


Artículo Original / Article

Eficacia de las medidas de calidad del aire para prevenir episodios críticos atmosféricos. Caso Valle de Aburrá Colombia

Effectiveness of Air Quality Measures in Preventing Critical Atmospheric Episodes. Case Study: Aburrá Valley, Colombia

Dora Yepes,  Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Facultad de Ingeniería, Colombia

Miriam Gómez,  Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Facultad de Ingeniería, Colombia

Liliana Arroyave,  Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Facultad de Ingeniería, Colombia

CÓMO CITAR: Yepes, D., Gómez, M. y Arroyave, L. (2025). Eficacia de las Medidas de Calidad del Aire para Prevenir Episodios Críticos Atmosféricos. Caso Valle de Aburrá Colombia. *Revista de Urbanismo*, (53), 1-24. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2025.78760>

CONTACTO PRINCIPAL: dlyepes@elpoli.edu.co

Resumen: Diversas ciudades del mundo enfrentan eventos atmosféricos críticos derivados de elevados niveles de contaminación y de otros factores que amplifican su impacto en la salud, la economía y el ambiente. Para el Valle de Aburrá, Colombia, los eventos declarados evidenciaron la falta de conocimiento válido para evaluar las medidas del Plan Integral de Gestión de Calidad del Aire (PIGECA 2017-2030). Estos episodios, asociados al contaminante criterio $PM_{2.5}$, han obligado a la autoridad ambiental del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) a declarar periodos de gestión de episodios de contaminación atmosférica.

Como estrategia de prevención, entre 2017 y 2022 se validaron siete medidas prioritarias, a partir del análisis de tendencias del $PM_{2.5}$ y de algunas de sus características químicas antes y después del PIGECA. Los resultados permitieron determinar la eficacia del conjunto de medidas en la disminución de este contaminante crítico para la salud, y sirvieron además como criterio para la toma de decisiones por parte del AMVA en favor del bienestar de la población.

Palabras clave: Calidad del aire, medidas de prevención de calidad del aire, material particulado $PM_{2.5}$, planes de calidad del aire

Abstract: Various cities around the world face critical atmospheric events stemming from high levels of pollution and other factors that amplify their impact on health, the economy, and the environment. In the Aburrá Valley, Colombia, these events highlighted a lack of valid data for evaluating the measures of the Comprehensive Air Quality Management Plan (PIGECA 2017-2030). These episodes, associated with the criteria pollutant $PM_{2.5}$, have forced the environmental authority of the Aburrá Valley Metropolitan Area (AMVA) to declare periods for managing air pollution episodes.

As a prevention strategy, between 2017 and 2022, seven priority measures were validated based on an analysis of $PM_{2.5}$ trends and some of its chemical characteristics before and after the implementation of PIGECA. The results allowed for determining the effectiveness of the set of measures in reducing this critical pollutant and served as a criterion for AMVA decision-making to protect public health.

Keywords: Air quality, air quality prevention measures, $PM_{2.5}$ particulate matter, air quality plans

Introducción

El entorno urbano, donde reside la mayoría de la población mundial y se consume una importante proporción de la energía, es también el ámbito donde los habitantes se encuentran más expuestos a la contaminación atmosférica. Existe consenso global acerca de los impactos negativos antropogénicos en el clima, los que se manifiestan en múltiples dimensiones, incluyendo sus efectos en los ecosistemas, la salud humana, el bienestar y los estilos de vida (Smith et al., 2025). En este contexto, Medina et al. (2021)—citando un reporte de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, 2012)— pronostica que, para el año 2050, la contaminación del aire será la causa principal de mortalidad, superando a la ocasionada por el agua contaminada y el saneamiento.

En este marco global de la problemática urbana y los riesgos asociados a la calidad del aire, resulta pertinente analizar contextos locales que, por sus características geográficas y demográficas, presentan una especial vulnerabilidad. Tal es el caso del Valle de Aburrá (VA), subregión localizada en el centro-sur de Antioquia, en la cordillera central de Los Andes, al noroccidente de Colombia y en el extremo noroccidental de Suramérica (Figura 1). Con una extensión de 1.152 km² y una altitud promedio de 1.500 m s. n. m., este valle cuenta con diversas estaciones de monitoreo de calidad del aire que permiten evaluar su problemática ambiental. El VA, con cerca de 4 millones de habitantes, es atravesado de norte a sur por el río Medellín-Aburrá-Porce, el cual actúa como un eje articulador clave dentro de la conurbación y de la estructura urbano-regional (Consejo Territorial de Planeación de Antioquia, 2020). Se trata de un corredor urbano de 10 municipios con Medellín como su ciudad principal. Es un valle estrecho de morfología cerrada entre montañas, donde se presentan recurrencias de inversiones térmicas durante los períodos de transición climática (marzo y octubre). Estas condiciones, de escasa dispersión atmosférica, favorecen la acumulación de contaminantes en capas bajas de la atmósfera bajo situaciones de estabilidad meteorológica, lo que incrementa la probabilidad de episodios críticos de contaminación. Debido a estas características, la zona fue declarada por la autoridad ambiental urbana como cuenca atmosférica. En este valle se han incrementado desde 2016 los niveles de contaminación atmosférica, en particular los referidos al PM_{2,5}, producido principalmente por fuentes móviles, en especial, vehículos que funcionan con motores diésel, además de equipos de construcción, hornos, plantas generadoras de energía, entre otras fuentes. Estos fenómenos de inversión térmica han exigido la declaración de estados de alerta y emergencia de la calidad del aire para garantizar la salud de los ciudadanos (Área Metropolitana del Valle de Aburrá [AMVA], 2018).

Para enfrentar esta problemática, el AMVA, como autoridad ambiental urbana de la región, viene implementando el Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire del Valle de Aburrá (PIGECA), y, específicamente para períodos de gestión de episodios, el Plan Operacional con medidas más restrictivas. Esta situación motivó a investigadores a determinar la eficacia de un conjunto de medidas prioritarias orientadas a la prevención de dichos episodios, centradas en la reducción del PM_{2,5}, debido a los impactos severos sobre la salud que tiene este contaminante y que fueron mencionados anteriormente (Rodríguez-Villamizar et al., 2019). El objetivo planteado en el estudio se enfocó en la evaluación de las medidas, a fin de dimensionar su eficacia e impacto en el mejoramiento de la calidad del aire, en especial, en términos de la reducción de partículas, lo que a su vez se traduce en menores riesgos para la salud.

Para evaluar la eficacia de las medidas prioritarias para reducir emisiones, se consideraron 15 indicadores vinculados con siete medidas, entre ellos: la concentración PM_{2,5}, los contenidos de azufre (S) en los combustibles e históricos de especiación del PM_{2,5}, además de la renovación de la flota del transporte público colectivo (TPC). Los resultados mostraron impactos favorables de las medidas para los diferentes indicadores.

Como contexto, se describe un breve marco teórico acerca de la contaminación atmosférica y sus impactos generales, un análisis de casos exitosos en la evaluación de planes de calidad del aire y una contextualización de la problemática en la Región Metropolitana Valle de Aburrá.

Marco teórico

El fenómeno de la contaminación atmosférica se ha convertido en el principal riesgo medioambiental para la salud humana, afectando especialmente a los habitantes de zonas densamente pobladas (Quirama-Aguilar et al., 2021). La presencia de sustancias nocivas en el aire tiene consecuencias perjudiciales para el bienestar de las personas, tanto de manera inmediata como a lo largo del tiempo. Datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) muestran que anualmente fallecen prematuramente 7 millones de personas a causa de la contaminación del aire ambiental, y más del 90 % de estas muertes ocurren en países de ingresos bajos y medios (Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado, 2018). Esto refleja una desigualdad en la exposición y en las consecuencias de dicho problema que no solo afecta directamente a la salud, sino que también contribuye al fenómeno del cambio climático, multiplicando de esta forma sus efectos negativos (Represa, 2020).

En este contexto, estudios específicos para América Latina permiten dimensionar la magnitud regional de la problemática. Gouveia et al. (2021) analizaron la exposición a material particulado fino ($PM_{2.5}$) en 366 ciudades latinoamericanas mediante estimaciones satelitales, contrastando los valores obtenidos con la guía anual de la OMS para la protección de la salud ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Los resultados evidenciaron que Argentina, Perú y Chile presentan los mayores porcentajes de población expuesta a concentraciones promedio anuales superiores al estándar de la OMS. En contraste, los países centroamericanos registraron las menores proporciones de exposición, con excepción de México. En el caso de Colombia, el estudio reportó que el 38 % de la población habita en zonas donde la concentración anual de $PM_{2.5}$ supera los $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, porcentaje inferior al observado en la mayoría de los países de Suramérica.

En este sentido, dado que en muchos países de la región la cobertura de estaciones de monitoreo es insuficiente, la información satelital se ha consolidado como una herramienta clave para complementar los estudios de calidad del aire y ampliar la comprensión del problema a escala global. Con este enfoque, Donkelaar et al. (2014) desarrollaron estimaciones de $PM_{2.5}$ a nivel mundial, combinando datos satelitales y modelos atmosféricos, lo que permitió evaluar la exposición poblacional y sus impactos en salud (Brauer et al., 2015). De igual forma, Lamsal et al. (2014) y Duncan et al. (2015) utilizaron sensores satelitales para analizar la evolución del NO_2 en diversas ciudades y regiones, mientras que Krotkov et al. (2016) elaboraron inventarios globales de SO_2 vinculados con emisiones industriales. Finalmente, Edwards et al. (2004) y Worden et al. (2013) aprovecharon los instrumentos MOPITT, AIRS, TES e IASI para construir registros de largo plazo del CO, evidenciando sus variaciones a escala regional y global. En Colombia, estudios recientes han identificado la contaminación del aire como el factor ambiental predominante en la ocurrencia de muertes prematuras en el país (Instituto Nacional de Salud, 2019). Así mismo, el estudio sobre la carga de enfermedad y los costos de atención en salud en Colombia (Universidad Autónoma de Manizales, 2021) identificó una correlación directa con el PM_{10} , aunque destacó que el contaminante de mayor riesgo por su capacidad de penetración es el $PM_{2.5}$, cuya medición sigue siendo insuficiente en el país. Según el Instituto de Métricas y Evaluación en Salud, cerca del 19 % de la carga de EPOC se atribuye a factores ambientales, especialmente al $PM_{2.5}$. Estos resultados muestran la necesidad de fortalecer los sistemas de monitoreo y control de episodios críticos de contaminación para anticipar riesgos, reducir muertes prematuras y evitar hospitalizaciones por enfermedades respiratorias crónicas.

Para la evaluación de la calidad del aire se han adoptado estrategias de monitoreo centradas en la medición de los contaminantes criterio, PM_{10} , $PM_{2.5}$, dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono troposférico (O_3) y monóxido de carbono (CO). Según la Resolución colombiana N.º 2.254 de 2017, cuando las concentraciones superan los niveles máximos permisibles señalan una situación de riesgo tanto para la población como para el ambiente. Para ello se han establecido límites máximos aceptables con márgenes de seguridad o umbrales que sirven como referencia para determinar si la calidad del aire es adecuada o representa un riesgo (Represa, 2020). Así mismo, la OMS ha determinado directrices que indican niveles de exposición máxima a contaminantes atmosféricos, a fin de proteger la salud de la población (UN Environment Programme, 2021).

Para prevenir y controlar el problema de la polución se requieren instrumentos de gestión, evaluación y monitoreo definidos en los planes de calidad del aire. Se han identificado dos tipos: 1) planes de gestión o prevención de mediano o largo plazo; 2) y planes para enfrentar episodios atmosféricos o de corto plazo, que incluyen medidas adicionales para atender eventos de alta contaminación y proteger la salud de la población (Borge et al., 2018). Sin embargo, estos instrumentos deben ser objeto de seguimiento y evaluación con el fin de determinar la eficacia de sus medidas para la reducción de contaminantes y, de paso, para generar conocimiento de utilidad en actualización y proyección de estos instrumentos y la toma de decisiones.

Internacionalmente, hay un déficit general de información sobre la evaluación de los planes de calidad del aire con base en indicadores de reducción de contaminantes. No obstante, una revisión de planes implementados en 15 ciudades del mundo con episodios críticos de contaminación (Trejos y Yepes, 2024) evidenció patrones estadísticamente consistentes entre las tipologías de acciones contempladas, no obstante, persiste una notoria escasez de información respecto de la efectividad de cada medida. Un referente destacado es el caso del Área Metropolitana de Beijing, donde la evaluación de sus planes ha generado conocimiento valioso al demostrar la eficacia de diversas medidas en la reducción del $PM_{2.5}$ y otros contaminantes, como resultado de estrategias exitosas de prevención y control.

En el área metropolitana y la región de BTH (Beijing y Tianjin y la provincia de Hebei) —en la costa noreste de China, donde se presentan episodios de calidad del aire (Xin et al., 2015)— se implementaron una serie de medidas (Wang et al., 2018) contenidas en el Plan de Acción 2012-2017 para la prevención y el control de contaminación atmosférica para las regiones de BTH, delta del río Yangtze y delta del río Pearl. La primera fase, culminada en 2018, logró la reducción del 22 % de contaminantes y la eliminación de $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de tóxicos. Sin embargo, la calidad del aire continuó superando los estándares de la OMS (Decreto N.º 105 de 2019). El reporte de la evaluación del plan (UN Environment, 2019) mostró que, en cinco años, las concentraciones medias anuales de $PM_{2.5}$ en Beijing disminuyeron de $89,5$ a $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$, superando el objetivo trazado por el Consejo del Estado ($60 \mu\text{g}/\text{m}^3$), al igual que SO_2 y NO_2 y PM_{10} bajaron significativamente. De manera específica, la medida “Establecimiento de un mecanismo regional de cooperación, coordinación y gobernanza ambiental para la prevención y el control de la polución en la región” presentó un factor de éxito asociado a la planificación colaborativa, que permitió unificar estándares para 28 ciudades, fortalecer la respuesta conjunta a emergencias y el intercambio de información. Del mismo modo, a través del control de las calderas de carbón de menos de 7MW, la optimización de la estructura industrial del sector manufacturero mediante el cierre, reubicación y ajustes de más de 1.900 empresas contaminantes llevaron a la reducción de sus emisiones (UN Environment, 2019).

Mientras el modelo de Beijing demostró una evaluación muy eficaz del plan en el contexto asiático, la Unión Europea (UE) también ha desarrollado herramientas innovadoras para abordar sus desafíos en materia de calidad del aire y con el objetivo de alinearse con las directrices de la OMS. Se desarrolló la evaluación parcial de la eficacia de medidas para reducir la contaminación por NO_2 proveniente principalmente del tráfico y otras fuentes de emisión. Para evaluar su impacto y las reducciones de emisiones en diversos sectores sobre las concentraciones de NO_2 , se creó una aplicación web de distribución de fuentes de alta resolución que abarcara toda la UE y permitiera a los usuarios definir y visualizar de manera accesible y rápida escenarios de concentración de NO_2 en estaciones de medición. La aplicación utiliza una combinación del modelo de fuente-receptor SHERPA y el modelo de dispersión de núcleo QUARK, para capturar con precisión las diversas escalas espaciales de contaminación por NO_2 , considerando impactos a larga distancia y los gradientes de concentración cercanos a carreteras (Degraeuwe et al., 2024).

De otro lado, en Chandigarh al norte de la India, el objetivo se enfocó en reducir la contaminación por material particulado (PM) entre un 20 % y 30 % para 2024 y un 40 % para 2026, a partir de la cuantificación de los efectos del Programa Nacional de Aire Limpio (PNAL). Para ello se analizó el impacto en la calidad del aire entre 2021 y 2022, observándose un aumento en las concentraciones de PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y CO en 2022 con respecto a 2021. Sin embargo, este incremento fue limitado gracias a medidas específicas del PNAL. Entre las acciones se destacan los subsidios para vehículos eléctricos y control riguroso de emisiones vehiculares, el impulso a la expansión de áreas verdes y la construcción de ciclo vías y el uso de bicicletas para reducir el tráfico vehicular lento y las emisiones. Con base en este análisis, el estudio propuso nuevas medidas a nivel micro para mejorar los resultados del programa (Dhote et al., 2024).

Del mismo modo, en la región de Lombardía, una de las áreas más contaminadas de Europa, se llevó a cabo una iniciativa enfocada solamente en las emisiones de carbono mediante la implementación de un modelo de evaluación integrada basado en un enfoque multiobjetivo para abordar simultáneamente los desafíos del cambio climático y calidad del aire. Fue diseñado para ayudar a los tomadores de decisiones a definir planes eficientes de baja emisión de carbono y acciones de mejora de la calidad del aire (Arrighini et al., 2023).

Sin embargo, para el Valle de Aburrá no existe el nivel de conocimiento valioso del modelo Beijing, toda vez que hay déficit de información sobre el seguimiento de las medidas de calidad del aire del PIGECA, a fin de determinar su eficacia en términos de la reducción de contaminantes y prevención de episodios de contaminación atmosférica. En el Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire del VA proyectado al año 2030 se reconoce la importancia de la implementación de sistemas para minimizar y controlar las emisiones, la promoción y la adopción de tecnologías más limpias, el uso de combustibles limpios y energías vehiculares más amigables con el ambiente, mejoras en el sistema de transporte público masivo, optimización de la flota de vehículos públicos, diseño de rutas con criterios ambientales y el fomento de un uso más responsable de vehículos privados y transporte público, entre otros. Pese a los esfuerzos desde la planeación y el control, aún se presentan los eventos críticos.

Metodología

La siguiente investigación parte de la descripción del proceso de priorización de medidas del PIGECA para prevenir episodios, de la actualización y seguimiento de indicadores, la evaluación de la eficacia con base en el comportamiento de las concentraciones y algunas características químicas del contaminante crítico en la región $\text{PM}_{2.5}$. Finalmente, se relaciona el análisis de resultados partiendo del comportamiento durante el período (2017-2022) de los indicadores asociados a las medidas priorizadas.

Contexto de las medidas priorizadas para la prevención de episodios

La metodología aplicada para evaluar la eficacia de las medidas priorizadas del PIGECA se inició con la selección de aquellas relevantes para la prevención de los períodos de gestión de episodios de contaminación (PGE). Las medidas fueron seleccionadas como prioritarias para reducir los mayores niveles de contaminación en coherencia con la importancia de la prevención de los efectos sobre la salud y exposición más severa de la población (AMVA, 2021).

El Grupo de Higiene y Gestión Ambiental (GHYGAM) del Politécnico Jaime Isaza Cadavid (PCJIC), apoyado por la autoridad ambiental el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), realizó el taller de expertos denominado 'Juega con medidas por un mejor aire', con el objetivo de concertar las medidas más determinantes del PIGECA 2017-2030 y sus principales características para la prevención de episodios críticos atmosféricos en la región. La base de información fue un conjunto de 22 medidas con potencial para reducir emisiones atmosféricas (AMVA & Clean Air Institute, 2017). En el taller se aplicó el método de estructuración Delphi para captar la forma de pensar, sentir y percibir de un grupo de expertos en el tema y conocedores de la región. Los nueve expertos respondieron gradualmente una serie de preguntas semiestructuradas con el objetivo de llegar a un consenso entre ellos, mediante análisis y reflexión sobre el problema. Así, se dieron convergencias de opiniones, partiendo de la elaboración individual de esquemas de respuesta a cada pregunta, sin generar discusión grupal; posteriormente, se realizó la unificación o suma de respuestas, como actividad colectiva (Yepes y Gómez, 2023). El producto final fue una batería de siete medidas prioritarias para prevenir las contingencias atmosféricas:

1. M1: Expansión, fortalecimiento, fomento y modernización del transporte público.
2. M2: Políticas para reducir el impacto del transporte de carga y volquetas.
3. M3: Promoción del uso de bicicletas públicas mediante su integración al Sistema Integrado de Transporte del VA - SITVA.
4. M4: Mejora de la calidad del diésel y la gasolina.
5. M5: Introducción acelerada de vehículos de ultra bajas emisiones y emisiones cero.
6. M6: Ampliación, conectividad e integración de la red de infraestructura para la bicicleta.
7. M7: Establecimiento de lineamientos de zonificación con criterios de calidad del aire.

Para la batería de estas siete medidas prioritarias para la prevención de episodios críticos, se establecieron 15 indicadores de seguimiento y, para cada uno de ellos, se recopiló información base para su actualización como se describe en la Tabla 1. Estos indicadores constituyen una base de la gestión de la información y prevención de la contaminación atmosférica que realiza el AMVA.

Seguimiento de indicadores de medidas priorizadas para la prevención de episodios críticos en el Valle de Aburrá 2017-2022

La técnica empleada para el seguimiento de los indicadores asociados a cada medida incluyó la revisión bibliográfica exhaustiva de fuentes primarias y secundarias. Esta se llevó a cabo explorando diversas fuentes de información científica y documentación disponible en estudios y bases de datos, como: publicaciones científicas y académicas; informes institucionales de organismos gubernamentales, agencias ambientales y organizaciones internacionales que apoyan la gestión de la calidad del aire; bases de datos especializadas y estadísticas oficiales que contuvieran información sobre la calidad del aire, emisiones contaminantes y otros datos relevantes; la red de vigilancia de calidad del aire (REDEAM); el Sistema de Alerta Temprana de la Secretaría de Movilidad (SIATA), entre otros. Finalmente, se realizó

consulta oficial a entidades como el AMVA, la Secretaría de Movilidad, la Secretaría de Medio Ambiente y la Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol), entre otros.

La búsqueda de la información para el seguimiento a los indicadores se abordó bajo la ventana de observación 2017-2022, tomando como referente el estudio de Yepes y Gómez (2023). Es importante destacar que para algunos indicadores no se logró recopilar suficiente información durante el período de estudio.

Después de obtener la información de los indicadores vinculados con cada medida priorizada, se aplicaron criterios técnicos para inferir sobre su eficacia. En la Tabla 1 se relacionan las medidas, indicadores y criterios.

Tabla 1
Criterios definidos para determinar la eficacia de indicadores de las medidas para la prevención de episodios críticos en el Valle de Aburrá

Medida	Indicador	Unidad	Criterio / Requisito
M1	Porcentaje de viajes en transporte público (TPC) en la distribución modal (1).	Porcentaje	Aumentos en el porcentaje de usuarios del TPC contribuyen a disminuir emisiones de PM _{2.5} .
	Pasajeros en el Sistema Integrado de Transporte - SITVA (subsistema de transporte masivo).	Millones	Aumento en el número de pasajeros en el SITVA contribuye a disminuir emisiones de PM _{2.5} .
M2	Número de vehículos de carga y volquetas desintegrados al año.	Número	Aumentos en el número de vehículos de carga y volquetas chatarrados o desintegrados contribuyen a disminuir emisiones de PM _{2.5} .
	Vehículos circulantes de carga y/o volquetas con tecnología Euro V/5 y VI/6 al año.	Número	Un aumento en el número de vehículos de carga y volquetas circulantes con tecnología con tecnología Euro V/5 y VI/6 (unidad/año) vendidos, contribuyen a disminuir emisiones de PM _{2.5} .
M3	Número de estaciones del Sistema de Bicicletas Públicas EnCicla.	Número	Un aumento en el número de estaciones de EnCicla contribuye a disminuir emisiones de PM _{2.5} .
	Cobertura del EnCicla.	km ²	Un aumento en los kilómetros de cobertura del sistema de bicicletas contribuye a disminuir emisiones de PM _{2.5} .
	Número de usuarios activos en EnCicla.	Miles	Un incremento en el promedio del número usuarios activos en el sistema de bicicletas contribuye a disminuir emisiones de PM _{2.5} .
	Préstamos anuales EnCicla.	Millones	Un aumento de los préstamos anuales en el sistema de bicicletas públicas contribuye a disminuir emisiones de PM _{2.5} .
M4	Contenido de S en el diésel que se distribuye en el VA.	ppm	La disminución del contenido de S en el diésel contribuye a disminuir emisiones de PM _{2.5} .
	Contenido de S en la gasolina que se distribuye en VA.	ppm	La disminución del contenido de S en la gasolina contribuye a disminuir emisiones de PM _{2.5} .
	Porcentaje de aporte al PM _{2.5}	Porcentaje	Un menor porcentaje de aporte o contribución de fuentes móviles al PM _{2.5} representa una eficacia en la mejora del diésel y en la gestión de las medidas del sector transporte.
M5	Concentraciones de PM _{2.5}	ppm	Una tendencia al aumento del PM _{2.5} antes de la implementación del PIGECA y a la disminución después, representa mayor eficacia de medidas.
	Número de vehículos eléctricos e híbridos registrados al año.	Número	Un aumento en el porcentaje de vehículos eléctricos - híbridos registrados contribuye a disminuir emisiones de PM _{2.5} .
M6	Número de estaciones de carga de vehículos híbridos/eléctricos.	Número	Un incremento en el número de estaciones de carga de vehículos híbridos/eléctricos contribuye a bajar emisiones de PM _{2.5} .
	Cobertura de ciclo rutas construidos y operativos.	km	Un aumento en la cobertura de ciclo-rutas construidas y operativas contribuyen a disminuir emisiones de PM _{2.5} .
M7	Número de estacionamientos para bicicletas instalados.	Número	Un aumento en el número de estacionamientos instalados contribuye a disminuir emisiones de PM _{2.5} .
	Número de Zonas Urbanas de Aire Protegido (ZUAP) implementadas.	Número	Un aumento en el número de ZUAP implementadas contribuyen a disminuir emisiones de PM _{2.5} .

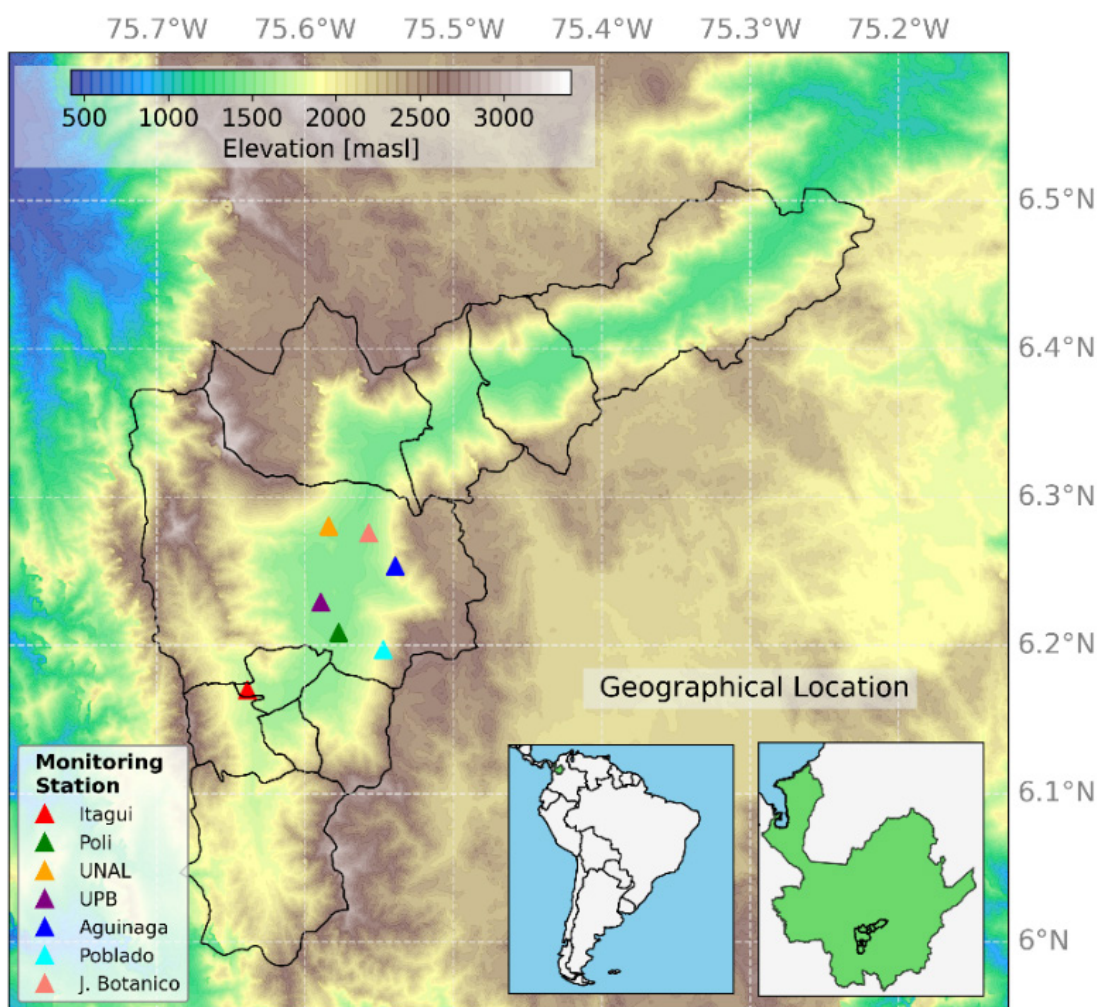
Nota. (1) Transporte público incluye SITVA, transporte público colectivo, alimentadores y taxis.

Evaluación del comportamiento del $PM_{2.5}$ para el periodo previo y posterior al establecimiento del PIGECA

Para evaluar la reducción de las concentraciones de $PM_{2.5}$ se obtuvo información de registros horarios capturados diariamente durante periodos de 24 horas en estaciones de monitoreo de calidad del Proyecto de Sistema de Alerta Temprana del municipio de Medellín (SIATA, AMVA, entre 2017 y 2023)(Figura 1).

Figura 1

Estaciones de monitoreo de calidad del aire. Valle de Aburrá 2011-2022



Nota. Elaboración propia.

Para la definición de la eficacia de las medidas del PIGECA con relación al $PM_{2.5}$ fue importante analizar las tendencias durante un periodo previo al PIGECA (2011-2016) y durante la implementación (2017-2022). Este segundo periodo, se dividió en dos subperiodos, debido a las condiciones inesperadas por el COVID-19 y las restricciones de aislamiento social como medida de protección. Para evitar este sesgo, se eliminaron los datos entre 20 de marzo y el 30 de junio de 2020, periodos denominados de aislamiento obligatorio que implicaron el cierre de todas las actividades de la ciudad y la flexibilización de medidas de prevención y control.

Para el análisis estadístico de tendencias de los datos 2011-2016 y 2017-2022 se usó la prueba de Mann-Kendall, utilizando plataforma o al lenguaje Python y el paquete pymannkendall. El valor tau infiere el crecimiento o decrecimiento de la serie de datos por medio del signo positivo o negativo, respectivamente. La prueba se respalda con el valor p , el cual introduce la posibilidad de la no identificación de tendencia (valor $p > 0,05$) (Kendall, 1975; Mann, 1945). En cada estación de monitoreo se calculó el promedio diario del $PM_{2,5}$, con un mínimo (75 %) de los datos del día. El comportamiento de los datos se comparó con los valores de referencia establecidos por la OMS, la normativa nacional de calidad del aire y la meta de reducción establecida por el PIGECA para el año 2030.

Evaluación de la eficacia de medidas priorizadas para la prevención de episodios críticos con base en las caracterización del $PM_{2,5}$

Algunos indicadores basados en la caracterización del $PM_{2,5}$ fueron evaluados en estudios realizados con la cofinanciación del AMVA, en especial en los últimos años, mediante los Convenios 734 de 2019 (AMVA y Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid [PCJIC], 2019; Gómez, et al., 2019).

La fundamentación para la selección y evaluación de los indicadores se basó en una revisión de literatura científica en bases de datos Scopus y Scielo bajo criterios de búsqueda enfocados en trazadores de fuentes reportados y validados sobre la correlación entre la especiación química del $PM_{2,5}$ y fuentes de emisión más comunes en distintas regiones geográficas, base de estimación de aportes que a su vez son soporte para la toma de decisiones en la gestión de la calidad del aire. Estos estudios científicos, donde se soportan dichos indicadores, revelan una diversidad de fuentes de emisión asociadas a la procedencia del material particulado analizado, así:

- Los compuestos como el nitrato (NO_3^-), el carbono orgánico (OC) y el carbono elemental (EC), presentes en el material particulado (PM) del noroeste de Estados Unidos, provienen principalmente de fuentes vehiculares. Además, se identifica una contribución significativa de polvo resuspendido del suelo. Del mismo modo, se identifican relaciones claras entre azufre (S) y selenio (Se), atribuibles a la combustión de carbón, mientras que los nitratos (NO_3^-), carbono orgánico (OC) y carbono elemental (EC) se relacionan principalmente con emisiones vehiculares, junto con la resuspensión del suelo, mientras que compuestos como el OC, EC y potasio (K) reflejan una influencia combinada de fuentes vehiculares, combustión de biomasa y quema de madera (Song et al., 2001).
- La relación NO_x/EC presente en el PM de Pittsburgh sugiere una fuerte contribución del diésel Mody et al. (2004).
- En Buenos Aires, la presencia de azufre (S) y vanadio (V) sugieren fuentes de emisiones derivadas de la combustión de gasolina, según Gómez et al. (2005).
- En ciudades europeas como Génova, indica Ariola et al. (2006), los perfiles químicos OC, EC, iones como NH_4^+ , SO_4^{2-} y NO_3^- reflejan una influencia por fuentes vehiculares, así como la formación de aerosoles secundarios y la quema de residuos agrícolas con los compuestos SO_4^{2-} y NO_3^- solamente. En múltiples ciudades europeas (Helsinki, Ámsterdam, Duisburgo, Praga, Barcelona y Atenas), Turpin & Huntzicker (1995) y Sillanpää et al. (2006) determinan que el EC proviene de procesos de combustión residencial, emisiones vehiculares y reacciones fotoquímicas.
- En estudios más recientes, sin registro en lugar de procedencia, Diapouli (2016) ha observado que una proporción OC/EC cercana a 1,0, está asociada a emisiones vehiculares, mientras que la relación V/Ni entre 2 y 3 se vincula con la combustión de aceite pesado. De la misma manera, otros elementos como K^+ , Zn, Pb, Cl y Br son indicadores de la quema de biomasa, particularmente de madera tratada.

- La presencia conjunta de V, Ni, Mn, Fe, Cr, As y S, junto con SO_4^{2-} , según Almeida-Silva et al. (2011), refuerza la hipótesis de emisiones por quema de aceite. Así mismo, la combinación de metales como Al, Sc, Se, Co, As, Tl, Th, Pb y Sb apunta a la quema de carbón como fuente principal. Las emisiones de vehículos a gasolina y diésel también se diferencian por la presencia de elementos traza y compuestos iónicos, mientras que los aerosoles secundarios se caracterizan por SO_4^{2-} , NO_3^- y NH_4^+ .
- Finalmente, estudios en el Parque Nacional Big Bend (Texas), realizados por Chow et al. (1994, 2004), y en la autopista Taipei-Yilan (Taiwán) por Zhu, et al. (2010) detallan la asignación de fracciones específicas de OC y EC a fuentes como la quema de biomasa, polvo resuspendido y emisiones vehiculares, permitiendo una caracterización más precisa de los procesos de emisión en distintas condiciones geográficas y contextos urbanos (AMVA, 2021; AMVA y PCJIC, 2019).

Resultados y discusión

Comportamiento de indicadores 2017-2022 asociados a medidas priorizadas para la prevención de episodios críticos en el Valle de Aburrá

El comportamiento de los indicadores asociados a las siete medidas priorizadas para la prevención de episodios críticos en el VA, se describe a continuación:

M1: Expansión, fortalecimiento, fomento y modernización del transporte público. Según AMVA (2022a) y el Metro de Medellín (2022), entre los años 2017 y 2022, en el VA se evidenció un aumento del 14 % en el número de pasajeros de transporte público (TP) y en el número de vehículos que operan en transporte público colectivo de pasajeros (TPC) de 18 % (ver Tabla 2 medida M1 - Expansión, fortalecimiento, fomento y modernización del transporte público). Se aprecia un comportamiento favorable del TP, dado el aumento de pasajeros, aunque entre 2019 y 2020, por las restricciones de movilidad que se impusieron por la pandemia del COVID-19, hubo una disminución del 48 %. Sin embargo, a partir del año 2021 se observó un incremento con relación al 2020 (33 %) debido al reinicio de las actividades cotidianas de la población y de sectores económicos, que demandó la expansión de las rutas de alimentación, creación de nuevos trayectos y operación de nuevas estaciones del sistema metro, entre otros factores.

M2: Políticas para reducir el impacto del transporte de carga y volquetas. Con el fin de mitigar el impacto ambiental del transporte de carga y volquetas, se han implementado varias políticas desde 2017, entre ellas, restricciones de circulación para vehículos superiores a 10 toneladas, durante las horas pico y dentro del perímetro urbano, con el fin de mejorar la movilidad y reducir emisiones contaminantes. Adicionalmente, en 2018 se inició el programa de autorregulación ambiental para el transporte de carga, mediante la renovación progresiva de la flota de volquetas. Recientemente, en 2022, se reglamentó el ingreso de vehículos de carga a la ciudad, exigiendo certificación ambiental a partir de normas Euro IV y superiores. Si bien en 2018 y 2019 el número de vehículos con esta tecnología fue muy bajo, entre 2021 y 2022 se obtuvo un crecimiento del 11 %, dado que en este período el aumento en la renovación fue muy significativo en comparación con 2019 (ver Tabla 2 medida M2).

M3: Promoción del uso de la bicicleta pública integrado al SITVA. Con base en información suministrada por el AMVA (2022b, 2022c, 2022d), el sistema de bicicletas públicas, llamado EnCicla, es un exitoso programa que fomenta el uso de esta como un medio de transporte beneficioso para la salud de la población, la economía y el ambiente, al ofrecer una alternativa sostenible. Este sistema incentiva

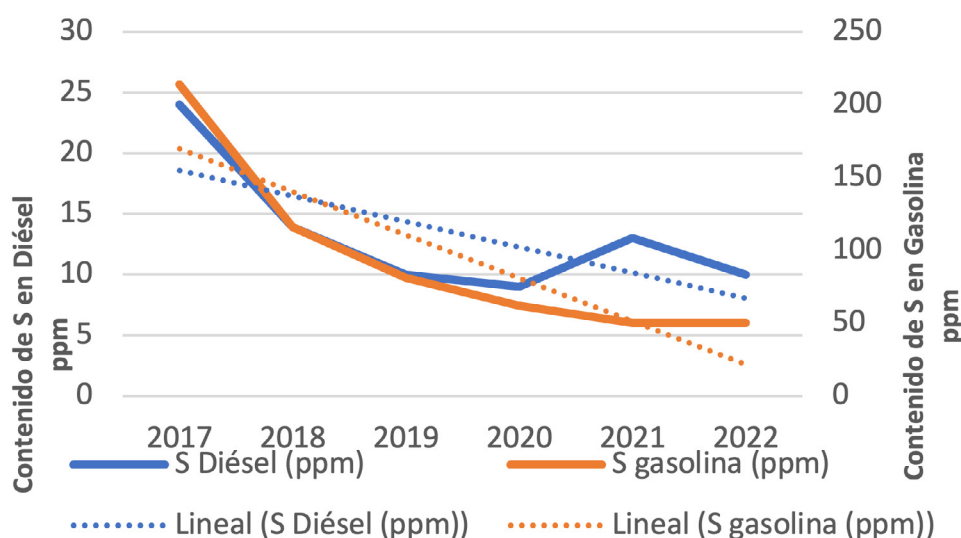
la independencia de los vehículos movidos por combustibles fósiles y favorece la movilidad urbana. Las estaciones de EnCicla se encuentran en lugares públicos para el acceso a los ciudadanos. En la Tabla 2, medida M3, se observa el comportamiento de la promoción del uso de la bicicleta pública con relación al número de préstamos, evidenciándose un aumento del 94 % entre los años 2017 a 2019. Los usuarios que utilizan el sistema EnCicla crecieron entre 2021 y 2022, lo cual puede atribuirse a la estabilización después de la pandemia por COVID-19.

Es importante anotar que el número de usuarios EnCicla se duplicó en 2022 respecto de 2017. Este hallazgo es atribuible al aumento en el número de estaciones y kilómetros de cobertura construidos y operativos, lo que se reflejó en un incremento en el tiempo, 7 % entre 2019 y 2020 y 48 % desde 2017 a 2022.

M4: Mejora de la calidad del diésel y la gasolina 2017-2022. La reducción en el contenido de azufre (%) en el combustible diésel y en la gasolina ha contribuido a la mejora en la calidad del aire, dada la reducción de óxidos de azufre (SO₂) y la formación de contaminantes secundarios causando lluvia ácida y otros problemas de contaminación atmosférica (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2023). Además, un menor contenido de azufre en los combustibles contribuye a mejorar la eficiencia en mecanismos y tecnologías de control de emisiones, aportando de manera significativa a la reducción de partículas.

En la Figura 2 y Tabla 2 medida M4 se ilustra la tendencia del contenido de azufre (ppm), mostrando una reducción del 58 % y 77 % al año 2022 en el diésel y gasolina, respectivamente. Este resultado evidenció el cumplimiento de Ecopetrol del compromiso de entregar diésel con menos de 20 (ppm) de azufre y gasolina de (50 ppm).

Figura 2
Evolución del contenido de S (ppm). Valle de Aburrá-Colombia 2017-2022



Nota. Elaboración propia.

M5: Introducción acelerada de vehículos de ultra bajas emisiones y emisiones cero. Con el propósito de incentivar la incorporación de tecnologías vehiculares más limpias, en los últimos años se han implementado medidas para promover vehículos eléctricos e híbridos en el VA. En 2020 se reglamentó la instalación de puntos de carga eléctrica y el parqueo preferencial para vehículos eficientes. Además, en 2021 se eliminó el impuesto vehicular durante cinco años para autos eléctricos, híbridos y de celdas de combustible. Estas acciones se complementaron con beneficios como el acceso preferencial al programa de “Pico y Placa Solidario” que consiste en pagar para evitar la restricción de circulación. Para 2022 se tenía una flota de más de 2.000 vehículos eléctricos e híbridos en la ciudad de Medellín. Esta cifra aún es baja, pero las regulaciones existentes buscan acelerar la adopción de estas tecnologías con cero y ultra bajas emisiones contaminantes. En la Tabla 2 medida M5 se observa el comportamiento de este indicador, evidenciándose en 2022 un crecimiento del 0,47 % al 68 % del total de vehículos eléctricos registrados para el período de estudio. De igual manera, el número estaciones de carga de vehículos híbridos/eléctricos aumentó un 300 %.

M6: Ampliación, conectividad e integración de la red de infraestructura para la bicicleta. En cuanto al indicador de ‘Ampliación, conectividad e integración de la red de infraestructura para la bicicleta’, bici parqueaderos instalados, se observa un aumento sostenido entre 2017 y 2020 (380 %), manteniéndose constante hasta 2022. La Tabla 2 se evidencia un comportamiento favorable de esta medida, tanto en relación con los bici parqueaderos, como con la construcción de nuevas rutas. El indicador ‘Cobertura de ciclo rutas construidas y operando’ aumentó un 123 % entre 2017 y 2022. Resultados favorables para este indicador guardan una relación directa con la disminución de partículas, en tanto se contribuye a la reducción del tráfico vehicular, a incentivar la movilidad sostenible y a reducir la generación y resuspensión de material particulado.

M7: Establecimiento de lineamientos de zonificación con criterios de calidad del aire. El establecimiento de lineamientos de zonificación con criterios de calidad del aire en el VA ha implicado directrices de ordenamiento territorial para la promoción del desarrollo de zonas con menores fuentes de emisión contaminantes, denominadas ‘Zonas urbanas de aire protegido’ (ZUAP). Entre los lineamientos se pueden considerar restricciones a ciertos usos del suelo, incentivos para actividades de bajo impacto ambiental, zonas de amortiguamiento entre fuentes emisoras y receptoras sensibles, corredores de ventilación y orientación de vías para favorecer la dispersión de contaminantes. Se espera que la zonificación con enfoque en calidad del aire contribuya a la prevención de futuros episodios atmosféricos en la región metropolitana. Estas acciones se incluyeron en el Plan de Desarrollo Medellín Futuro 2020-2023, el cual relaciona en su seguimiento el 80 % de avance en la implementación de las ZUAP, para los años 2020, 2021 y 2022 (Alcaldía de Medellín, 2020)(Tabla 2).

Seguimiento a indicadores para la prevención de episodios críticos en el Valle de Aburrá

En el seguimiento a los indicadores asociados a las medidas priorizadas para el período 2017-2022, se identificaron datos anuales y, lamentablemente, no se halló suficiente información seriada en bases de datos oficiales durante el período de estudio para la realización de un análisis multivariado que llevaría a una evaluación de la incidencia individual de cada medida sobre la reducción esperada del $PM_{2.5}$. De acuerdo con la información disponible, en la Tabla 2 se relacionan los valores obtenidos como resultado del seguimiento a algunos indicadores asociados a las medidas estudiadas en conjunto.

Tabla 2

Indicadores para la prevención de episodios críticos atmosféricos en el Valle de Aburrá 2017-2022 y comportamiento del PM_{2.5} en el Valle de Aburrá

Medida	Indicadores	2017	2018	2019	2020	2021	2022
M1	N.º de pasajeros del TP (millones).	287	298	317	165	219	327
	Porcentaje de vehículos TPC.	65	70	76	76	77	77
M2	N.º de vehículos de carga y/o volquetas con tecnología Euro V/5 y VI/6.	ND	1	2	ND	1.150	1.284
M3	N.º de estaciones de EnCicla.	54	55	82	103	109	109
	Km de cobertura Encicla.	21	21	23	29	31	31
	N.º usuarios EnCicla (miles).	58	73	93	105	124	127
	N.º de préstamos EnCicla (millones).	1,9	2,2	3,7	1,8	1,4	1,7
M4	Contenido de S en el diésel (ppm).	24	13,9	10	9	13	10
	Contenido de S en la gasolina (ppm).	214	115,9	81	62	50	50
M5	Porcentaje total de vehículos eléctricos registrados al año.	ND	0,47	0,1	ND	62	68
	N.º de estaciones de carga de vehículos híbridos/eléctricos.	2	ND	7	28	28	28
M6	Cobertura de ciclorrutas construidas y operativas (km).	80	110	131	132	178	179
	N.º de bici parqueaderos nuevos.	64	53	140	307	307	307
M7	N.º de Zonas Urbanas de Aire Protegido (ZUAP) para fuentes fijas y móviles implementadas.	0	0	7	0	0	0
Concentración de PM_{2.5} (µg/m³)		25,65	20,42	20,84	20,8	17,39	18,37

Nota. Elaboración propia datos tomados de AMVA 2022a, 2022c; Ecopetrol, 2022.

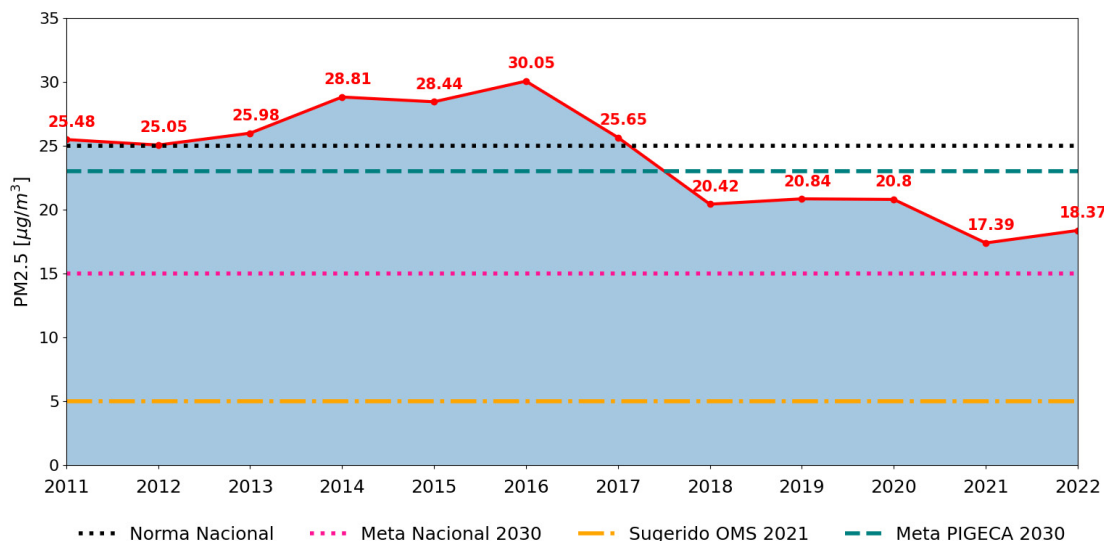
Evaluación de la eficacia de las medidas priorizadas para la prevención de PGE

Los resultados de la evaluación de la eficacia de las medidas priorizadas se presentan a continuación con base en el comportamiento de los indicadores antes y después de la implementación del PIGECA.

Evaluación de la eficacia con base en el comportamiento de las concentraciones del PM_{2.5}. El comportamiento decreciente del PM_{2.5} entre 2011 y 2022, con relación a la norma nacional de calidad del aire (15 µg/m³), se observa en la Figura 3, la meta del PIGECA a 2030 es de 10 µg/m³ para la exposición anual y 25 µg/m³ para un período de 24 horas y la sugerida por la OMS es de 5 µg/m³, siendo evidentes los picos durante los PGE, el más alto de 30,05 µg/m³ en 2016 (AMVA, 2021). Antes de la implementación del PIGECA (2011-2016), el promedio de PM_{2.5} era de 27,30 µg/m³, pero una vez se iniciaron las medidas en estudio (2017), este se redujo a 20,58 µg/m³ alcanzando un mínimo de 17,34 µg/m³ a inicios de 2021, con un leve aumento en 2022.

Figura 3

Concentraciones promedio anuales PM2.5 (µg/m³). Medellín, 2011-2022



Nota. Elaboración propia.

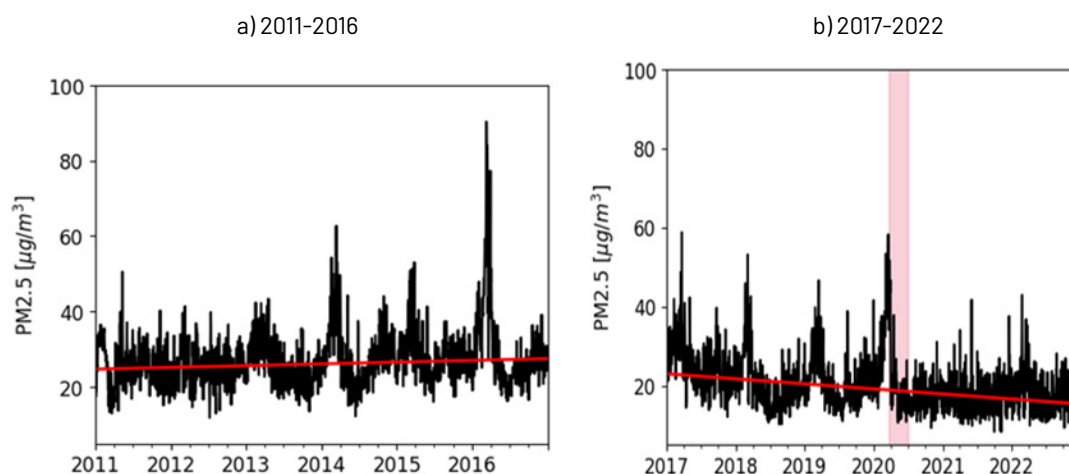
En la Figura 4 se presentan las tendencias del $PM_{2.5}$ de forma detallada para los dos subperiodos de análisis, antes y después de la implementación del PIGECA (2011-2016) y (2017-2022). Estas tendencias fueron estimadas a partir de la prueba de Mann-Kendall (Kendall, 1975; Mann, 1945). De acuerdo con el análisis estadístico de los datos 2011-2016 (Figura 4a), hay una tendencia ligeramente positiva ($\tau = 0,09$) que implica un aumento en el $PM_{2.5}$, mientras que en el período de intervención estratégica, hay un decrecimiento más pronunciado ($\tau = -0,27$) (Figura 4b). Para comprender el impacto del período APO, se realizó la prueba de tendencia eliminando sus datos. Las pendientes para las series 2011-2016 y 2017-2022 fueron respectivamente 0,001 y $-0,004$. El filtro del período (APO) no cambió el resultado, mostrando una reducción significativa en los niveles promedio de contaminación de $PM_{2.5}$, aunque los estadísticos generales sí cambiaron para 2017-2022, con valores menores para el promedio y la mediana. Tanto el valor máximo, como el mínimo de concentración son inferiores en 2017-2022, siendo de $58,82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $8,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, comparados con $90,29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $11,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de 2011 a 2016. En este mismo período, la concentración media fue de $27,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con una mediana de $26,13 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En contraste, para los años entre 2017-2022, la media descendió a $20,58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la mediana a $19,16 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos valores se mantuvieron prácticamente constantes incluso al excluir los datos APO, con una media de $20,54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una mediana de $19,21 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La desviación estándar también mostró una leve disminución (de $7,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $6,81 \mu\text{g}/\text{m}^3$), aunque el coeficiente de variación aumentó ligeramente de 28,3 a 33,1, sugiriendo una mayor dispersión relativa de los datos en el segundo período. Estos resultados evidencian una mejora en la calidad del aire en Medellín durante la segunda etapa analizada, posiblemente asociada a intervenciones ambientales y cambios en patrones de movilidad. La banda rosada en la serie de datos corresponde al período de aislamiento preventivo obligatorio (APO) durante la pandemia del COVID-19. En este tiempo, se presentaron emisiones externas por incendios generadas por el transporte regional de aerosoles. En este evento se estimó un alto aporte al $PM_{2.5}$ de fuentes externas (51 %) en contradicción con la abrupta reducción esperada de una ciudad apagada por las extremas restricciones obligadas a las actividades antropogénicas, como suspensión de industrias y transporte (Gómez et al., 2023).

De acuerdo con las hipótesis planteadas, los resultados obtenidos a través de la prueba de tendencia de Mann-Kendall para los períodos 2011-2016 y 2017-2022 indican que, en ambos casos, dado que el valor p es inferior a 0,05, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_a), lo que implica la existencia de una tendencia.

Para el período 2012-2016, el valor de tau fue de 0,09, lo que indica una tendencia creciente. En contraste, entre 2017-2022, el valor de tau es -0,27, lo que refleja una tendencia decreciente. En resumen, se ha evaluado la eficacia del PIGECA basándose en la reducción esperada de los niveles de $PM_{2,5}$.

Figura 4

Tendencia diaria $PM_{2.5}$ Valle de Aburrá-Colombia



Nota. Elaboración propia.

Eficacia de las medidas priorizadas para la prevención de PGE con base en el seguimiento a indicadores de movilidad. Entre 2017 y 2022 se evidenció un impacto positivo de las medidas orientadas a fomentar la movilidad activa, la promoción del uso de la bicicleta mediante ciclorrutas y el sistema público EnCicla, así como el retiro y desintegración de vehículos antiguos, en la reducción de los niveles de $PM_{2,5}$ (ver Tabla 2, medidas M3 y M6). El comportamiento de estos indicadores fue el siguiente:

- Construcción de ciclorrutas: se pasó de 80 km operativos a 179 km en 2022, lo que representa un incremento aproximado del 123 %.
- Préstamos de bicicletas en el programa Encicla: en 2019 se alcanzaron 3,7 millones de préstamos, lo que muestra un impacto positivo en la adopción del sistema por parte de los usuarios.
- Cobertura de ciclorrutas: el indicador mostró una evolución favorable, aumentando de 21 km a 31 km, lo que equivale a un crecimiento del 48 %.
- Expansión de estaciones Encicla: el número de estaciones distribuidas en el VA creció de 54 a 109 en 2022, lo que equivale a un aumento del 102 %. De manera coherente, el número de usuarios de Encicla se incrementó de 58 a 127 mil, reflejando un crecimiento del 119 %.
- Número de biciparqueaderos: también se registró un crecimiento significativo en la infraestructura de estacionamiento para bicicletas, los que llegaron a 307 en 2022, lo que representa un aumento del 380 %.

Durante el período de observación, las medidas asociadas con la modernización y expansión del transporte público colectivo mostraron también indicadores de impacto favorable (ver Tabla 2, Medida M1). Esto se reflejó en el aumento de la modernización y expansión tanto del transporte público colectivo como de carga, evidenciado en:

- Un incremento del 14 % en el número de pasajeros en transporte público (TP).
- Un aumento en el porcentaje de vehículos de transporte público colectivo (TPC) modernizados, alcanzando un 77 %.
- Un crecimiento del 231 % en el número de vehículos de carga con tecnologías Euro V/VI entre 2021 y 2022.
- Adicionalmente, se observó una evolución significativa en la incorporación de vehículos eléctricos e híbridos, cuyo porcentaje pasó de 0,47 % en 2018 a 68 % en 2022. De manera coherente, el número de estaciones de carga aumentó de 2 a 28 en el mismo período.

Durante el seguimiento de los indicadores, al observar los datos obtenidos en el período de estudio se evidenció una reducción en la concentración de $PM_{2,5}$, pasando de $30,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2016, antes de la implementación del PIGECA, a $19,33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2022. Esta disminución del 35,67 % contribuyó de manera significativa al mejoramiento de la calidad del aire en la región (Tabla 2).

De manera similar al caso de Beijing, diversas ciudades han implementado medidas exitosas para reducir la contaminación. En Santiago, el programa Transantiago adoptó la tecnología Euro VI en su flota de transporte público, logrando reducir en un 35 % las emisiones del sector. Los Ángeles estableció como meta que el 25 % de sus vehículos sean de cero emisiones para 2025. Madrid avanzó en la renovación de su flota de transporte urbano con 1.000 autobuses de bajas emisiones y promovió el reemplazo de taxis por modelos con etiqueta CERO o ECO. Por su parte, Ámsterdam estableció Zonas de Bajas Emisiones que restringen la circulación de vehículos pesados con estándares Euro 0, I y II (Yepes y Gómez, 2023).

Evaluación de la eficacia de las medidas priorizadas para la prevención de PGE con base en la caracterización del $PM_{2,5}$

Varias metodologías de identificación de fuentes de emisión, a partir de la caracterización química de contaminantes atmosféricos, han sido abordadas por la comunidad científica mundial con amplia referenciación. El principio básico de la inferencia de fuentes se fundamenta en la exploración de relaciones estadísticas entre las especies químicas del $PM_{2,5}$ aplicando métodos paramétricos y no paramétricos que permiten inferir, a partir de pares de especies que estén correlacionadas en rangos aceptables ($> 0,5$), una procedencia de una misma fuente.

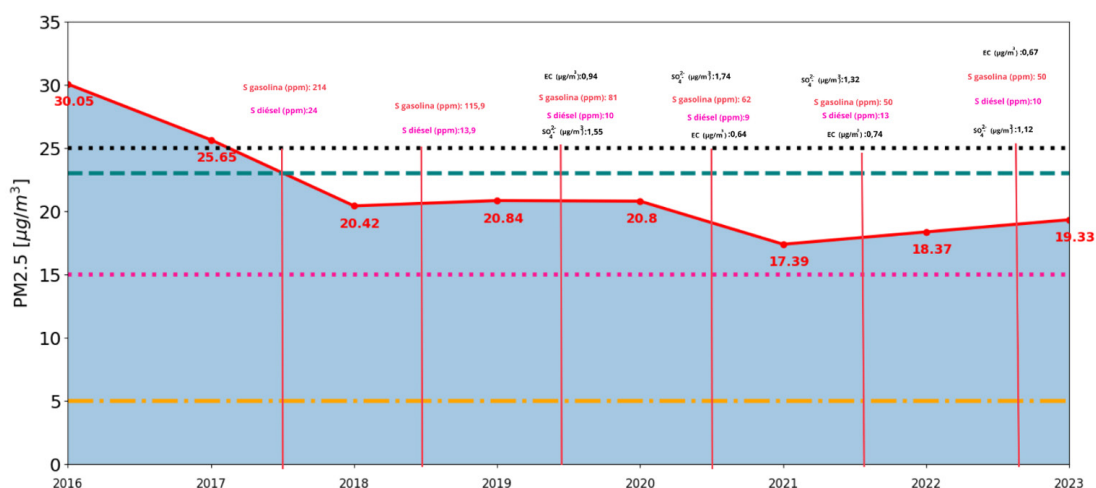
En este contexto, según diversos autores (Gamelas, et al., 2023; Li, et al., 2021; Xiong, et al., 2023), cuando en la caracterización del $PM_{2,5}$ se cuantifican las especies químicas EC y sulfatos (SO_4^{-2}) es posible inferir el aporte de emisiones provenientes tanto de la combustión industrial como de fuentes móviles directas. En el VA, estos compuestos se asocian con calderas de carbón, diésel y gasolina. Las especies EC son estructuras de carbono conocidas como carbonáceas y tienen efecto cancerígeno (Lii, et al., 2002). Los sulfatos (SO_4^{-2}) son derivados de procesos de combustión y tienen carácter ácido, con potencial daño en los tejidos celulares y causantes de enfermedades denominadas respiratorias agudas (United States Environmental Protection Agency [USA-EPA], 2025).

De acuerdo con este postulado, un conjunto de indicadores asociados a la caracterización química fue propuesto (AMVA, 2021). Según la información disponible en este estudio, se logró hacer el seguimiento a los siguientes parámetros carbono elemental (EC) y sulfatos (SO_4^{-2}).

La tendencia a la disminución del $PM_{2.5}$ después de la implementación del PIGECA (2017) (Figuras 4 y 5) demuestra la eficacia en conjunto de las medidas priorizadas para la prevención de PGE, asociadas a la mejora de combustibles y caracterización del $PM_{2.5}$. Específicamente, la disminución del azufre en la gasolina (de 214 ppm en 2017 a 50 ppm en 2020) y en el diésel, (de 24 ppm en 2017 a 10 ppm en 2022) contribuyó a la reducción de emisiones de sulfatos y materia carbonácea (Gómez, et al., 2019).

Figura 5

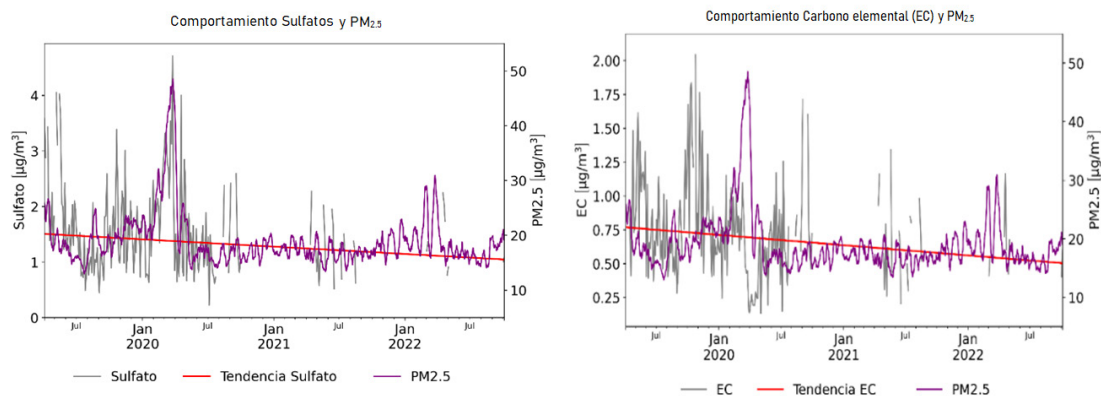
Comportamiento del $PM_{2.5}$ en relación con las medidas de mejora de combustibles y características de $PM_{2.5}$ en carbono elemental y sulfatos



Nota. Elaboración propia.

En la Figura 6 se observa el comportamiento del carbono elemental, EC y sulfatos con respecto al $PM_{2.5}$ entre 2020 y 2022. El análisis estadístico permitió afirmar la tendencia decreciente del EC, coeficiente tau (-0,13) y de los sulfatos (-0,13), igual que el $PM_{2.5}$ (-0,27), evidenciando el resultado positivo de las medidas asociadas a reducción del impacto directo de las disposiciones tomadas sobre fuentes de combustión, tanto en transporte como en procesos industriales que consumen carbón combustibles líquidos.

Este resultado adquiere importancia para mostrar el impacto de la composición química además de la concentración del $PM_{2.5}$, pudiéndose afirmar que, pese al aumento del consumo de gasolina y de diésel, se ha reducido la toxicidad respirable en cuanto a estas especies.

Figura 6Comportamiento sulfatos y carbono elemental (EC) comparado con PM_{2.5}

Nota. Elaboración propia.

Conclusiones

El análisis y comparación entre el conjunto de indicadores relacionados con las medidas prioritarias para la prevención de episodios críticos y otras intervenciones para reducir las emisiones contaminantes, permitió evidenciar una mejora en la calidad del aire en cuanto a reducción del PM_{2.5} en masa y composición después de la implementación del Plan de Calidad del Aire del Valle de Aburrá.

Una reducción en el PM_{2.5} muestra la eficacia de la implementación de un conjunto de medidas priorizadas para la prevención de los períodos críticos de calidad del aire.

La reducción en el PM_{2.5} reflejó un impacto positivo del conjunto de las acciones implementadas del PIGECA entre 2017 y 2022, evidenciándose su eficacia en el mejoramiento de la calidad del aire.

El análisis del comportamiento de los indicadores de las medidas priorizadas para la prevención de PGE contribuyó a demostrar el cumplimiento de las metas del PIGECA a 2030 respecto del PM_{2.5}, y la reducción del aporte de emisiones de combustión tanto a nivel industrial como emisiones de fuentes móviles directas, producto de la eficacia de las medidas de control implementadas.

El análisis y comparación entre el conjunto de indicadores, incluyendo parámetros de caracterización química asociados a las medidas priorizadas para la prevención de los períodos críticos de calidad del aire, permitió probar una mejora entre 2017 y 2022, tanto en términos de la concentración como en la reducción del contenido de sustancias tóxicas respirables.

A diferencia de la evaluación del Plan de Calidad del Aire realizada en Beijing, la evaluación de la eficacia no incluyó información seriada en el tiempo, que, tras un análisis multivariado, conllevara a la determinación del impacto de en cada medida de manera independiente en la reducción de contaminantes. Sin embargo, en coherencia con otros estudios, el conocimiento generado contribuye con información base para los tomadores de decisiones.

Financiamiento

Los datos del artículo provienen de una investigación cofinanciada por Sistema General de Regalías del Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación de Colombia a partir del apoyo al “Programa de investigación y Gestión del Conocimiento en contaminación atmosférica y sus efectos en la Salud en el Valle de Aburrá – Código SIGP 75842”.

El proyecto fue liderado por el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid a través del Grupo de Investigación en Higiene y Gestión Ambiental – GHYGAM y otras universidades del Valle de Aburrá, quienes hicieron posible levantar la información de algunos indicadores.

Conflicto de Interés

Los autores no tienen conflictos de interés que declarar.

Declaración de Autoría

Dora Yepes: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Recursos, Supervisión, Validación, Visualización, Redacción-borrador original, Redacción-revisión y edición.

Miriam Gómez: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Adquisición de fondos, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Recursos, Supervisión, Validación, Visualización, Redacción-borrador original, Redacción-revisión y edición.

Liliana Arroyave: Curación de datos, Análisis formal, investigación, Metodología, Visualización, Redacción-borrador original, Redacción-revisión y edición.

Referencias bibliográficas

- Alcaldía de Medellín. (2020). *Plan de Desarrollo Medellín Futuro 2020-2023*. Medellín. Autor. https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/medellin/Temas/PlanDesarrollo/Publicaciones/Shared%20Content/Documentos/2020/DocumentoFinal_PlanDesarrolloMedellin2020-2023_MedellinFuturo.pdf
- Almeida-Silva, M., Canha, N., Freitas, M. C., Dung, H. M., & Dionísio, I. (2011). Air pollution at an urban traffic tunnel in Lisbon, Portugal-an INAA study. *Applied Radiation and Isotopes*, 69(11), 1586-1591. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.01.014>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2018). *Acuerdo Metropolitano N° 04 de 2018 - Protocolo como Mecanismo de Implementación del Plan Operacional para Enfrentar Episodios De Contaminación Atmosférica -POECA Plan de Acción Implementación del Plan Operacional para Enfrentar Episodios de Contaminación Atmosférica (POECA) en jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá*. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/POECA/Acuerdo-Metropolitano-04-de-2018-POECA.pdf>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2021). *Informe anual de calidad del aire 2021- contrato CCT 799 de 2021 elaborado por Universidad EAFIT*. Medellín. https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/informes_red_calidaddeaire/Informe-Anual-Aire-2021.pdf

- Degraeuwe, B., Hooyberghs, H., Janssen, S., Lefebvre, W., Maiheu, B., Megaritis, A., & Vanhulsel, M. (2024). A source apportionment and air quality planning methodology for NO₂ pollution from traffic and other sources. *Environmental Modelling & Software*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106032>
- Decreto N.º 105 de 2019 [Ministerio de Medio Ambiente]. Aprueba Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncavi. 27 de diciembre de 2018. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1130135>
- Dhote, L., Sharma, P., Dogra, S., Arulrajan, P., Pandey, P., Kansal, A., & Gautam, S. (2024). Quantifying the Effects of the National Clean Air Programme on Air Quality Parameters in Chandigarh: A Scientific Assessment. *Aerosol Science and Engineering*, 66-76. <https://doi.org/10.1007/s41810-023-00206-4>
- Diapouli, E., Manousakas, M. I., Vratolis, S., Vasilatou, V., Pateraki, S., Bairachtari, K. A., Querol, X., Amato, F., Alastuey, A., Karanasiou, A. A., Lucarelli, F., Nava, S., Calzolari, G., Gianelle, V. L., Colombi, C., Alves, C., Custódio, D., Pio, C., Spyrou, C., ... Eleftheriadis, K. (2017). AIRUSE-LIFE +: Estimation of natural source contributions to urban ambient air PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in southern Europe - implications to compliance with limit values. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(5), 3673-3685. <https://doi.org/10.5194/acp-17-3673-2017>
- Donkelaar, V., Martin, R. V., Brauer, M., & Boys, B. L. (2014). Use of Satellite Observations for Long-Term Exposure Assessment of Global Concentrations of Fine Particulate Matter. *Environmental Health Perspectives*, 123(2), 135-143. <https://doi.org/10.1289/ehp.1408646>
- Duncan, B. N., Lamsal, L. N., Thompson, A. M., Yoshida, Y., Lu, Z., Streets, D. G., Hurwitz, M. M., & Pickering, K. E. (2016). A space-based, high-resolution view of notable changes in urban NO_x pollution around the world (2005-2014). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(2), 976-996. <https://doi.org/10.1002/2015JD024121>
- Ecopetrol. (2022). *Calidad de combustibles*. <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/sostecnibilidad/ambiental/aire-limpio/calidad-combustibles>
- Edwards, D. P., Emmons, L. K., Hauglustaine, D. A., Chu, D. A., Gille, J. C., Kaufman, Y. J., Pétron, G., Yurganov, L. N., Giglio, L., Deeter, M. N., Yudin, V., Ziskin, D. C., Warner, J., Lamarque, J.-F., Francis, G. L., Ho, S. P., Mao, D., Chen, J., Grechko, E. I., & Drummond, J. R. (2004). Observations of carbon monoxide and aerosols from the Terra satellite: Northern Hemisphere variability. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D24). <https://doi.org/10.1029/2004JD004727>
- Gamelas, C. A., Canha, N., Vicente, A., Silva, A., Borges, S., Alves, C., Kertesz, Z., & Almeida, S. M. (2023). Source apportionment of PM_{2.5} before and after COVID-19 lockdown in an urban-industrial area of the Lisbon metropolitan area, Portugal. *Urban Climate*, 49, 101446. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101446>
- Gómez, D., Giné, M. F., Sánchez, A. C., & Smichowski, P. (2005). Antimony: A traffic-related element in the atmosphere of Buenos Aires. *Environmental Monitoring*, 7, 1162-1168. <https://doi.org/10.1039/b508609d>
- Gómez, M., Ardila, A. N., & Grajales-González, D. A. (2023). Impact of isolation measures on PM_{2.5} concentrations in the Valley of Aburrá-Colombia during the COVID-19 pandemic. *Journal of Engineering Research*, 3(35), 2-18. <https://doi.org/10.22533/at.ed.3173352319101>

- Gómez, M., Yepes, D., Patiño, K., Grajales, D., Alvarez, M., y Cañaveral, C. (2019). *Aunar esfuerzos técnicos y financieros para evaluar los componentes claves de aerosoles atmosféricos en la contaminación atmosférica en el Valle de Aburrá fase II, a partir de la generación de conocimiento obtenido en un estudio de caracterización química. Convenio 734 de 2019 entre AMVA y Politécnico Jaime Isaza Cadavid, Medellín.* https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Estudios-calidad-del-aire/CaracterizacionMaterialParticulado_Fasell.pdf
- Gouveia, N., Kephart, J. L., Dronova, I., McClure, L., Granados, J. T., Betancourt, R. M., O’Ryan, A. C., Texcalac-Sangrador, J. L., Martínez-Folgar, K., Rodríguez, D., & Díez-Roux, A. V. (2021). Ambient fine particulate matter in Latin American cities: Levels, population exposure, and associated urban factors. *Science of The Total Environment*, 772, 145035. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145035>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2023). *Agentes precursores de la lluvia ácida.* <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/los-agentes-precursores-de-la-lluvia-acida>
- Instituto Nacional de Salud. (2019, enero 17). *INS: 17.549 muertes en Colombia están asociadas a mala calidad del agua, del aire y a la exposición a combustibles pesados.* (Boletín de prensa). <https://www.ins.gov.co/Comunicaciones/Comunicados%20de%20prensa/Carga%20Ambiental%20en%20Colombia%20Prensa%20INS-%2021%20de%20enero%20de%202019.pdf>
- Kendall, M. (1975). *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin.
- Krotkov, N. A., McLinden, C. A., Li, C., Lamsal, L. N., Celarier, E. A., Marchenko, S. V., Swartz, W. H., Bucsela, E. J., Joiner, J., Duncan, B. N., Boersma, K. F., Veefkind, J. P., Levelt, P. F., Fioletov, V. E., Dickerson, R. R., He, H., Lu, Z., & Streets, D. G. (2016). Aura OMI observations of regional SO₂ and NO₂ pollution changes from 2005 to 2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(7), 4605–4629. <https://doi.org/10.5194/acp-16-4605-2016>
- Lamsal, L. N., Krotkov, N. A., Celarier, E. A., Swartz, W. H., Pickering, K. E., Bucsela, E. J., Gleason, R. V., Martin, S., Philip, H., Irie, A., Cede, J., Herman, A., Weinheimer, J. J., Szykman, & T. Knepp, N. (2014). Evaluation of OMI operational standard NO₂ column retrievals using in situ and surface-based NO₂ observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(21), 11587–11609. <https://doi.org/10.5194/acp-14-11587-2014>
- Li, R., Zhao, Y., Fu, H., Chen, J., Peng, M., & Wang, C. (2021). Substantial changes in gaseous pollutants and chemical compositions in fine particles in the North China Plain during the COVID-19 lockdown period: anthropogenic vs. meteorological influences. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(11). <https://doi.org/10.5194/acp-21-8677-2021>
- Li, X., Zhang, Q., Zhang, Y., Zheng, B., Wang, K., Chen, Y., Wallington, T. J., Han, W., Shen, W., Zhang, X., & He, K. (2015). Source contributions of urban PM_{2.5} in the Beijing–Tianjin–Hebei region: Changes between 2006 and 2013 and relative impacts of emissions and meteorology. *Atmospheric Environment*, 123, 229–239. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.10.048>
- Lii, C., Burnett, R., Thun, M., Calle, E., Krewski, D., & Thurston, G. (2002). Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. *American Medical Association*, 287(9).
- Mann, H. (1945). Non-Parametric Test against Trend. *Econometrika*, 245–259. <http://dx.doi.org/10.2307/1907187>

- Medina, M. O., Chávez, M. C., Cortés, S. G. y Montaña, A. F. (2021). Análisis conceptual de la salud ambiental: evolución del concepto y campos de aplicación. En F. Lozano Kasten y S. Ramos de Robles (Coord.), *Perspectivas metodológicas y métodos en salud ambiental* (pp. 11-40). http://www.saludambiental.udg.mx/descargas/Perspectivas-Methodologicas_%20libro_MCSA-.pdf#page=12
- Metro de Medellín. (2022). *Datos Abiertos-Metro de Medellín*. <https://datosabiertos-metrodemedellin.opendata.arcgis.com/search?q=2022>
- Modey, W. K., Eatough, D. J., Anderson, R. R., Martello, D. V., Takahama, S., Lucas, L. J., & Davidson, C. I. (2004). Ambient fine particulate concentrations and chemical composition at two sampling sites in metropolitan Pittsburgh: A 2001 intensive summer study. *Atmospheric Environment*, 38(20), 3165-3178. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.03.005>
- Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado. (2018, mayo 2). Organización Mundial de la Salud. <https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>
- Organización de las Naciones Unidas. (2022, septiembre 22). *¿Cómo se mide la calidad del aire?* ONU Programa para el Medio Ambiente. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/como-se-mide-la-calidad-del-aire>
- Quirama-Aguilar, M., García Aguirre, D. y Gaona Quiroga, L. (2021). Gobernanza del aire: estrategia para el mejoramiento de la calidad del aire en ciudades. *Gestión y Ambiente*, 24, 33-46. <https://doi.org/10.15446/ga.v24nSupl3.96609>
- Represa, N. S. (2020). *Elaboración e implementación de una propuesta metodológica para la evaluación y gestión de la calidad del aire mediante el enfoque de la ciencia de datos*. Universitat Politècnica de València. [Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/144645>
- Resolución colombiana N. ° 2.254 de 2017 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Colombia]. Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. 01 de noviembre de 2017. <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/2.+Resoluci%C3%B3n+2254+de+2017+-+Niveles+Calidad+del+Aire.pdf/c22a285e-058e-42b6-aa88-2745fafad39f>
- Rodríguez-Villamizar, L., Rojas, N., & Fernández, J. (2019). Short-term joint effects of ambient air pollutants on emergency department visits for respiratory and circulatory diseases in Colombia, 2011-2014. *Environmental Pollution*, 248, 380-387 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.028>
- Sillanpää, M., Hillamo, R., Saarikoski, S., Frey, A., Pennanen, A., Makkonen, U., Spolnik, Z., Van Grieken, R., Braňiš, M., Brunekreef, B., Chalbot, M.-C., Kuhlbusch, T., Sunyer, J., Kerminen, V.-M., Kulmala, M., & Salonen, R. O. (2006). Chemical composition and mass closure of particulate matter at six urban sites in Europe. *Atmospheric Environment*, 40, 212-223. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.01.063>
- Smith, P., Blanco, E., Sarricolea, P., Peralta, O., & Thomas, F. (2025). Urban climate simulation model to support climate-sensitive planning decision making at local scale. *Journal of Urban Management*, 14(1), 279-292. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2024.11.003>
- Song, X., Polissar, A. V., & Hopke, P. K. (2001). Sources of fine particle composition in the northeastern US. *Atmospheric Environment*, 35(31), 5277-5286. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00338-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00338-7)

- Trejos, G. A. y Yepes, D. L. (2024). Planes de calidad del aire en lugares con episodios críticos de contaminación atmosférica: un comparativo. Teuken Bidikay. *Revista Latinoamérica de Investigaciones, Ambiente y Sociedad*, 57-76. <https://doi.org/10.33571/teuken.v14n22a3>
- Turpin, B. J., & Huntzicker, J. J. (1995). Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS. *Atmospheric Environment*, 29(23), 97006-1999.
- UN Environment. (2019). *A Review of 20 Years' Air Pollution Control in Beijing*. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27645/airPolCh_EN.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- UN Environment Programme. (2021). *Regulating Air Quality: The First Global Assessment of Air Pollution Legislation*. <https://www.unep.org/resources/report/regulating-air-quality-first-global-assessment-air-pollution-legislation>
- Universidad Autónoma de Manizales. (2021). *Carga de enfermedad por variables ambientales y costos de la atención en salud*. Editorial UAM.
- United States Environmental Protection Agency. (2025). *Air Pollution: Current and Future Challenges*. <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/air-pollution-current-and-future-challenges>
- Wang, Y., Coloma, J. F., & García, M. (2018). Eco-Driving Effects Depending on The Travelled Road. Correlation Between Fuel Consumption Parameters. *Transportation research Procedia*, 33, 259-266. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.101>
- Worden, H. M., Deeter, M. N., Frankenberg, C., George, M., Nichitiu, F., Worden, J., Aben, I., Bowman, K. W., Clerbaux, C., Coheur, P. F., de Laat, A. T. J., Detweiler, R., Drummond, J. R., Edwards, D. P., Gille, J. C., Hurtmans, D., Luo, M., Martínez-Alonso, S., Massie, S., ... Warner, J. X. (2013). Decadal record of satellite carbon monoxide observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(2), 837-850. <https://doi.org/10.5194/acp-13-837-2013>
- Xiong, C., Zhang, Y., Yan, J., Yang, X., Wang, Q., Tu, R., & He, Y. (2023). Chemical composition characteristics and source analysis of PM2.5 in Jiaxing, China: insights into the effect of COVID-19 outbreak. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 44(4), 552-561. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1979104>
- Yepes, D. y Gómez, M. (2023). Planes de calidad del aire en lugares del mundo donde se presentan episodios críticos: un comparativo con Valle de Aburrá. En *Noveno Congreso Colombiano y Conferencia Internacional Calidad de Aire, Cambio Climático y Salud Pública* (pp. 276-280). Casap IX. https://casap.science/wp-content/uploads/2024/08/LIBRO-DE-MEMORIAS-CASAP-IX_FINAL.pdf
- Zhu, C. S., Chen, C. C., Cao, J. J., Tsai, C. J., Chou, C. C., Liu, S. C., & Roam, G. D. (2010). Characterization of carbon fractions for atmospheric fine particles and nanoparticles in a highway tunnel. *Atmospheric Environment*, 44(23), 2668-2673. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.04.042>