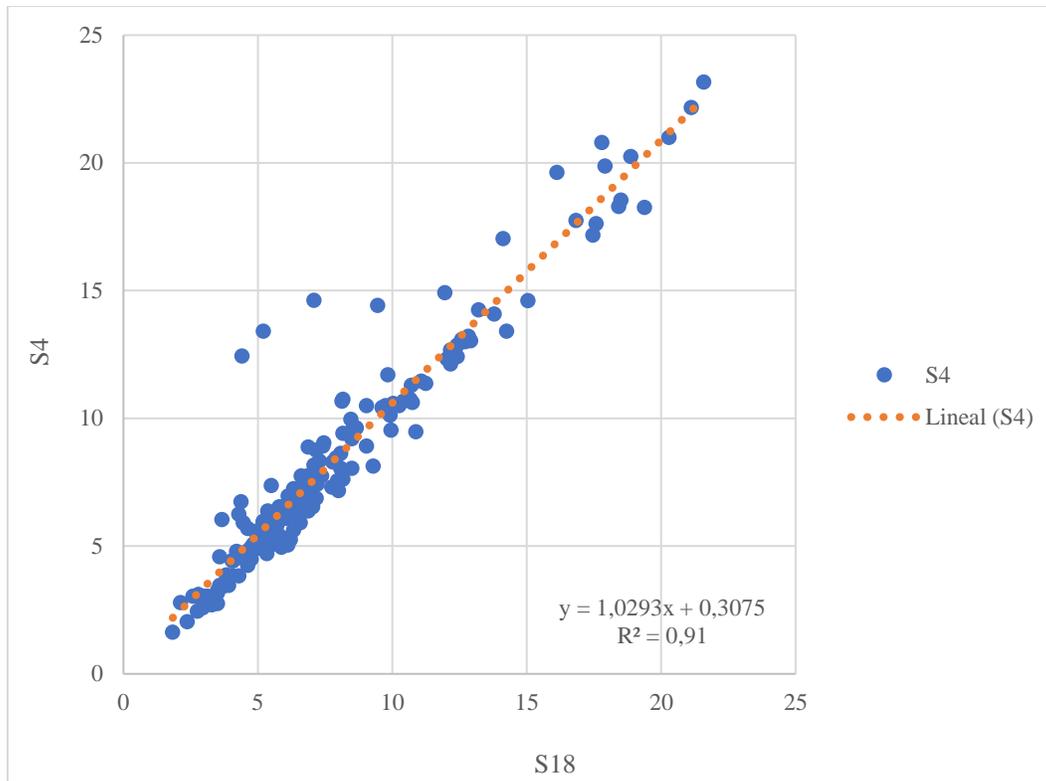
Diagrama de dispersión promedios diarios sensor 18 instalado en el interior del Centro de Bienestar del Anciano y dispositivos urbanos instalados en exteriores. La Ceja, julio 15 de 2022 a enero 1° de 2023



Adicionalmente, se compararon los valores medidos por el dispositivo intramural (18) con los medidos por el dispositivo más cercano instalado en exteriores (4). Este dispositivo está instalado en la carrera 18 entre calles 16A y 16B. El diagrama de dispersión puede observarse en la Figura 25.

Figura 25

Diagrama de dispersión promedios diarios sensor 18 instalado en el interior del Centro de Bienestar del Anciano y dispositivo instalado en exterior más cercano (S4). La Ceja, julio 15 de 2022 a enero 1° de 2023



Se evidencia una correlación positiva entre los datos medidos por ambos dispositivos, con lo cual se confirma que no existen diferencias notables entre la exposición intramural y extramural en este sector de la zona centro del municipio.

4.3 Resultados de las encuestas

4.3.1 Caracterización de la población: Encuestas iniciales

El análisis de las respuestas a las encuestas iniciales permitió la caracterización demográfica de los participantes y la identificación de antecedentes y hábitos de riesgo. Se aclara que para el caso del dispositivo 18 ubicado en el Centro de Bienestar del Anciano, no se diligenciaron encuestas.

La distribución de frecuencias en las encuestas iniciales puede observarse en la Tabla 12. Para el grupo de personas con dispositivos a cargo, se reportó que el número máximo de personas en el hogar es cinco. Entre las personas en edad de riesgo el 77% son mayores de 60 años y el 23%

menores de 5 años. Solo uno de los participantes es fumador y quince reportaron consumo esporádico de bebidas alcohólicas. Para el grupo de personas sin dispositivos a cargo, se encontró que el número máximo de personas en el hogar es cinco, el porcentaje de personas en edad de riesgo es 32%, de los cuales el 88% son mayores de 60 años y el 13% menores de 5 años. Uno de los participantes relató que consume cigarrillo y doce reportaron consumo esporádico de alcohol.

Tabla 12

Resumen de distribución de frecuencias encuestas iniciales de estado de salud a) Participantes con dispositivos a cargo, b) Participantes sin dispositivos a cargo

Características demográficas	Porcentaje	Características demográficas	Porcentaje
<i>Sexo</i>		<i>Sexo</i>	
Mujeres	52%	Mujeres	81%
Hombres	48%	Hombres	19%
<i>Edad</i>		<i>Edad</i>	
18-25 años	24%	18-25 años	38%
26-40 años	68%	26-40 años	50%
41 a 60 años	4%	41 a 60 años	6%
61 años o más	4%	61 años o más	6%
<i>Escolaridad</i>		<i>Escolaridad</i>	
Bachillerato	5%	Bachillerato	13%
Técnico	4%	Técnico	19%
Profesional	9%	Profesional	56%
Posgrado	7%	Posgrado	13%
<i>Personas en edad de riesgo en el hogar</i>		<i>Personas en edad de riesgo en el hogar</i>	
Si	52%	Si	32%
No	48%	No	68%
Antecedentes médicos y hábitos	Porcentaje	Antecedentes médicos y hábitos	Porcentaje
<i>Tratamiento médico actual</i>		<i>Tratamiento médico actual</i>	
Si	12%	Si	24%
No	88%	No	76%
<i>Antecedentes médicos</i>		<i>Antecedentes médicos</i>	
Rinitis	41%	Rinitis	24%
Asma	5%	Asma	14%
Enfermedad respiratoria	36%	Enfermedad respiratoria	24%
Hipertensión arterial	5%	Hipertensión arterial	5%
Alergias	14%	Alergias	10%
<i>Realiza actividad física</i>		<i>Realiza actividad física</i>	
Si	80%	Si	75%
No	20%	No	

Espacio donde realiza actividad física

Aire libre	65%
Espacio cerrado	35%

a)

Espacio donde realiza actividad física

Aire libre	58%
Espacio cerrado	42%

b)

Aunque en ambos grupos el mayor porcentaje de participantes está entre los 26 y 40 años, se logró la participación de ciudadanos desde los 18 y hasta los 61 años o más. El antecedente médico respiratorio más frecuente fue la rinitis y entre los alérgenos reportados, los más comunes fueron el polvo, los medicamentos y los gatos. En general, los participantes relataron un buen estado de salud al iniciar el estudio y un alto compromiso con sus controles médicos.

4.3.2 Encuestas finales

Al concluir el estudio, los participantes diligenciaron las encuestas finales (ver Tabla 13). El objetivo de la recolección de esta información fue evaluar la ocurrencia de enfermedades respiratorias durante el desarrollo de la investigación que pudieran asociarse a condiciones de contaminación atmosférica y la adquisición o cambio de hábitos.

Tabla 13

Resumen de distribución de frecuencias encuestas finales de estado de salud participantes a) Con dispositivos a cargo, b) Sin dispositivos a cargo

Antecedentes médicos y hábitos	Porcentaje	Antecedentes médicos y hábitos	Porcentaje
Tratamiento médico actual	10%	Tratamiento médico actual	44%
Rinitis	40%	Rinitis	29%
Enfermedad respiratoria	32%	Asma	7%
COVID-19	12%	Enfermedad respiratoria	43%
Alergias	12%	COVID-19	14%
Realiza actividad física	90%	Realiza actividad física	78%
Actividad física al aire libre	67%	Actividad física al aire libre	43%
Actividad física espacio cerrado	33%	Actividad física espacio cerrado	57%

a)

b)

Solo veinte de los participantes del grupo con dispositivos a cargo respondieron la encuesta final. Se reportaron tres casos de COVID-19 diagnosticados durante el período de estudio, no se

reportaron casos de afecciones cardiacas, diagnósticos nuevos de condiciones crónicas como hipertensión ni cambio de hábitos.

Nueve de los participantes del grupo sin dispositivos a cargo respondieron la encuesta final. Se reportó el diagnóstico de dos casos de COVID-19 durante el período de estudio, no se reportaron casos de afecciones cardiacas, diagnósticos nuevos de condiciones crónicas como hipertensión ni cambio de hábitos.

Respecto a estas encuestas, dos asuntos deben resaltarse. Primero, la participación en el diligenciamiento fue reducida en ambos grupos, lo que pudo estar relacionado con la fecha en la que fueron enviadas (10 de enero). Considerando que probablemente algunas personas estaban disfrutando de sus vacaciones en ese momento, se decidió enviar un recordatorio con el enlace a la encuesta el 16 de enero. Se recibió la respuesta de 8 encuestas adicionales para el grupo con dispositivos a cargo y 5 para el grupo sin dispositivos a cargo. En segundo lugar, es común que durante este tipo de ejercicios de participación algunas personas experimenten desánimo y falta de motivación razón por la cual disminuye su colaboración a lo largo del tiempo.

En general, no se presentaron alteraciones en el estado de salud de los participantes durante el período de estudio que pudieran relacionarse con la contaminación atmosférica. No obstante, se evidenció que son comunes antecedentes médicos como asma, rinitis, alergias respiratorias e hipertensión que constituyen un factor de riesgo que debe ser considerado para reconocer la importancia de implementar estrategias de educación en salud para la población.

4.3.3 Percepción estado de salud y calidad del aire

Con respecto a las encuestas semanales en donde se evaluó la percepción de la salud y de la calidad del aire, los resultados se pueden observar en la Tabla 14.

Tabla 14

Resumen de distribución de frecuencias encuestas de percepción participantes a) Con dispositivos a cargo; b) Sin dispositivos a cargo

Atributo	Percepción estado de salud**	Percepción calidad del aire**
Bueno	(390) 82% ± 0,02%	(375) 79.3% ± 0,02%
Regular	(75) 16% ± 0.02%	(96) 20.3% ± 0,02%
Malo	(8) 2% ± 0,006%	(2) 0.4% ± 0,003%
Totales	(473)	(473)

Atributo	Percepción estado de salud**	Percepción calidad del aire**
Bueno	(225) 69% ± 0,03%	(192) 59% ± 0,03%
Regular	(93) 29% ± 0,02%	(121) 37% ± 0,03%
Malo	(7) 2% ± 0,008%	(12) 3.7% ± 0,01%
Totales	(325)	(325)

Atributo	Momento del día con mejor calidad del aire**
Mañana	(310) 66% ± 0,02%
Tarde	(84) 18% ± 0,02%
Noche	(79) 17% ± 0,01%
Totales	(473)

Atributo	Momento del día con mejor calidad del aire
Mañana	(239) 74% ± 0,02%
Tarde	(24) 7% ± 0,01%
Noche	(62) 19% ± 0,02%
Totales	(325)

a)

b)

**Intervalo de confianza 95%

Como puede observarse, en este estudio no se presentaron diferencias notables en la percepción de salud entre los dos grupos de participantes (con y sin dispositivos). En un alto porcentaje esta percepción se calificó como buena (82% participantes con dispositivos a cargo y 69% participantes sin dispositivos a cargo). Con respecto a la calidad del aire, fue considerada como buena en un mayor porcentaje, aunque algunos participantes la percibieron como regular (20,3% en el grupo con dispositivos a cargo y 37% en el grupo sin dispositivos a cargo). El 66% en el grupo con dispositivos a cargo y el 74% en el grupo sin dispositivos a cargo considera que el momento del día con mejor calidad del aire son las mañanas.

En la antropología ambiental, la percepción es una herramienta que favorece el análisis y el acercamiento a la comprensión de las relaciones del ser humano con y en su entorno. La percepción es diversa, tiene componentes sociales y culturales lo que la acerca más a lo vivencial que a lo teórico (Ruiz-Ballesteros & Valcuende del Río, 2020). Cuando se ponen en consideración riesgos ambientales, la percepción puede determinar comportamientos y decisiones que generen acciones con consecuencias en el estado de salud (Esquivel-Ferriño et al., 2018).

Los participantes de esta investigación reconocieron varios de los síntomas que se asocian al deterioro de la calidad del aire como ardor en los ojos, rinitis, dolor de garganta y ansiedad (Díaz Garrido et al., 2019; Li et al., 2020; Mandell et al., 2020; Oyarzún G. & Valdivia C., 2021; Yolton et al., 2019). Las personas que podían acceder a los datos medidos por los dispositivos en tiempo real, no reportaron en las encuestas alteraciones en la percepción de su estado de salud y de la calidad del aire durante los períodos en los que se observaron concentraciones de PM_{2.5} que

superaron los valores promedio. Así mismo, la mayoría de los participantes consideró las horas de la mañana como el momento con mejor calidad del aire. Esta percepción no se ajusta a los hallazgos del análisis temporal de los datos que confirmaron que las concentraciones más altas de PM_{2.5} se presentan entre las 4:00 y las 8:00 horas.

4.3.4 Relación entre los datos medidos de PM_{2.5} y los resultados de las encuestas de percepción ciudadana de la salud

Con los resultados de las encuestas de percepción de la salud y los datos medidos de PM_{2.5} por los dispositivos, se realizó un análisis de regresión logística en el que la percepción del estado de salud se incluyó como variable respuesta. A continuación, se presentan los análisis para las personas con y sin dispositivos a cargo.

4.3.4.1 Participantes con dispositivos a cargo

Los resultados de la regresión logística para los participantes con dispositivos a cargo están en la Tabla 15. Se presentan los resultados para cada una de las variables respuesta. En las columnas, valores de OR iguales a 1 significan ausencia de asociación, valores de OR mayores a 1 significan que existe una asociación positiva y valores de OR menores a 1 significan que la asociación es negativa. Un valor p inferior a 0,05 es estadísticamente significativo y un resultado del test de Wald inferior a 0,05 confirma la representatividad de las variables. Finalmente, pueden observarse los valores inferior y superior del intervalo de confianza. Como puede evidenciarse, la presencia de síntomas y la percepción de una mala calidad del aire tienen una asociación positiva con la percepción del estado de salud (OR 135,91, valor p <0.001 y OR 4,68, valor p <0.033 respectivamente). Los encuestados que respondieron que percibían una buena calidad del aire tenían menos probabilidades de percibir cambios asociados en su estado de salud. La concentración de PM_{2.5} es la que tiene una menor asociación con la percepción del estado de salud (OR 1,03 y p 0,25). Las demás variables, tampoco tuvieron significancia estadística.

Tabla 15

Resultados del modelo de regresión logística que se implementó para analizar la asociación de diversos factores con la percepción de salud. Casos participantes con dispositivos a cargo

VARIABLE	OR	ERROR ESTÁNDAR	WALD	VALOR P	I.C. 95%	
					Inferior	Superior
Concentraciones PM _{2.5}	1,03	0,062	0,254	0,252	0,96	1,1
Presencia de síntomas ^a						
<i>Si</i>	135,91	0,62	<0,001	<0,001	41,58	444,31
Visitas al médico durante la semana ^b						
<i>No</i>	3,54	0,52	0,879	0,878	1,58	7,96
Síntomas otras personas en el hogar ^b						
<i>No</i>	2,84	0,38	0,27	0,269	1,66	4,84
Percepción calidad del aire ^c						
<i>Regular</i>	7,34	2,4	0,301	0,033	0,45	119,47
<i>Mala</i>	4,68	0,4	0,017		2,79	7,87
Momento del día con mejor calidad del aire ^d						
<i>Tarde</i>	3,11	0,44	0,236	0,219	1,74	5,56
<i>Noche</i>	1,83	0,5	0,114		0,99	3,41

Nota. a. Se tomó NO como categoría de referencia

b. Se tomó SI como categoría de referencia

c. Se tomó BUENA como categoría de referencia

d. Se tomó MAÑANA como categoría de referencia

4.3.4.2 Participantes sin dispositivos a cargo

Se analizaron tres casos relacionados con las personas sin dispositivos a cargo. Esto con el fin de encontrar posibles relaciones espaciales entre los valores medidos y las encuestas realizadas.

✓ CASO 1

Los resultados de la regresión logística para el Caso 1 participantes sin dispositivos a cargo se pueden visualizar en la Tabla 16. Para este caso, se utilizaron los promedios semanales de PM_{2.5} de todos los dispositivos en funcionamiento. Se observa una asociación positiva de la presencia de síntomas (OR 103,14 y valor $p < 0.001$), la percepción de la calidad del aire (OR 5,08 y valor $p 0,036$) y el momento del día con mejor calidad del aire (OR 1,3 y valor $p 0,022$) en la percepción del estado de salud de los participantes. Los encuestados que respondieron que percibían una mala

calidad del aire y aquellos que consideraban que el momento del día con mejor calidad del aire es la tarde tenían mayores probabilidades de percibir cambios asociados en su estado de salud. Las demás variables explicativas incluida la concentración de PM_{2.5} no tuvieron significancia estadística (valor *p* entre 0,4 y 0,5).

Tabla 16

Resultados del modelo de regresión logística que se implementó para analizar la asociación de diversos factores con la percepción de salud. Caso 1 participantes sin dispositivos a cargo

VARIABLE	OR	ERROR ESTÁNDAR	WALD	VALOR P	I.C. 95%	
					Inferior	Superior
Concentraciones PM _{2.5}	0,98	0,05	0,553	0,551	0,91	1,06
Presencia de síntomas ^a						
<i>Si</i>	103,14	0,63	<0,001	<0,001	39,14	271,78
Visitas al médico durante la semana ^b						
<i>No</i>	1,87	0,64	0,553	0,54	0,89	3,93
Síntomas otras personas en el hogar ^b						
<i>No</i>	2,42	0,49	0,5	0,49	1,31	4,47
Percepción calidad del aire ^c						
<i>Regular</i>	7	0,73	0,568	0,036	2,09	23,44
<i>Mala</i>	5,08	0,41	0,001		3,02	8,56
Momento del día con mejor calidad del aire ^d						
<i>Tarde</i>	1,3	0,70	0,02	0,022	0,72	2,35
<i>Noche</i>	0,97	0,74	0,56		0,39	2,45

Nota. a. Se tomó NO como categoría de referencia

b. Se tomó SI como categoría de referencia

c. Se tomó BUENA como categoría de referencia

d. Se tomó MAÑANA como categoría de referencia

✓ CASO 2

Para este caso se definieron tres zonas del municipio considerando sus características urbanísticas y de infraestructura de servicios y se calculó el promedio semanal de PM_{2.5} para los dispositivos ubicados en cada una de ellas. En el análisis se consideraron para cada participante los promedios semanales de la zona en la que está ubicada su residencia. Para conocer las zonas definidas se puede revisar la Figura 5. Como ocurrió en el caso anterior, se observó un efecto de la

presencia de síntomas (OR 102,06 y valor $p < 0.001$), la percepción de la calidad del aire (OR 7 y valor $p 0,036$) y el momento del día con mejor calidad del aire (OR 1,32 y valor $p 0,022$) en la percepción del estado de salud. Los participantes que percibieron una mala calidad del aire y quienes percibieron que el momento del día con mejor calidad del aire son las tardes tenían mayores probabilidades de percibir alteraciones en su estado de salud. Las concentraciones de PM_{2.5} son las que tienen una menor asociación con la percepción del estado de salud (OR 0,98 – Valor $P 0,95$). Ver Tabla 17.

Tabla 17

Resultados del modelo de regresión logística que se implementó para analizar la asociación de diversos factores con la percepción de salud. Caso 2 participantes sin dispositivos a cargo

VARIABLE	OR	ERROR ESTÁNDAR	WALD	VALOR P	I.C. 95%	
					Inferior	Superior
Concentraciones PM _{2.5}	0,98	0,03	0,95	0,95	0,92	1,04
Presencia de síntomas ^a						
<i>Si</i>	102,06	0,63	<0.001	<0.001	38,72	268,97
Visitas al médico durante la semana ^b						
<i>No</i>	1,89	0,63	0,553	0,54	0,9	3,98
Síntomas otras personas en el hogar ^b						
<i>No</i>	2,32	0,49	0,5	0,49	1,25	4,31
Percepción calidad del aire ^c						
<i>Regular</i>	7	0,73	0,568	0,036	2,09	23,44
<i>Mala</i>	5	0,41	0,001		2,97	8,42
Momento del día con mejor calidad del aire ^d						
<i>Tarde</i>	1,32	0,70	0,02	0,022	0,73	2,38
<i>Noche</i>	0,99	0,72	0,56		0,39	2,49

Nota. a. Se tomó NO como categoría de referencia

b. Se tomó SI como categoría de referencia

c. Se tomó BUENA como categoría de referencia

d. Se tomó MAÑANA como categoría de referencia

✓ CASO 3

En este caso, se seleccionó el dispositivo más cercano a la residencia de cada uno de los participantes y con los datos medidos por el dispositivo seleccionado se calculó el promedio semanal de PM_{2.5}.

Como se evidencia, la presencia de síntomas (OR 73,82 y valor $p < 0.001$), la percepción de la calidad del aire (OR 4,9 y valor $p 0,05$) y el momento del día con mejor calidad del aire (OR 1,2 y $p 0,049$) tienen efecto en la percepción del estado de salud. Quienes respondieron que percibían una mala calidad del aire y que identificaron la tarde como el momento del día con mejor calidad del aire tenían una probabilidad mayor de percibir cambios asociados en su estado de salud. Para este caso, las concentraciones de PM_{2.5} y las demás variables no tuvieron significancia estadística (Ver Tabla 18).

Tabla 18

Resultados del modelo de regresión logística que se implementó para analizar la asociación de diversos factores con la percepción de salud. Caso 3 participantes sin dispositivos a cargo

VARIABLE	OR	ERROR ESTÁNDAR	WALD	VALOR P	I.C. 95%	
					Inferior	Superior
Concentraciones PM _{2.5}	0,97	0,06	0,545	0,54	0,9	1,06
Presencia de síntomas ^a						
<i>Si</i>	73,82	0,64	<0.001	<0.001	27,31	199,54
Visitas al médico durante la semana ^b						
<i>No</i>	2,14	0,70	0,47	0,46	0,93	4,91
Síntomas otras personas en el hogar ^b						
<i>No</i>	2,05	0,54	0,54	0,54	0,99	4,22
Percepción calidad del aire ^c						
<i>Regular</i>	7,15	0,76	0,68	0,05	2,01	25,44
<i>Mala</i>	4,9	0,45	0,018		2,67	9,01
Momento del día con mejor calidad del aire ^d						
<i>Tarde</i>	1,2	0,74	0,042	0,049	0,59	2,43
<i>Noche</i>	0,92	0,78	0,41		0,32	2,65

Nota. a. Se tomó NO como categoría de referencia

b. Se tomó SI como categoría de referencia

c. Se tomó BUENA como categoría de referencia

d. Se tomó MAÑANA como categoría de referencia

Para todos los casos analizados, la variable con menor asociación a la percepción del estado de salud fue la concentración de PM_{2.5}. Inclusive para el caso de los participantes con dispositivos a cargo que tuvieron acceso en tiempo real a los datos medidos por los dispositivos.

Al respecto, conviene tener en cuenta que, investigadores que evaluaron datos de contaminación atmosférica en diferentes regiones de Colombia, encontraron que las grandes

ciudades como Medellín y Bogotá no son las más contaminadas y que, al contrario, son las ciudades intermedias las que presentan mayores niveles de contaminación. Esta diferencia está relacionada con la focalización de los esfuerzos de las autoridades gubernamentales para mejorar la calidad del aire en las ciudades capitales y con el aumento de la urbanización, número de vehículos y de actividad industrial en ciudades intermedias (Casallas et al., 2022). Esta situación puede verse reflejada en falta de conciencia sobre la problemática de muchos habitantes de municipios como La Ceja, en los que no hay instrumentos oficiales de medición en funcionamiento y en los que no hay divulgación de información respecto a la calidad del aire.

Estudios que analizaron la percepción ciudadana de la calidad del aire y de los riesgos asociados para la salud en Colombia (Ramírez et al., 2017), y en otros países con altos niveles de contaminación atmosférica como México (Muñoz-Pizza et al., 2020), Chile (Mendoza et al., 2019), Estados Unidos (Reames & Bravo, 2019), Corea del Sur (S. Kim et al., 2019), China (Dong et al., 2019), y ciudades como Bogotá ((Fischer & Beltrán, 2021; Fonseca Mantilla et al., 2021) han demostrado que los altos niveles de contaminación atmosférica y la cercanía con zonas industriales disminuyen la percepción de bienestar de la ciudadanía. Además, existen evidencias de la asociación entre la percepción de riesgos ambientales y la percepción de riesgos para la salud (Esquivel-Ferriño et al., 2018) lo que puede constituirse en un punto de partida para promover la participación de las comunidades en la prevención y manejo de dichos riesgos y para guiar el diseño e implementación de estrategias de divulgación y reducción de la vulnerabilidad (Icedo-Palacios et al., 2022).

Considerando que al inicio de esta investigación en La Ceja no se tenía una sola estación de medición de calidad del aire (de referencia o de bajo costo) y que por lo tanto la comunidad no podía acceder a esa información, es posible que para la ciudadanía no resulten evidentes, ni relevantes los momentos del día y los períodos en los que se presenta aumento en las concentraciones de los contaminantes, y probablemente no se considere que en el municipio exista contaminación atmosférica. Algunos estudios han reportado que, con frecuencia, la percepción de la contaminación atmosférica no está determinada por las sensaciones fisiológicas y por las condiciones del ambiente exterior y si está influenciada por factores socioeconómicos y culturales y por la información que comparten los medios de comunicación y las redes sociales (Geng et al., 2019; Hong et al., 2022; Huang et al., 2017; Muñoz-Pizza et al., 2020; Veloz et al., 2020). Es en casos como estos, en los que los habitantes carecen de conciencia social sobre la mala calidad del

aire donde la ciencia ciudadana puede convertirse en una fuerte estrategia de participación comunitaria que favorezca la divulgación de información relacionada con este tema y acompañe decisiones colectivas sobre la salud humana. La poca apropiación de los datos y de la información generada por los dispositivos, evidencia la necesidad de fortalecer estos ejercicios innovadores y orientados por acciones de participación, educación y comunicación (Alfonso et al., 2022; Forrest et al., 2019).

Desde hace varios años se han evidenciado cambios en la toma de decisiones para afrontar problemáticas ambientales entendiendo que sus dinámicas son complejas. Por lo tanto, se ha promovido la implementación de enfoques participativos que involucren otros actores sociales y fortalezcan la relación de los ciudadanos con su entorno (Giannuzzo, 2010). De esta forma, la participación comunitaria en el tema de salud ambiental se convierte en un elemento articulador entre la salud pública y las ciencias del medio ambiente que favorece el empoderamiento de los individuos, su compromiso y participación en el abordaje de las necesidades en salud ambiental que los aquejan (World Health Organization, 2021).

5 Conclusiones

En este estudio, se exploraron algunos efectos de la contaminación del aire en la percepción ciudadana de la salud usando una estrategia de participación comunitaria en La Ceja Antioquia. Se implementó una red pionera con 28 dispositivos de bajo costo para el monitoreo de PM_{2.5} en diferentes sectores del municipio, incluyendo uno en la zona rural, y se aplicaron encuestas de percepción de salud durante el año 2022. Las principales conclusiones a partir de la evaluación de los resultados obtenidos se presentan a continuación:

El planteamiento inicial fue que las personas que tienen información sobre la calidad del aire perciben más claramente los cambios asociados en su estado de salud. Por lo tanto, después de evaluar los resultados podemos concluir que se refuta la hipótesis planteada, ya que las personas que tuvieron acceso a información sobre la calidad del aire no percibieron con mayor claridad los cambios asociados en su estado de salud, lo cual podría reflejar: a) una poca preocupación, consulta y apropiación de los datos medidos por parte de los ciudadanos; b) deficiencias en la divulgación y capacitación sobre el uso de la herramienta para la consulta de los datos en tiempo real; c)

ausencia de conciencia de la población sobre las causas y consecuencias de la contaminación atmosférica.

El análisis de los datos recopilados por la red implementada evidencia que en general en La Ceja, durante el período de estudio, las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ no superaron los límites establecidos como seguros por la normatividad colombiana. No obstante, en algunas fechas puntuales como el 31 de diciembre y el 1° de enero estos valores considerados seguros se sobrepasaron, debido al uso extensivo y sin regulación de material pirotécnico. La categoría ICA predominante para $PM_{2.5}$ en el municipio durante el período analizado fue buena. Esta categoría se asocia con un bajo nivel de riesgo para la salud de la población. Todos los promedios anuales analizados superaron el nivel recomendado por las directrices de calidad del aire de la OMS. Es conveniente notar que los valores definidos para el país por la Resolución 2254 de 2017 son menos estrictos que los niveles establecidos por la OMS.

Se observaron dos picos diurnos en las concentraciones de $PM_{2.5}$. El primero entre las 4:00 y las 8:00 y el segundo entre de las 18:00 y las 20:00. Estos picos probablemente están asociados a la ocurrencia de fenómenos de inversión térmica en horas de la madrugada y al aumento del tráfico vehicular al inicio y al final de la jornada laboral. No se evidenciaron diferencias representativas en el comportamiento del contaminante entre los días laborales (lunes a viernes) y el fin de semana (sábado y domingo). El análisis espacial permitió concluir que los sectores con mayores concentraciones de $PM_{2.5}$ están localizados en cercanías del parque principal y del parque de La Cruz, inmediaciones de la Central Integrada de Transporte y en el barrio Payuco, sitios con alto volumen de tráfico vehicular. Durante las celebraciones de fin de año los niveles más altos del contaminante se observaron en los sectores residenciales. No se encontraron diferencias notables entre las mediciones de los dispositivos instalados en exteriores en la zona urbana y el sensor instalado al interior del Centro de Bienestar del Anciano. Este hallazgo debe ser revisado considerando que en este lugar habitan adultos mayores con alta vulnerabilidad a la contaminación atmosférica.

No se evidenciaron diferencias en la percepción de salud entre los dos grupos de participantes (con y sin dispositivos), y en general la percepción fue en su mayoría buena. También

en un alto porcentaje, los participantes percibieron una buena calidad del aire y consideraron que el momento del día con menor contaminación atmosférica es la mañana. Entre las variables explicativas incluidas en el análisis de regresión logística, la concentración de PM_{2.5} fue la que presentó una menor asociación con la percepción de cambios en el estado de salud de los participantes.

La participación activa de la ciudadanía permitió la implementación y el funcionamiento de una red pionera de monitoreo para obtener datos indicativos de PM_{2.5} en un municipio con menos de 75.000 habitantes. Los dispositivos de monitoreo de bajo costo son una excelente alternativa para complementar las mediciones de estaciones de referencia, ampliar la cobertura del monitoreo de la calidad del aire, incrementar el número de datos disponibles y democratizar el acceso a la información. El aumento de la disponibilidad de información permite además que científicos y tomadores de decisiones orienten sus estrategias de acción a escala fina en pro de la salud y el bienestar de las comunidades. Así mismo, el conocimiento de las variaciones espacio temporales del PM_{2.5} brinda información de base para una mayor efectividad de las estrategias de prevención y control que se implementen.

La ciencia ciudadana constituye un mecanismo útil y relevante para la vigilancia comunitaria en salud pública y salud ambiental en el país.

6 Recomendaciones

Teniendo en cuenta el valor de los resultados obtenidos con este estudio, se sugiere implementar acciones de monitoreo y seguimiento en otros municipios de Antioquia y ampliar la cobertura de monitoreo en La Ceja, incluyendo mediciones en otros sectores rurales como Las Lomitas, San Nicolás y El Tambo. Además, incrementar la densidad de dispositivos en sectores ubicados cerca a establecimientos educativos, el Hospital San Juan de Dios, el Centro de bienestar del anciano lugares por los que circula diariamente un alto volumen de vehículos particulares, de servicio público y de carga. Resulta importante involucrar en estas iniciativas a la Subsecretaría de Medio Ambiente y a la Secretaría de Salud municipales, así como ejecutar otros análisis que

incluyan datos epidemiológicos y variables climáticas como temperatura, precipitación, velocidad y dirección del viento.

Considerando la posible influencia de las emisiones del volcán Nevado del Ruiz sobre la contaminación atmosférica en La Ceja y otros municipios del oriente antioqueño, se sugiere implementar análisis con los datos medidos por la red durante los meses de marzo y abril de 2023, período en el cual la actividad volcánica aumentó de manera considerable. Incluir otros elementos en el análisis, favorecerá un abordaje integral de la problemática de la contaminación atmosférica que facilite orientar las estrategias de regulación ambiental y las decisiones de salud pública de acuerdo a los hallazgos del comportamiento espacial y temporal del material particulado en el municipio, como los asociados al uso de pirotecnia en las fiestas de navidad y fin de año.

Los resultados obtenidos, confirman la importancia de avanzar en el desarrollo de mecanismos que permitan el acercamiento de la comunidad a los datos ambientales y fomenten el trabajo interdisciplinario para afrontar problemáticas de este tipo. Así como la formulación e implementación de instrumentos de planificación territorial que consideren la disminución de los riesgos en salud ambiental.

Por último, evaluar y actualizar la normatividad relacionada con la contaminación atmosférica es conveniente en Colombia, considerando que es poco restrictiva con relación a las directrices de la OMS y que esto puede comprometer el bienestar y la salud de la población. Así mismo, resulta conveniente que se incluya en las encuestas nacionales de salud la percepción de calidad del aire.

Referencias

- Abel, D. W., Holloway, T., Harkey, M., Meier, P., Ahl, D., Limaye, V. S., & Patz, J. A. (2018). Air-quality-related health impacts from climate change and from adaptation of cooling demand for buildings in the eastern United States: An interdisciplinary modeling study. *PLoS Medicine*, 15(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002599>
- Achilleos, G. (2008). Errors within the inverse distance weighted (IDW) interpolation procedure. *Geocarto International*, 23(6), 429–449. <https://doi.org/10.1080/10106040801966704>
- Agencia Estatal de Meteorología y Oficina Española de Cambio Climático. (2018). *Cambio Climático: calentamiento Global de 1.5°C* (p. <https://news.ge/anakliis-porti-aris-qveynis->

momava).

- Aguiar Gil, D., Calle Palacio, J., Hernández Vasco, D., & González Manosalva, J. (2017). Medellín Y Su Calidad Del Aire. *Escuela Internacional de Desarrollo Sostenible.*, 1–12. [https://escuela-ids.itm.edu.co/calidad-del-aire/images/Contextualización Medellín y su Calidad de Aire.pdf](https://escuela-ids.itm.edu.co/calidad-del-aire/images/Contextualización_Medellín_y_su_Calidad_de_Aire.pdf)
- Aguiar Gil, D., & Correa Ochoa, M. A. (2020). *Evaluación del impacto de la contaminación atmosférica por PM2.5 sobre la mortalidad de la población en el Valle de Aburrá Antioquia.* Aire ciudadano. (2022). *Aire Ciudadano Ciencia ciudadana por la calidad del aire.* <https://aireciudadano.com/>
- Alcaldía de La Ceja del Tambo. (2020). *Plan de Desarrollo Municipal 2020-2023 La Ceja del Tambo, Antioquia* (p. 146). [https://www.laceja-antioquia.gov.co/Transparencia/PlaneacionGestionyControl/PLAN DE DESARROLLO 2020.pdf](https://www.laceja-antioquia.gov.co/Transparencia/PlaneacionGestionyControl/PLAN_DE_DESARROLLO_2020.pdf)
- Alcaldia de Medellin. (2018). *Indice del desempeño en salud ambiental (ISA) para Medellín.*
- 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>
- Anenberg, S., Miller, J., Henze, D., & Minjares, R. (2019). A global snapshot of the air pollution-related health impacts of transportation sector emissions in 2010 and 2015. *International Council on Clean Transportation*, 55. https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Global_health_impacts_transport_emissions_2010-2015_20190226.pdf
- Assari, S., & Lankarani, M. M. (2015). Does multi-morbidity mediate the effect of socioeconomic on self-rated health? Cross-country differences. *International Journal of Preventive Medicine*, 2015-September. <https://doi.org/10.4103/2008-7802.164413>
- Ballesteros-González, K., Sullivan, A. P., & Morales-Betancourt, R. (2020). Estimating the air quality and health impacts of biomass burning in northern South America using a chemical transport model. *Science of the Total Environment*, 739, 139755. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139755>
- Bartumeus, F., Oltra, A., & Palmer, J. R. B. (2018). Citizen Science: A Gateway for Innovation in Disease-Carrying Mosquito Management? In *Trends in Parasitology* (Vol. 34, Issue 9, pp.

- 727–729). <https://doi.org/10.1016/j.pt.2018.04.010>
- Bello-Medina, P. C., Rodríguez-Martínez, E., Prado-Alcalá, R. A., & Rivas-Arancibia, S. (2022). Ozone pollution, oxidative stress, synaptic plasticity, and neurodegeneration. *Neurologia*, 37(4), 277–286. <https://doi.org/10.1016/j.nrl.2018.10.003>
- Bergstra, A. D., Brunekreef, B., & Burdorf, A. (2018). The mediating role of risk perception in the association between industry-related air pollution and health. *PLoS ONE*, 13(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196783>
- Builes-Jaramillo, A., Gómez-Bedoya, J., Lopera-Urbe, S., & Fajardo-Castaño, V. (2020). Hotspots, daily cycles and average daily dose of PM_{2.5} in a cycling route in medellin. *Revista Facultad de Ingenieria*, 96, 87–99. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20191153>
- Calasans Souza, M. (2019). *Evaluación de la calidad del aire en Salvador, Brasil*.
- Calderón Bancayan, J. V. (2020). La regulación de la pirotecnia y los derechos fundamentales de las personas con trastorno de espectro autista. In *Universidad Cesar Vallejo*. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/59628/Rios_SJG-Salvador_BDS-SD.pdf?sequence=1
- Casallas, A., Castillo-Camacho, M. P., Guevara-Luna, M. A., González, Y., Sanchez, E., & Belalcázar, L. C. (2022). Spatio-temporal analysis of PM_{2.5} and policies in Northwestern South America. *Science of the Total Environment*, 852(May). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158504>
- Casilimas Fajardo, D. E., & Maestre Felizzola, O. J. (2017). *AMICA: Aplicativo web para dispositivos móviles de índice de calidad del aire de la ciudad de bogotá usando servicios en la nube*. 24.
- Castillo-Camacho, M. P., Tunarrosa-Grisales, I. C., Chacón-Rivera, L. M., Guevara-Luna, M. A., & Belalcázar-Cerón, L. C. (2020). Personal Exposure to PM_{2.5} in the Massive Transport System of Bogota and Medellin, Colombia. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 14(3), 210–224. <https://doi.org/10.5572/ajae.2020.14.3.210>
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. (2021). *Informe a las naciones. El aire que respiramos: pasado, presente y futuro. Contaminación atmosférica por MP_{2,5} en el centro y sur de Chile*.
- Cortese, R. (2018). *Percepción de salud y bienestar en la vejez*. 22, 17–42.
- Cubas, C. E. R. (2021). Los efectos del crecimiento urbano de 1998 al 2019 en la infraestructura

verde de la ciudad de Piura. *Psikologi Perkembangan*, October 2013, 1–126.
<http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3000/SilvaAcosta.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttps://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/1046>

D'Antoni, D., Auyeung, V., Walton, H., Fuller, G. W., Grieve, A., & Weinman, J. (2019). The effect of evidence and theory-based health advice accompanying smartphone air quality alerts on adherence to preventative recommendations during poor air quality days: A randomised controlled trial. *Environment International*, 124, 216–235.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.002>

den Broeder, L., Uiters, E., ten Have, W., Wagemakers, A., & Schuit, A. J. (2017). Community participation in Health Impact Assessment. A scoping review of the literature. In *Environmental Impact Assessment Review* (Vol. 66, pp. 33–42). Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.06.004>

Díaz Garrido, E. Y., Patiño Mora, E. Y., Murillo Valencia, A. V., & Martínez Chica, Y. (2019). *Vista de Síntomas respiratorios por inhalación de humo de leña y material particulado_ revisión sistemática.*

Díaz Puerto, C. H. (2020). *Análisis de la vulnerabilidad social en Colombia de los hogares acompañados por la Estrategia Unidos 2018 - 2019.*
https://ciencia.lasalle.edu.co/maest_gestion_desarrollo

Dong, D., Xu, X., Xu, W., & Xie, J. (2019). The relationship between the actual level of air pollution and residents' concern about air pollution: Evidence from Shanghai, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(23).
<https://doi.org/10.3390/ijerph16234784>

El Tiempo. (2022). *Así le fue a Medellín en el primer episodio de calidad del aire del 2022.*
<https://www.eltiempo.com/colombia/medellin/asi-le-fue-a-medellin-en-el-primer-episodio-de-calidad-del-aire-del-2022-666249>

Enda América Latina. (2017). *Monitoreo Comunitario Ambiental para acueductos comunitarios campesinos* (Vol. 53, Issue 9, pp. 1689–1699).

English, P. B., Richardson, M. J., & Garzón-Galvis, C. (2018). From Crowdsourcing to Extreme Citizen Science: Participatory Research for Environmental Health. In *Annual Review of Public Health* (Vol. 39, pp. 335–350). <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-040617->

- EPA. (2022). *Particulate Matter (PM) basics*. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- Escobar Jiménez, L. (2020). *Evaluación De Las Concentraciones De Material Particulado PM10 Y PM2.5 En El Casco Urbano Del Municipio De Vijes Valle Del Cauca*. <https://doi.org/10.1109/CASAP.2019.8916694>
- Esquivel-Ferriño, P. C., Cantú-Cárdenas, L. G., & González-Santiago, O. (2018). Perception of air and water pollution and its association with cancer risk perception in a region with high cancer mortality in Mexico: an exploratory study. In *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* (Vol. 34, Issue 2, pp. 347–353). <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.02.14>
- Faccioli, C. (2018). *La protección de la calidad del aire Especial referencia a la actuación local*. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=vWjKdWAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA7&dq=calidad+del+aire&ots=RrD7r085ll&sig=nLdQ1Q8m3JfopEUx-MMCU5wFRk4#v=onepage&q=calidad del aire&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=vWjKdWAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA7&dq=calidad+del+aire&ots=RrD7r085ll&sig=nLdQ1Q8m3JfopEUx-MMCU5wFRk4#v=onepage&q=calidad%20del%20aire&f=false)
- Filonchyk, M., Peterson, M. P., Gusev, A., Hu, F., Yan, H., & Zhou, L. (2022). Measuring air pollution from the 2021 Canary Islands volcanic eruption. *Science of the Total Environment*, 849(May), 157827. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157827>
- Fischer, F. L., & Beltrán, D. F. (2021). Análisis del material particulado en relación con la percepción de la calidad de vida en tres localidades de Bogotá - Colombia. In *Gestión y Ambiente* (Vol. 24, Issue 2, p. 98601). <https://doi.org/10.15446/ga.v24n2.98601>
- Fiuza, M. D., & Rodríguez Pérez, J. C. (2000). La regresión logística: una herramienta versátil. *Nefrología*, 20(6), 495–500. <https://www.revistanefrologia.com/es-la-regresion-logistica-una-herramienta-articulo-X0211699500035664>
- Fonseca Mantilla, O. G., Pachón, J. E., Mejía Ochoa, M. S., Romero Ortiz, L., Rivera Tangarife, L. S., Valenzuela Bustacara, Z. L., Giraldo Quintero, C., Mora García, A. M., Castañeda Varón, D. V., Pinzón Acosta, K. V., Pardo Pérez, M. A., & Preciado Poveda, A. M. (2021). *Perception of Air Quality in Bogotá and Surrounding Municipalities*.
- 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).

<https://doi.org/10.1007/s10661-019-7297-3>

Fritz, S., See, L., Carlson, T., Haklay, M. (Muki), Oliver, J. L., Fraisl, D., Mondardini, R., Brocklehurst, M., Shanley, L. A., Schade, S., Wehn, U., Abrate, T., Anstee, J., Arnold, S., Billot, M., Campbell, J., Espey, J., Gold, M., Hager, G., ... West, S. (2019). Citizen science and the United Nations Sustainable Development Goals. *Nature Sustainability*, 2(10), 922–930. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0390-3>

Gamba Gallego, L. M. (2022). Calibración y validación de dos equipos de bajo costo para la medición de material particulado a partir de los modelos de regresión simple y múltiple. In *Braz Dent J.* (Vol. 33, Issue 1).

Gao, J., Xu, G., Ma, W., Zhang, Y., Woodward, A., Vardoulakis, S., Kovats, S., Wilkinson, P., He, T., Lin, H., Liu, T., Gu, S., Wang, J., Li, J., Yang, J., Liu, X., Wu, H., & Liu, Q. (2017). Perceptions of Health Co-Benefits in Relation to Greenhouse Gas Emission Reductions: A Survey among Urban Residents in Three Chinese Cities. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 14, 298. <https://doi.org/10.3390/ijerph14030298>

Garaga, R., & Kota, S. H. (2018). Characterization of PM10 and impact on human health during the annual festival of lights (Diwali). *Journal of Health and Pollution*, 8(20). <https://doi.org/10.5696/2156-9614-8.20.181206>

García Navarrete, G., & Rico Soto, K. G. (2020). Sensores De Bajo Costo Para El Monitoreo De Calidad Del Aire. *Epistemus*, 13(27), 30–37. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v13i27.108>

Gaviria Castellanos, J. L., Santamaría, N., Velandia Patiño, C. A., Balanta Popo, C., & Quintero Hernández, A. (2019). Georeferencing of burns in Bogotá, Colombia. *Rev Col Cirugía Plástica y Reconstructiva* •, 25(2), 61–71. <http://www.ciplastica.xn--com-up0a>

Gaviria, M. A. (2014). El Mercado, Las Políticas Económicas Y La Transformación De Los Sistemas De Producción Familiar Rural Del Municipio De La Ceja (Antioquia). *Pontificia Universidad Javeriana Facultad De Estudios Ambientales Y Rurales Maestría En Desarrollo Rural*, 5–24.

Geng, L., Wu, Z., Zhang, S., & Zhou, K. (2019). The end effect in air pollution: The role of perceived difference. *Journal of Environmental Management*, 232(April 2018), 413–420. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.056>

Giannuzzo, A. N. (2010). Los estudios sobre el ambiente y la ciencia ambiental. *Scientiae Studia*, 8(1), 129–156. <https://doi.org/10.1590/s1678-31662010000100006>

- Golumbic, Y. N., Fishbain, B., & Baram-Tsabari, A. (2019). User centered design of a citizen science air-quality monitoring project. *International Journal of Science Education, Part B: Communication and Public Engagement*, 9(3), 195–213. <https://doi.org/10.1080/21548455.2019.1597314>
- Gómez, D. (2022). *Transformaciones territoriales asociadas a indicios de un proceso de gentrificación. Un análisis en el espacio urbano del municipio de La Ceja en el periodo 2016-2021*. 1–177.
- Gómez Peláez, L. M., Santos, J. M., de Almeida Albuquerque, T. T., Reis, N. C., Andreão, W. L., & de Fátima Andrade, M. (2020). Air quality status and trends over large cities in South America. *Environmental Science and Policy*, 114(April), 422–435. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.09.009>
- Grisales, H., Piñeros, J. G., nito López, E., Montealegre, N., González, D., Lopera, V., Henao, E., & Franco, M. C. (2021). *Carga de la enfermedad, costos derivados y geolocalización de la morbimortalidad, atribuibles a la contaminación por PM2.5. Medellín 2010 - 2016* (Issue 1, p. 6).
- Hankey, S., & Marshall, J. D. (2017). Urban Form, Air Pollution, and Health. *Current Environmental Health Reports*, 4(4), 491–503. <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0167-7>
- Herazo Beltran, Y., Dominguez Anaya, R., Hernandez Escolar, J., & Puello, A. (2015). Caracterización del paciente pediátrico quemado en un hospital infantil de Cartagena (Colombia), 2015: estudio descriptivo. *Archivos de Medicina (Manizales)*, 15(1), 77–84. <https://doi.org/10.30554/archmed.15.1.718.2015>
- Hernández López., M. J., & Baloco Vega, A. F. (2019). *Estrategias de mejoramiento de la calidad del aire en ciudades con problemas de contaminación*.
- Hong, W., Wei, Y., & Wang, S. (2022). Left behind in perception of air pollution? A hidden form of spatial injustice in China. *Environment and Planning C: Politics and Space*, 40(3), 666–684. <https://doi.org/10.1177/23996544211036145>
- Hosmer, D. W., & Lemeshow, S. (2000). *Applied Logistic Regression*. <http://as.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0470582472.html>
- Hoyos, C. D., Herrera-Mejía, L., Roldán-Henao, N., & Isaza, A. (2020). Effects of fireworks on particulate matter concentration in a narrow valley: the case of the Medellín metropolitan area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(1). <https://doi.org/10.1007/s10661-019->

- Huang, L., Rao, C., van der Kuijp, T. J., Bi, J., & Liu, Y. (2017). A comparison of individual exposure, perception, and acceptable levels of PM_{2.5} with air pollution policy objectives in China. *Environmental Research*, 157(March), 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.05.012>
- Huneus, N., Denier van der Gon, H., Castesana, P., Menares, C., Granier, C., Granier, L., Alonso, M., de Fatima Andrade, M., Dawidowski, L., Gallardo, L., Gomez, D., Klimont, Z., Janssens-Maenhout, G., Osses, M., Puliafito, S. E., Rojas, N., Ccoyllo, O. S., Tolvett, S., & Ynoue, R. Y. (2020). Evaluation of anthropogenic air pollutant emission inventories for South America at national and city scale. *Atmospheric Environment*, 235, 117606. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117606>
- Icedo-Palacios, J. de J., Robles-Morua, A., & Lutz-ley, A. N. (2022). Variabilidad intraurbana de percepciones y respuestas al riesgo por contaminación del aire y olas de calor en una ciudad del noroeste de México. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*. <https://doi.org/10.24836/es.v32i59.1180>
- IDEAM. (2019). Informe del estado de la Calidad del Aire en Colombia 2018. *Comité de Comunicaciones y Publicaciones Del IDEAM*, 305. http://www.uasf.edu.pe/includes/archivos_pre/20112/1035_370101_20112_SEPARATA_Calidad_de_Aire.doc
- IDEAM. (2022). Informe del estado de la Calidad del Aire en Colombia 2021. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*, 61.
- IQAir. (2021). *World air quality report 2021*.
- Javed, M., Bashir, M., & Zaineb, S. (2021). Analysis of daily and seasonal variation of fine particulate matter (PM_{2.5}) for five cities of China. *Environment, Development and Sustainability*, 23(8), 12095–12123. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-01159-1>
- Kelly, K. E., Whitaker, J., Petty, A., Widmer, C., Dybwad, A., Sleeth, D., Martin, R., & Butterfield, A. (2017). Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor. *Environmental Pollution*, 221, 491–500. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.039>
- Khilnani, G. C., & Tiwari, P. (2018). Air pollution in India and related adverse respiratory health effects: Past, present, and future directions. *Current Opinion in Pulmonary Medicine*, 24(2),

108–116. <https://doi.org/10.1097/MCP.0000000000000463>

- Kim, S., Senick, J. A., & Mainelis, G. (2019). Sensing the invisible: Understanding the perception of indoor air quality among children in low-income families. *International Journal of Child-Computer Interaction*, *19*, 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2018.12.002>
- Kim, Y. H., Park, I. K., & Kang, S. J. (2018). Age and gender differences in health risk perception. *Central European Journal of Public Health*, *26*(1), 54–59. <https://doi.org/10.21101/cejph.a4920>
- Li, C. H., Sayeau, K., & Ellis, A. K. (2020). Air pollution and allergic rhinitis: Role in symptom exacerbation and strategies for management. In *Journal of Asthma and Allergy* (Vol. 13, pp. 285–292). <https://doi.org/10.2147/JAA.S237758>
- Liang, L., & Gong, P. (2020). Urban and air pollution: a multi-city study of long-term effects of urban landscape patterns on air quality trends. *Scientific Reports*, *10*(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74524-9>
- Liu, H. Y., Schneider, P., Haugen, R., & Vogt, M. (2019). Performance assessment of a low-cost PM 2.5 sensor for a near four-month period in Oslo, Norway. *Atmosphere*, *10*(2). <https://doi.org/10.3390/atmos10020041>
- Londoño Pineda, A. A., & Cano, J. A. (2021). Assessment of air quality in the Aburrá Valley (Colombia) using composite indices: Towards comprehensive sustainable development planning. *Urban Climate*, *39*(March). <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100942>
- Manco Perdomo, L. A., & Pérez Padilla, L. A. (2020). *Análisis de normatividad pública en materia de calidad del aire para la ciudad de Bogotá: Tendencia temporal de contaminantes criterio* (Vol. 1).
- Mandell, J. T., Idarraga, M., Kumar, N., & Galor, A. (2020). Impact of air pollution and weather on dry eye. In *Journal of Clinical Medicine* (Vol. 9, Issue 11, pp. 1–22). <https://doi.org/10.3390/jcm9113740>
- Martínez González, M. A., Toledo Atucha, E. A., Sánchez Villegas, A., & Faulin Fajardo, J. (1985). *Bioestadística Amigable* (p. 811).
- Martinez, R., Soliz, P., Caixeta, R., & Ordunez, P. (2019). Años de vida perdidos por muerte prematura: una medida versátil y abarcadora para el monitoreo de la mortalidad por enfermedades no transmisibles. *Rev Panam Salud Pública*, *43*, 1–10. Se promovieron estrategias de educación para el empleo en miembros de la familia con posibilidad de trabajar,

con miras a mejorar la economía familiar.

- Masiol, M., Formenton, G., Giraldo, G., Pasqualetto, A., Tieppo, P., & Pavoni, B. (2014). The dark side of the tradition: The polluting effect of Epiphany folk fires in the eastern Po Valley (Italy). *Science of the Total Environment*, 473–474, 549–564. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.077>
- Medina Palacios, E. C. (2019). *La contaminación del aire, un problema de todos.pdf*.
- Mendoza, Y., Loyola, R., Aguilar, A., & Escalante, R. (2019). Valuation of Air Quality in Chile: The Life Satisfaction Approach. *Social Indicators Research*, 145(1), 367–387. <https://doi.org/10.1007/s11205-019-02103-1>
- Milford, C., Torres, C., Vilches, J., Gossman, A. K., Weis, F., Suárez-Molina, D., García, O. E., Prats, N., Barreto, Á., García, R. D., Bustos, J. J., Marrero, C. L., Ramos, R., China, N., Boulesteix, T., Taquet, N., Rodríguez, S., López-Darias, J., Sicard, M., ... Cuevas, E. (2023). Impact of the 2021 La Palma volcanic eruption on air quality: Insights from a multidisciplinary approach. *Science of the Total Environment*, 869(December 2022). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161652>
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. *Protocolo Para El Monitoreo y Seguimiento de La Calidad Del Aire*, 137.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Resolución 2254 de 2017 - Niveles Calidad del Aire*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). www.minambiente.gov.co.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, C. (2019). *Estrategia nacional de Calidad del Aire: Vol. XI*.
- Ministerio de Salud y de Protección Social de Colombia. (2022). www.minsalud.gov.co.
- Ministerio de Salud y Protección social. (2021). *Análisis de Situación de Salud (ASIS)*.
- MiOriente. (2018). *¿Qué tal es el aire que respiramos en el Oriente?* <https://mioriente.com/altiplano/rionegro/que-tal-es-el-aire-que-respiramos-en-el-oriente.html>
- MiOriente. (2019). *10 de 10 para la calidad de aire en el Oriente | MiOriente*. <http://mioriente.com/altiplano/rionegro/10-de-10-para-la-calidad-de-aire-en-el-oriente.html>
- Molina-Gómez, N. I., Calderón-Rivera, D. S., Sierra-Parada, R., Díaz-Arévalo, J. L., & López-Jiménez, P. A. (2021). Analysis of incidence of air quality on human health: a case study on

the relationship between pollutant concentrations and respiratory diseases in Kennedy, Bogotá. *International Journal of Biometeorology*, 65(1), 119–132. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01955-4>

Montealegre Gomez, G., Parra Carreño, A., & Perez, S. (2021). Quemaduras de la mano en niños : experiencia de 5 años en una unidad de quemados pediátrica en Bogotá. *Rev Col Cirugia Plástica y Reconstructiva*, 27(1), 33–41.

Moral Peláez, I. (2016). *Modelos de regresión: lineal simple y regresión logística*.

Muñoz-Pizza, D. M., Villada-Canela, M., Reyna, M. A., Texcalac-Sangrador, J. L., Serrano-Lomelin, J., & Osornio-Vargas, Á. (2020). Assessing the influence of socioeconomic status and air pollution levels on the public perception of local air quality in a Mexico-us border city. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(13), 1–22. <https://doi.org/10.3390/ijerph17134616>

Neria-Hernández, A., Colín-Cruz, A., & Sánchez-Meza, J. C. (2023). *Air Pollution in Cities With Unplanned Urban Growth , a Case Study of Toluca Valley : Trends and Health Impacts Compared With Mexico City*. 1–15.

Ochoa Duarte, A., Cangrejo Aljure, L. D., & Delgado, T. (2018). Alternativa Open Source en la implementación de un sistema IoT para la medición de la calidad del aire. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 12(1), 189–204.

OMS. (2017). *Indicadores de Salud: Aspectos conceptuales y operativos*. https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=14406:health-indicators-conceptual-and-operational-considerations-section-3&Itemid=0&showall=1&lang=es

OMS. (2021). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire Resumen ejecutivo*. 1–16.

OPS/OMS. (2021). *Organización Mundial de la Salud (OMS) Calidad del aire*. <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>

OPS, & OMS. (2017). Lineamientos Básicos para el Análisis de la Mortalidad. In *Organización Panamericana de la Salud; Organización Mundial de la Salud* (Vol. 66). <https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/34492/9789275319819-spa.pdf?sequence=7>

Orientese.co. (2019). *Calidad del aire en el Oriente Antioqueño es buena, a pesar del creciente desarrollo económico y demográfico*. <https://orientese.co/calidad-del-aire-en-el-oriente->

antioqueno-es-buena-a-pesar-del-creciente-desarrollo-economico-y-demografico/

- Oroji, B., Sadighzadeh, A., & Solgi, E. (2020). Effects of fireworks ancient celebrations on atmospheric concentration of particulate matter in Iran. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 4(2), 104–110. <https://doi.org/10.1080/24749508.2019.1600909>
- Orru, K., Nordin, S., Harzia, H., & Orru, H. (2018). The role of perceived air pollution and health risk perception in health symptoms and disease: a population-based study combined with modelled levels of PM10. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 91(5), 581–589. <https://doi.org/10.1007/s00420-018-1303-x>
- Ortega-García, J. A., Tellerías, L., Ferrís-Tortajada, J., Boldo, E., Campillo-López, F., van den Hazel, P., Cortes-Arancibia, S., Ramis, R., Gaioli, M., Monroy-Torres, R., Farias-Guardia, C., Borrás, M., Yohannessen, K., García-Noriega-Fernández, M., Cárcelos-Álvarez, A., Jaimes-Vega, D. C., Cordero-Rizo, M., López-Hernández, F., & Claudio, L. (2018). Threats, challenges and opportunities for pediatric environmental health in Europe, Latin America and the Caribbean. *Anales de Pediatría*.
- Oyarzún G., M., & Valdivia C., G. (2021). Impactos en la salud de la contaminación del aire. In *Revista chilena de enfermedades respiratorias* (Vol. 37, Issue 2, pp. 103–106). <https://doi.org/10.4067/s0717-73482021000200103>
- Palmer, J. R. B., Oltra, A., Collantes, F., Delgado, J. A., Lucientes, J., Delacour, S., Bengoa, M., Eritja, R., & Bartumeus, F. (2017a). Citizen science provides a reliable and scalable tool to track disease-carrying mosquitoes. *Nature Communications*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00914-9>
- Palmer, J. R. B., Oltra, A., Collantes, F., Delgado, J. A., Lucientes, J., Delacour, S., Bengoa, M., Eritja, R., & Bartumeus, F. (2017b). Citizen science provides a reliable and scalable tool to track disease-carrying mosquitoes. *Nature Communications*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00914-9>
- Papadogeorgou, G., Kioumourtzoglou, M. A., Braun, D., & Zanobetti, A. (2019). Low Levels of Air Pollution and Health: Effect Estimates, Methodological Challenges, and Future Directions. *Current Environmental Health Reports*, 6(3), 105–115. <https://doi.org/10.1007/s40572-019-00235-7>
- Papapostolou, V., Zhang, H., Feenstra, B. J., & Polidori, A. (2017). Development of an environmental chamber for evaluating the performance of low-cost air quality sensors under

- controlled conditions. *Atmospheric Environment*, 171, 82–90.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.10.003>
- Pinzón, K., Betancourt, D., Arias, D. A., Tumialan, J., Galvis, B., Bernal, E., Casas, O., González, S., & Pachón, J. (2023). Desarrollo y aplicación de una metodología para la evaluación de sensores de bajo costo en ambiente controlado. *Calidad de Aire, Cambio Climático y Salud Pública*. https://casap.science/wp-content/uploads/2023/07/LIBRO-DE-MEMORIAS-CASAP-IX_FINAL.pdf
- Prats Porta, N., Torres García, C., Bayo Pérez, C., Ramos López, R., & Cuevas Agulló, E. (2022). Guía de actuación ante niveles altos de contaminación volcánica. Observatorio Atmosférico de Izaña. *Guía de Actuación Ante Niveles Altos de Contaminación Volcánica. Observatorio Atmosférico de Izaña*. <https://doi.org/10.31978/666-22-012-x>
- Prüss-Ustün, A., Wolf, J., Corvalán, C., Bos, R., & Neira, M. (2016). *Preventing disease through healthy environments: A global assessment of the environmental burden of disease*. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2016.07.028>
- Quirama-Aguilar, M., García Aguirre, D., & Gaona Quiroga, L. (2021). Gobernanza del aire: estrategia para el mejoramiento de la calidad del aire en ciudades. In *Gestión y Ambiente* (Vol. 24, Issue Supl3, pp. 33–46). <https://doi.org/10.15446/ga.v24nsupl3.96609>
- Ramírez, O., Mura, I., & Franco, J. F. (2017). How Do People Understand Urban Air Pollution? Exploring Citizens' Perception on Air Quality, Its Causes and Impacts in Colombian Cities. In *Open Journal of Air Pollution* (Vol. 06, Issue 01, pp. 1–17). <https://doi.org/10.4236/ojap.2017.61001>
- Razo González, Á., Díaz Castillo, R., & López González, M. (2018). Percepción del estado de salud y la calidad de vida en personas jóvenes, maduras y mayores. *Rev CONAMED*, 23(2), 58–65. <https://www.medigraphic.com/pdfs/conamed/con-2018/con182b.pdf>
- Real Academia Española. (2022). www.dle.rae.es.
- Reames, T. G., & Bravo, M. A. (2019). People, place and pollution: Investigating relationships between air quality perceptions, health concerns, exposure, and individual- and area-level characteristics. *Environment International*, 122(November), 244–255. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.11.013>
- Represa, N. S. (2020). *Elaboración E Implementacion De Una Propuesta Metodológica Para La Evaluación Y Gestion De La Calidad De Aire Mediante El Enfoque De La Ciencia De Datos*.

285. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/94380>

- Rodríguez-Camargo, L. A., Sierra-Parada, R. J., & Blanco-Becerra, L. C. (2020). Análisis espacial de las concentraciones de PM_{2,5} en Bogotá según los valores de las guías de la calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud para enfermedades cardiopulmonares, 2014-2015. *Biomédica*, 40(1), 137–152. <https://doi.org/10.7705/biomedica.4719>
- Rodríguez-Villamizar, L. A., Rojas-Roa, N. Y., Blanco-Becerra, L. C., Herrera-Galindo, V. M., & Fernández-Niño, J. A. (2018). Short-Term Effects of Air Pollution on Respiratory and Circulatory Morbidity in Colombia 2011-2014: A Multi-City, Time-Series Analysis. *Environmental Research and Public Health*. <https://doi.org/10.3390/ijerph15081610>
- Rodríguez Hernández, N., García Peraza, C. A., Otero Sierra, M., López Prieto, M. L., & Campo García, Y. (2018). Percepción sobre factores de riesgo del cáncer de colon. *Revista de Ciencias Médicas de Pinar Del Río*, 22(4), 678–688. www.revcmpinar.sld.cu/index.php/publicaciones/article/view/3536
- Rojas, D., Salazar, J., Montoya, D., & Moñoz, E. (2019). Problemática de la contaminación del aire en Colombia. *Revista Ambiental Éolo*, 18(1), 109–122. <http://revistaeolo.fconvda.org/index.php/eolo/article/view/12>
- Roncancio, L. X. (2019). *Evaluación Del Desempeño De Sensores De Bajo Costo Como Complemento Para El Monitoreo De La Calidad Del Aire De Bogotá Y Como Herramienta Para La Determinación Del Grado De Exposición De Una Población Caso De Estudio*. 190.
- Ruiz-Ballesteros, E., & Valcuende del Río, J. M. (2020). Cuerpos en el entorno: Reflexiones para una etnografía de las percepciones ambientales. *AIBR, Revista de Antropología Iberoamericana*, 15(01). <https://doi.org/10.11156/aibr.150106>
- Ryu, Y. H., & Min, S. K. (2020). What matters in public perception and awareness of air quality? Quantitative assessment using internet search volume data. *Environmental Research Letters*, 15(9). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9fb0>
- San Llorente Capdevila, A., Kokimova, A., Sinha Ray, S., Avellán, T., Kim, J., & Kirschke, S. (2020). Success factors for citizen science projects in water quality monitoring. *Science of the Total Environment*, 728, 137843. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137843>
- Sarceño Zepeda, E. L. (2021). *Caracterización epidemiológica y clínica de pacientes pediátricos con quemaduras* (Vol. 14, Issue 1). Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Scagliotti, A. F., & Jorge, G. A. (2022). Low-Cost Methods To Particulate Matter Preliminary

- Study in the Center-North of Buenos Aires Suburbs. *Anales de La Asociacion Fisica Argentina*, 33(1), 18–23. <https://doi.org/10.31527/analesafa.2022.33.1.18>
- Secretaría de Protección Social La Ceja. (2019). *Análisis de la situación de salud (ASIS) La Ceja 2019*.
- Secretaría Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia. (2022). www.dssa.gov.co.
- Secretaría Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia. (2023). *Análisis de situación de salud. Actualización 2022 - La Ceja* (pp. 2022–2023).
- Sensirion. (2020). *Sensor Specification Statement How to Understand Specification of Particulate Matter Sensors. March 2020*, 1–9. www.sensirion.com
- Servicio Geológico Colombiano. (2022). *Boletín semanal de actividad del volcán Nevado del Ruiz del 23 al 29 de agosto de 2022*. 2022(Iii).
- SIATA. (2021). *SIATA - Sistema de Alerta Temprana del valle de Aburrá*. https://siata.gov.co/siata_nuevo/
- SIATA, & Area Metropolitana del Valle de Aburrá. (2022). *Informe de cierre de episodio, primera temporada crítica de 2022: Evolución de la concentración de PM2.5 durante los meses de febrero a abril 2022*.
- Singh, A., Pant, P., & Pope, F. D. (2019). Air quality during and after festivals: Aerosol concentrations, composition and health effects. In *Atmospheric Research* (Vol. 227, pp. 220–232). <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.05.012>
- Tobón Ramírez, M. A. (2020). *Crecimiento urbanístico acelerado y cambio de uso del suelo. Estudio de caso del municipio de La Ceja, Antioquia*.
- U.S. General Services Administration. (2022). *Citizen science*. <https://www.citizenscience.gov/>
- Ulloa Ninahuamán, J., Alvarez-Tolentino, D. M., Peña Rojas, A., & Suarez-Salas, L. (2022). Sensores de bajo costo en la caracterización de partículas finas (PM2.5) de una ciudad altoandina. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 24(3), 199–207. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.468>
- Valencia Zapata, L. M. (2019). *Variación de las emisiones atmosféricas generadas por fuentes fijas dentro de la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de las cuencas del río Negro y Nare -CORNARE: Una estrategia para un control y seguimiento eficiente*.
- Veloz, D., Gonzalez, M., Brown, P., Gharibi, H., & Cisneros, R. (2020). Perceptions about air quality of individuals who work outdoors in the San Joaquin Valley, California. *Atmospheric*

Pollution Research, 11(4), 825–830. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.01.010>

Wang, Y., Li, J., Jing, H., Zhang, Q., Jiang, J., & Biswas, P. (2015). Laboratory Evaluation and Calibration of Three Low-Cost Particle Sensors for Particulate Matter Measurement. *Aerosol Science and Technology*, 49(11), 1063–1077. <https://doi.org/10.1080/02786826.2015.1100710>

Watts, N., Amann, M., Arnell, N., Ayeb-Karlsson, S., Beagley, J., Belesova, K., Boykoff, M., Byass, P., Cai, W., Campbell-Lendrum, D., Capstick, S., Chambers, J., Coleman, S., Dalin, C., Daly, M., Dasandi, N., Dasgupta, S., Davies, M., Di Napoli, C., ... Costello, A. (2021). The 2020 report of The Lancet Countdown on health and climate change: responding to converging crises. *The Lancet*, 397(10269), 129–170. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)32290-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)32290-X)

WHO. (2016). Salud ambiental. WHO. http://www.who.int/topics/environmental_health/es/

Wilches, J., & Castillo, M. (2021). Análisis de la relación entre material particulado, cuarentena y COVID-19 en una ciudad del caribe colombiano. *Salud UIS*, 60(5). https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Wilches-Visbal/publication/356267963_Analysis_of_the_relationship_between_particulate_matter_quarantine_and_COVID-19_in_a_Colombian_Caribbean_city/links/61941c88d7d1af224bfadbda/Analysis-of-the-relationship-between

World Health Organization. (2021). Health Promotion Glossary of Terms 2021. In *World Health Organization* (pp. 1–44). <https://www.who.int/publications/i/item/9789240038349>

Yale Center for Environmental Law & Policy. (2021). *Environmental Performance Index*. <https://epi.yale.edu/epi-results/2020/component/epi>

Yao, L., Wang, D., Fu, Q., Qiao, L., Wang, H., Li, L., Sun, W., Li, Q., Wang, L., Yang, X., Zhao, Z., Kan, H., Xian, A., Wang, G., Xiao, H., & Chen, J. (2019). The effects of firework regulation on air quality and public health during the Chinese Spring Festival from 2013 to 2017 in a Chinese megacity. *Environment International*, 126, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.037>

Yolton, K., Khoury, J. C., Burkle, J., LeMasters, G., Cecil, K., & Ryan, P. (2019). lifetime exposure to traffic-related air pollution and symptoms of depression and anxiety at age 12 years. *Environmental Research*, 173, 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.03.005>

- Zhang, Q., Jiang, X., Tong, D., Davis, S. J., Zhao, H., Geng, G., Feng, T., Zheng, B., Lu, Z., Streets, D. G., Ni, R., Brauer, M., Van Donkelaar, A., Martin, R. V., Huo, H., Liu, Z., Pan, D., Kan, H., Yan, Y., ... Guan, D. (2017). Transboundary health impacts of transported global air pollution and international trade. *Nature*, *543*(7647), 705–709. <https://doi.org/10.1038/nature21712>
- Zhou, Y., Zhang, M., Liu, W., Li, Y., Qin, Y., & Xu, Y. (2020). Transgenerational transmission of neurodevelopmental disorders induced by maternal exposure to PM2.5. *Chemosphere*, *255*(38), 126920. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126920>
- Zuluaga, L., & Perea, M. (2020). *Revisión de alternativas para el diseño de una red de monitoreo participativo de cantidad y calidad del agua en el oriente antioqueño.*

Anexo 1

- **Encuesta inicial de estado de salud**

Gracias por participar en el estudio: Análisis de los efectos de la calidad del aire en la percepción de la salud usando una metodología de participación comunitaria. Municipio de La Ceja Antioquia.

Por favor responda a las preguntas con total honestidad esto garantizará la veracidad y utilidad de la información.

* Indica que la pregunta es obligatoria

Consentimiento

Esta encuesta busca conocer el estado de salud de los participantes al inicio del proyecto. Los resultados obtenidos serán usados con fines estrictamente académicos e investigativos garantizando su confidencialidad.

1. Para confirmar que conoce los objetivos del proyecto y otorga su consentimiento para la inclusión de sus respuestas en el estudio, le solicitamos conteste SI o NO *:

Marca solo un óvalo.

Si

No

2. Fecha de diligenciamiento de la encuesta. Llenar así: Día, mes, año *

Ejemplo: 7 de enero de 2019

3. Número del participante *

A. Datos generales

4. Edad *

Marca solo un óvalo.

Entre 18 y 25 años

Entre 26 y 40 años

Entre 41 y 60 años

61 años o más

5. Género *

Marca solo un óvalo.

Femenino

Masculino

Prefiero no decirlo

6. Nivel educativo *

Marca solo un óvalo.

Primaria

Bachillerato

Técnico

Profesional

Posgrado

7. Ocupación actual *

8. Sector o barrio donde reside *

9. Sin incluirse usted, ¿cuántas personas habitan en su residencia?

Marca solo un óvalo.

1

2

3

- 4
- 5 o más

10. ¿En su residencia habitan personas mayores de 60 años? *

Marca solo un óvalo.

- Si
- No

11. ¿En su residencia habitan personas menores de 5 años? *

Marca solo un óvalo.

- Si
- No

B. Cuestionario estado actual de salud

12. ¿Está actualmente bajo algún tratamiento médico? *

Marca solo un óvalo.

- Si
- No

13. Si su respuesta fue Si ¿Cuál es la enfermedad o enfermedades para la(s) que recibe tratamiento?

14. ¿Padece o a padecido asma? *

Marca solo un óvalo.

- Si
- No

15. ¿Padece o a padecido rinitis? *

Marca solo un óvalo.

Si
No

16. ¿Padece o a padecido hipertensión arterial? *

Marca solo un óvalo.

Si
No

17. ¿Ha presentado infecciones respiratorias en el último año? *

Marca solo un óvalo.

Si
No

18. ¿Ha presentado alguna enfermedad cardiaca en el último año? *

Marca solo un óvalo.

Si
No

19. ¿Sufre de alguna alergia? *

Marca solo un óvalo.

Si
No

20. Si su respuesta fue Si ¿A qué es alérgico?

21. ¿Realiza actividad física? *

Marca solo un óvalo.

Si
No

22. Si su respuesta fue Si, ¿realiza actividad física al aire libre o en espacio cerrado?

Marca solo un óvalo.

- Al aire libre
- En espacio cerrado

23. Si su respuesta fue Si, ¿Con qué frecuencia realiza actividad física?

Marca solo un óvalo.

- 7 veces a la semana
- 5 veces a la semana
- 3 veces a la semana
- 1 vez a la semana
- 2 veces al mes
- 1 vez al mes

24. ¿Es fumador? *

Marca solo un óvalo.

- Si
- No

25. Si su respuesta fue Si, ¿Cuántos cigarrillos consume al día?

Marca solo un óvalo.

- Entre 1 y 5
- Entre 6 y 10
- Entre 11 y 15

26. ¿Con qué frecuencia consume licor? *

Marca solo un óvalo.

- No consumo licor
- 1 vez al mes
- 1 vez a la semana
- De 2 a 3 veces a la semana

4 o más veces a la semana

27. ¿Con qué frecuencia acude a consulta médica? *

Marca solo un óvalo.

1 vez al mes

1 vez cada 6 meses

1 vez al año

Cada 2 años o más

- **Encuesta semanal percepción calidad del aire y estado de salud**

Gracias por participar en el estudio: Análisis de los efectos de la calidad del aire en la percepción de la salud usando una metodología de participación comunitaria. Municipio de La Ceja Antioquia.

Por favor responda a las preguntas con total honestidad esto garantizará la veracidad y utilidad de la información.

* Indica que la pregunta es obligatoria

Consentimiento

Esta encuesta busca conocer la percepción del estado de salud relacionado con la calidad del aire de los participantes del proyecto. Los resultados obtenidos serán usados con fines estrictamente académicos e investigativos garantizando su confidencialidad.

1. Para confirmar que conoce los objetivos del proyecto y otorga su consentimiento para la inclusión de sus respuestas en el estudio, le solicitamos conteste SI o NO *:

Marca solo un óvalo.

Si

No

2. Fecha de diligenciamiento de la encuesta. Llenar así: Día, mes, año *

Ejemplo: 7 de enero de 2019

3. Semana para la que diligencia la encuesta.

Por favor revise el listado a continuación y escriba el número que corresponde a la semana para la cual está diligenciando la encuesta.

SEMANA N°	COMPRENDIDA ENTRE
0	27 de diciembre al 2 de enero
1	3 al 9 de enero
2	10 al 16 de enero
3	17 al 23 de enero
4	24 al 30 de enero
5	31 de enero al 6 de febrero
6	7 al 13 de febrero
7	14 al 20 de febrero
8	21 al 27 de febrero
9	28 de febrero al 6 de marzo
10	7 al 13 de marzo
11	14 al 20 de marzo
12	21 al 27 de marzo
13	28 de marzo al 3 de abril
14	4 al 10 de abril
15	11 al 17 de abril
16	18 al 24 de abril
17	25 de abril al 1 de mayo
18	2 al 8 de mayo
19	9 al 15 de mayo
20	16 al 22 de mayo
21	23 al 29 de mayo
22	30 de mayo a 5 de junio
23	6 al 12 de junio
24	13 al 19 de junio
25	20 al 26 de junio
26	27 de junio al 3 de julio
27	4 al 10 de julio
28	11 al 17 de julio
29	18 al 24 de julio
30	25 al 31 de julio
31	1 al 7 de agosto
32	8 al 14 de agosto
33	15 al 21 de agosto
34	22 al 28 de agosto
35	29 de agosto al 4 de septiembre

36	5 al 11 de septiembre
37	12 al 18 de septiembre
38	19 al 25 de septiembre
39	26 de septiembre al 2 de octubre
40	3 al 9 de octubre
41	10 al 16 de octubre
42	17 al 23 de octubre
43	24 al 30 de octubre
44	31 de octubre al 6 de noviembre
45	7 al 13 de noviembre
46	14 al 20 de noviembre
47	21 al 27 de noviembre
48	28 de noviembre al 4 de diciembre
49	5 al 11 de diciembre
50	12 al 18 de diciembre
51	19 al 25 de diciembre
52	26 de diciembre al 1 de enero

4. Número del participante *

A. Encuesta semanal

5. ¿Cómo percibe su estado de salud durante esta semana? *

Marca solo un óvalo.

Bueno (Me he sentido muy bien)

Regular (Me he sentido un poco enfermo)

Malo (Me he sentido muy enfermo)

6. Durante esta semana ha presentado (puede marcar varias opciones) *

Selecciona todas las opciones que correspondan.

Ardor en los ojos

Dolor de garganta

Rinitis

Dificultad para respirar

Dolor en el pecho

- Ansiedad
- Mareo
- Otros síntomas
- Ningún síntoma

7. Si su respuesta fue Otros, ¿Qué síntomas presentó? *

8. ¿Durante esta semana, usted visitó al médico? *

Marca solo un óvalo.

- Si
- No

9. Si su respuesta fue Si, la razón de su visita al médico fue:

10. Si su respuesta fue Me sentía enfermo, ¿Cuál fue el diagnóstico médico?

Marca solo un óvalo.

- Me sentía enfermo
- Fui a una cita de control

11. ¿Alguna de las personas que vive con usted estuvo enferma esta semana? *

Marca solo un óvalo.

- Si
- No

12. Si la respuesta fue Si, ¿puede indicar la edad de esa persona?

Marca solo un óvalo.

- Entre 0 y 5 años
- Entre 6 y 17 años
- Entre 18 y 25 años

- Entre 26 y 40 años
- Entre 41 y 60 años
- 61 años o más

13. Si la respuesta fue Si, ¿puede indicar que síntomas presentó? *

Marca solo un óvalo.

Selecciona todas las opciones que correspondan.

- Ardor en los ojos
- Dolor de garganta
- Rinitis
- Dificultad para respirar
- Dolor en el pecho
- Ansiedad
- Mareo
- Otros síntomas
- Ningún síntoma

14. ¿Cómo considera que estuvo la calidad del aire durante esta semana? *

Marca solo un óvalo.

- Buena
- Regular
- Mala

15. ¿En qué momento del día percibió una mejor calidad del aire durante esta semana? *

Marca solo un óvalo.

- Mañana
- Tarde
- Noche

- **Encuesta final de estado de salud**

Gracias por participar en el estudio: Análisis de los efectos de la calidad del aire en la percepción de la salud usando una metodología de participación comunitaria. Municipio de La Ceja Antioquia.

Por favor responda a las preguntas con total honestidad esto garantizará la veracidad y utilidad de la información.

* Indica que la pregunta es obligatoria

Consentimiento

Esta encuesta busca conocer el estado de salud de los participantes al final del proyecto. Los resultados obtenidos serán usados con fines estrictamente académicos e investigativos garantizando su confidencialidad.

1. Para confirmar que conoce los objetivos del proyecto y otorga su consentimiento para la inclusión de sus respuestas en el estudio, le solicitamos conteste SI o NO *:

Marca solo un óvalo.

Si

No

2. Fecha de diligenciamiento de la encuesta. Llenar así: Día, mes, año *

Ejemplo: 7 de enero de 2019

3. Número del participante *

A. Datos generales

4. Edad *

Marca solo un óvalo.

Entre 18 y 25 años

- Entre 26 y 40 años
- Entre 41 y 60 años
- 61 años o más

5. Género *

Marca solo un óvalo.

- Femenino
- Masculino
- Prefiero no decirlo

6. Nivel educativo *

Marca solo un óvalo.

- Primaria
- Bachillerato
- Técnico
- Profesional
- Posgrado

7. Ocupación actual *

8. Sector o barrio donde reside *

9. Sin incluirse usted, ¿cuántas personas habitan en su residencia?

Marca solo un óvalo.

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 o más

10. ¿En su residencia habitan personas mayores de 60 años? *

Marca solo un óvalo.

Si

No

11. ¿En su residencia habitan personas menores de 5 años? *

Marca solo un óvalo.

Si

No

B. Cuestionario estado actual de salud

12. ¿Está actualmente bajo algún tratamiento médico? *

Marca solo un óvalo.

Si

No

13. Si su respuesta fue Si ¿Cuál es la enfermedad o enfermedades para la(s) que recibe tratamiento?

14. ¿Padece o a padecido asma? *

Marca solo un óvalo.

Si

No

15. ¿Padece o a padecido rinitis? *

Marca solo un óvalo.

Si

No

16. ¿Padece o a padecido hipertensión arterial? *

Marca solo un óvalo.

Si

No

17. ¿Ha presentado infecciones respiratorias en el último año? *

Marca solo un óvalo.

Si

No

18. ¿Fue diagnosticado con COVID el último año? *

Marca solo un óvalo.

Si

No

19. ¿Ha presentado alguna enfermedad cardiaca en el último año? *

Marca solo un óvalo.

Si

No

20. ¿Sufre de alguna alergia? *

Marca solo un óvalo.

Si

No

21. Si su respuesta fue Si ¿A qué es alérgico?

22. ¿Realiza actividad física? *

Marca solo un óvalo.

- Si
- No

23. Si su respuesta fue Si, ¿realiza actividad física al aire libre o en espacio cerrado?

Marca solo un óvalo.

- Al aire libre
- En espacio cerrado

24. Si su respuesta fue Si, ¿Con qué frecuencia realiza actividad física?

Marca solo un óvalo.

- 7 veces a la semana
- 5 veces a la semana
- 3 veces a la semana
- 1 vez a la semana
- 2 veces al mes
- 1 vez al mes

25. ¿Es fumador? *

Marca solo un óvalo.

- Si
- No

26. Si su respuesta fue Si, ¿Cuántos cigarrillos consume al día?

Marca solo un óvalo.

- Entre 1 y 5
- Entre 6 y 10
- Entre 11 y 15

27. ¿Con qué frecuencia consume licor? *

Marca solo un óvalo.

- No consumo licor

- 1 vez al mes
- 1 vez a la semana
- De 2 a 3 veces a la semana
- 4 o más veces a la semana

28. ¿Con qué frecuencia acude a consulta médica? *

Marca solo un óvalo.

- 1 vez al mes
- 1 vez cada 6 meses
- 1 vez al año
- Cada 2 años o más