

Proyecto de investigación

CALIDAD DEL AIRE EN ENTORNOS ESCOLARES DEL CASCO URBANO DE GUACHETÁ, CUNDINAMARCA: MONITOREO Y SENSIBILIZACIÓN

AIR QUALITY IN SCHOOL ENVIRONMENTS IN THE URBAN AREA OF GUACHETA, CUNDINAMARCA: MONITORING AND AWARENESS-RAISING

María Sofía Ojeda Mejía

Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, ciencias.naturales@utadeo.edu.co

Carrera 4 # 22-61. Bogotá, Colombia

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano

Correo: marias.ojedam@utadeo.edu.co

Resumen: La presente investigación analizó la calidad del aire en instituciones educativas del municipio de Guachetá, Cundinamarca, considerando la influencia de actividades internas de cada institución, así como de actividades mineras y fuentes urbanas cercanas a los entornos escolares. El estudio tuvo como objetivo evaluar las concentraciones de $PM_{2,5}$, PM_{10} , HCHO y VOCs en espacios interiores y exteriores, además de sensibilizar a la comunidad estudiantil sobre esta problemática ambiental. Para ello, se desarrolló una metodología mixta basada en cartografía social participativa, monitoreo de contaminantes atmosféricos mediante equipos Temtop y CanAirIO Plantower PMS7003/G7, análisis estadístico mediante ANOVA y correlaciones de Pearson, y talleres educativos con los estudiantes. Los resultados evidenciaron que las concentraciones promedio de los contaminantes evaluados se mantuvieron, en general, dentro de rangos considerados adecuados; sin embargo, se identificaron variaciones asociadas principalmente a fuentes directas de emisión, como procesos de combustión y tránsito vehicular, más que a factores meteorológicos. De igual forma, se observaron diferencias significativas entre algunos microambientes interiores, relacionadas con las actividades desarrolladas y las condiciones particulares de cada espacio. Finalmente, el estudio permitió fortalecer la comprensión del territorio y la conciencia ambiental de los estudiantes, demostrando la importancia de integrar herramientas técnicas y pedagógicas para la gestión participativa de la calidad del aire en entornos escolares.

Palabras clave: Cartografía social; monitoreo; calidad del aire; instituciones educativas.

Abstract: This research analyzed air quality in educational institutions in the municipality of Guachetá, Cundinamarca, considering the influence of internal activities within each institution, as well as nearby mining activities and urban sources surrounding school environments. The study aimed to evaluate the concentrations of PM_{2,5}, PM₁₀, HCHO, and VOCs in indoor and outdoor spaces, while also raising awareness among the student community about this environmental issue. To achieve this, a mixed methodology was developed based on participatory social mapping, atmospheric pollutant monitoring using Temtop and CanAirIO Plantower PMS7003/G7 devices, statistical analysis through ANOVA and Pearson correlations, and educational workshops with students. The results showed that the average concentrations of the evaluated pollutants generally remained within ranges considered acceptable; however, variations were identified mainly in relation to direct emission sources, such as combustion processes and vehicular traffic, rather than meteorological factors. Likewise, significant differences were observed among some indoor microenvironments, associated with the activities carried out and the particular conditions of each space. Finally, the study contributed to strengthening students' understanding of their territory and environmental awareness, demonstrating the importance of integrating technical and pedagogical tools for participatory air quality management in school environments.

Keywords: Social mapping; monitoring; air quality; educational institutions.

“Los niños son naturalmente investigadores; el contacto con la naturaleza alimenta su curiosidad y su capacidad de asombro.”

— Rachel Carson

1 Introducción

La contaminación ambiental se refiere a la presencia de componentes perjudiciales químicos, físicos o biológicos en el entorno, lo que implica un impacto nocivo para los seres vivos que lo habitan (Araujo, 2010). Dichas sustancias pueden alojarse en distintas matrices ambientales, como el aire, el suelo o el agua (Palacios & Moreno, 2022), siendo la contaminación atmosférica uno de los fenómenos más críticos debido a su amplia distribución espacial y su directa relación con las actividades humanas. El incremento del crecimiento urbano, la expansión del parque automotor y el desarrollo industrial han contribuido a un aumento sostenido de las emisiones, tanto de fuentes fijas como móviles, lo que repercute en la calidad del aire a escala mundial (Querol, 2018).

Un hecho histórico que marcó el inicio de la conciencia ambiental moderna fue la Gran Niebla de Londres en 1952, considerada uno de los desastres atmosféricos más graves del siglo XX. Durante este evento, una densa capa de smog cubrió la ciudad durante más de una semana, provocando la muerte de aproximadamente 12.000 personas y afectando a miles más con enfermedades respiratorias (Cardozo et al., 2017). Este suceso impulsó el desarrollo de políticas de control de emisiones y monitoreo de la calidad del aire en el Reino Unido y posteriormente en el resto del mundo. A partir de ese momento, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció directrices globales para la evaluación de contaminantes atmosféricos, con el fin de proteger la salud pública. En sus más recientes actualizaciones, la Organización Mundial de la Salud (2021a) establece límites permisibles especialmente estrictos para el material particulado fino ($PM_{2,5}$), fijando un máximo de $5\mu g/m^3$ en 24 horas y $5\mu g/m^3$ como promedio anual, dada su alta capacidad de penetrar en el sistema respiratorio y generar daños crónicos en órganos vitales (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2025).

A nivel mundial, la exposición prolongada a contaminantes atmosféricos ha sido asociada con múltiples efectos adversos en la salud. Investigaciones del Instituto Nacional de Ciencias de la Salud Ambiental de Estados Unidos (NIEHS, 2023) señalan que los niños expuestos a concentraciones elevadas de ozono (O_3) y material particulado durante actividades físicas presentan una mayor probabilidad de desarrollar asma y otras enfermedades respiratorias agudas. Asimismo, estudios realizados en Arabia Saudita por Elsharkawy et al. (2022) sobre la calidad del aire en 17 escuelas públicas evidenciaron que los niveles de $PM_{2,5}$ y PM_{10} en los salones de clase ubicados en la planta baja eran considerablemente superiores a los de las aulas situadas en pisos más altos, demostrando la influencia directa del tráfico vehicular y las emisiones urbanas sobre los ambientes interiores.

En el contexto latinoamericano, la contaminación atmosférica representa un desafío creciente para las ciudades en expansión. En países como México, Chile y Colombia, los esfuerzos por mejorar la calidad del aire se han centrado en la implementación de sistemas de vigilancia y en la formulación de políticas públicas que permitan reducir la exposición de la población a contaminantes criterio. En Colombia, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017) promulgó la Resolución 2254, que establece los valores máximos permisibles para los principales contaminantes atmosféricos: PM₁₀, PM_{2,5}, SO₂, NO₂, O₃ y CO. A su vez, el Manual de Diseño de los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA) define los lineamientos técnicos para la implementación de redes de monitoreo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010). No obstante, la cobertura de estas redes presenta limitaciones importantes, ya que en varias regiones del país existen estaciones fuera de servicio o con registros intermitentes, según se evidencia en el número de estaciones de monitoreo que son utilizadas en los boletines de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (2024). Además, no se dispone de normativas específicas que regulen la calidad del aire en espacios interiores, a pesar de que estos son los lugares donde las personas pasan la mayor parte de su tiempo.

Diversos estudios nacionales han abordado esta problemática desde distintas perspectivas. En Boyacá, Agudelo et al. (2015) evaluaron la calidad del aire en zonas mineras del departamento, encontrando niveles de PM₁₀ superiores a los límites establecidos por la normativa ambiental vigente, lo que atribuyeron a las emisiones derivadas de la actividad extractiva y al transporte de materiales. Por su parte, Rojas et al. (2013) realizaron un estudio en colegios distritales de Bogotá, en el cual compararon las concentraciones de material particulado dentro y fuera de las instituciones. Los resultados evidenciaron que los niveles de PM_{2,5} y PM₁₀ eran hasta 1.8 veces mayores en las escuelas cercanas a vías con alto tráfico vehicular, resaltando la importancia de considerar los entornos escolares como microambientes sensibles a la contaminación del aire.

En el ámbito local, el municipio de Guachetá, Cundinamarca, presenta una situación particular que refleja las tensiones entre el desarrollo económico y la sostenibilidad ambiental. Su economía depende en gran medida de la minería de carbón y del funcionamiento de plantas coquizadoras, actividades que generan emisiones significativas de gases y partículas (Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2020). Estas fuentes, sumadas al tránsito continuo de vehículos pesados, contribuyen a la liberación de contaminantes como SO₂, PM₁₀, PM_{2,5}, formaldehído (HCHO) y compuestos orgánicos volátiles (VOCs) (Organización Mundial de la Salud, 2021b), los cuales pueden dispersarse hacia las zonas urbanas y residenciales del municipio. En estas áreas se encuentran instituciones educativas como el Gimnasio Campestre Santa Juanita y la IED Nuestra Señora del Tránsito, que concentran una población infantil altamente vulnerable a los efectos de la contaminación atmosférica.

La exposición prolongada de los estudiantes a contaminantes dentro de los ambientes escolares puede incrementar la incidencia de enfermedades respiratorias, afectar el rendimiento académico y deteriorar la calidad de vida. A pesar de la magnitud del problema, no existen estudios previos que

caractericen la calidad del aire en los entornos escolares del municipio ni mecanismos de monitoreo que permitan identificar las zonas más afectadas. Esta falta de información limita la capacidad de las autoridades locales para implementar estrategias efectivas de control y sensibilización ambiental.

En este contexto, surge la necesidad de articular el conocimiento científico con estrategias que promuevan la comprensión del territorio y la participación de las comunidades. La cartografía social, entendida como una herramienta pedagógica y de reflexión colectiva, permite reconocer las dinámicas ambientales locales desde la percepción de quienes habitan el espacio. Su aplicación en entornos escolares favorece la construcción de conciencia ambiental, el diálogo de saberes y el fortalecimiento del sentido de corresponsabilidad frente a las problemáticas del entorno (Barragán & Amador, 2014)

De esta manera, el presente estudio tiene como objetivo analizar la calidad del aire en las instituciones educativas del municipio de Guachetá, Cundinamarca, mediante el monitoreo de contaminantes y la sensibilización de la población estudiantil. Con ello, se pretende no solo generar información técnica sobre el estado del aire en los entornos escolares, sino también fomentar la participación activa de la comunidad educativa en la comprensión y mitigación de los impactos ambientales. En este sentido, la investigación responde a la pregunta: *¿Cuál es el estado de la calidad del aire en las instituciones educativas del municipio de Guachetá, Cundinamarca?*

2 Metodología

2.1 Área de estudio

La investigación se desarrolló en la cabecera municipal y sus alrededores del municipio de Guachetá, Cundinamarca. Este territorio tiene una extensión de 179 km² y una población total de 11.398 habitantes, según datos del Departamento Nacional de Planeación (2014). La cabecera municipal concentra aproximadamente el 33 % de la población y ocupa un área de 88 hectáreas, por lo que el municipio se clasifica dentro de la categoría 6. Guachetá se encuentra a 2.570 m.s.n.m., rodeado de montañas y valles, con zonas de recarga hídrica importantes como el páramo de Rabanal y cuerpos de agua como el río Lenguazaque y la quebrada Honda. Debido a estas características, el clima predominante es frío, con una temperatura promedio de 13 °C. Limita con los municipios de Lenguazaque, Fúquene y Ubaté; y por el lado del departamento de Boyacá, con Ráquira, Samacá y Ventaquemada (Gobernación de Cundinamarca, 2025).

La principal base económica del municipio es la minería, debido a su ubicación en el área carbonífera de Checua - Lenguazaque, situada entre los departamentos de Cundinamarca y Boyacá (Servicio Geológico Colombiano, 2012). Se estima que más del 52 % de su desarrollo depende de este sector y de actividades asociadas (Ramírez, 2022). Estas dinámicas productivas generan emisiones de material particulado, humo y gases tóxicos, relacionadas no solo con los procesos de extracción

(Mariño et al., 2021), sino también con la producción de coque, utilizado en la industria metalúrgica por su alta capacidad calorífica (Ministerio de Minas y Energía et al., 2020). Además, Guachetá cuenta con un sector económico complementario basado en la producción lechera y la agricultura, destacándose cultivos como la papa, el maíz y diversas hortalizas.

En este contexto, se estudiaron las instituciones educativas ubicadas en el casco urbano de Guachetá y en zonas aledañas, correspondientes al Gimnasio Campestre Santa Juanita SAS (2025), ubicado a 1 km del centro urbano, y la Institución Educativa Departamental Nuestra Señora del Tránsito (2025), localizada en el centro del área urbana del municipio (Figura 1).

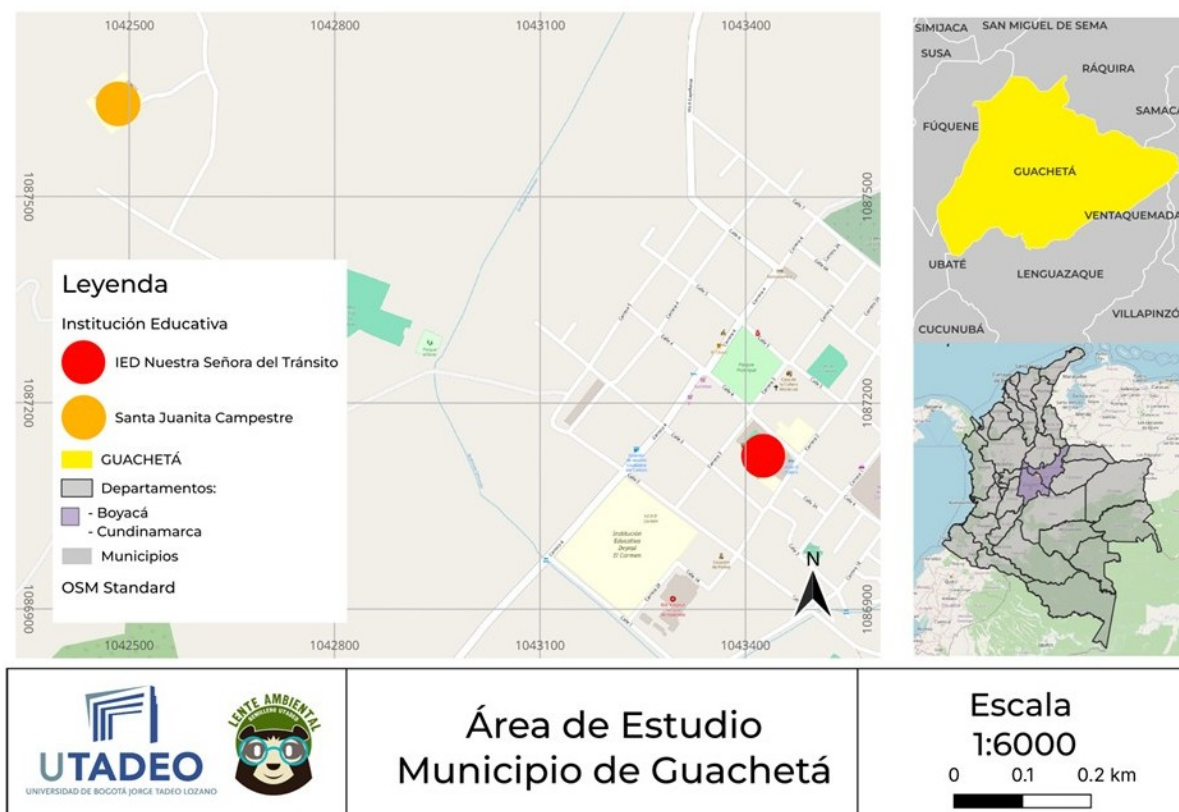


Figura 1 – Mapa de área de estudio en el municipio de Guachetá, Cundinamarca

Dicho esto, la investigación se desarrolló en tres fases principales: **Fase 1: Cartografía social**; **Fase 2: Monitoreo y análisis de datos**; y **Fase 3: Sensibilización** (Figura 2).

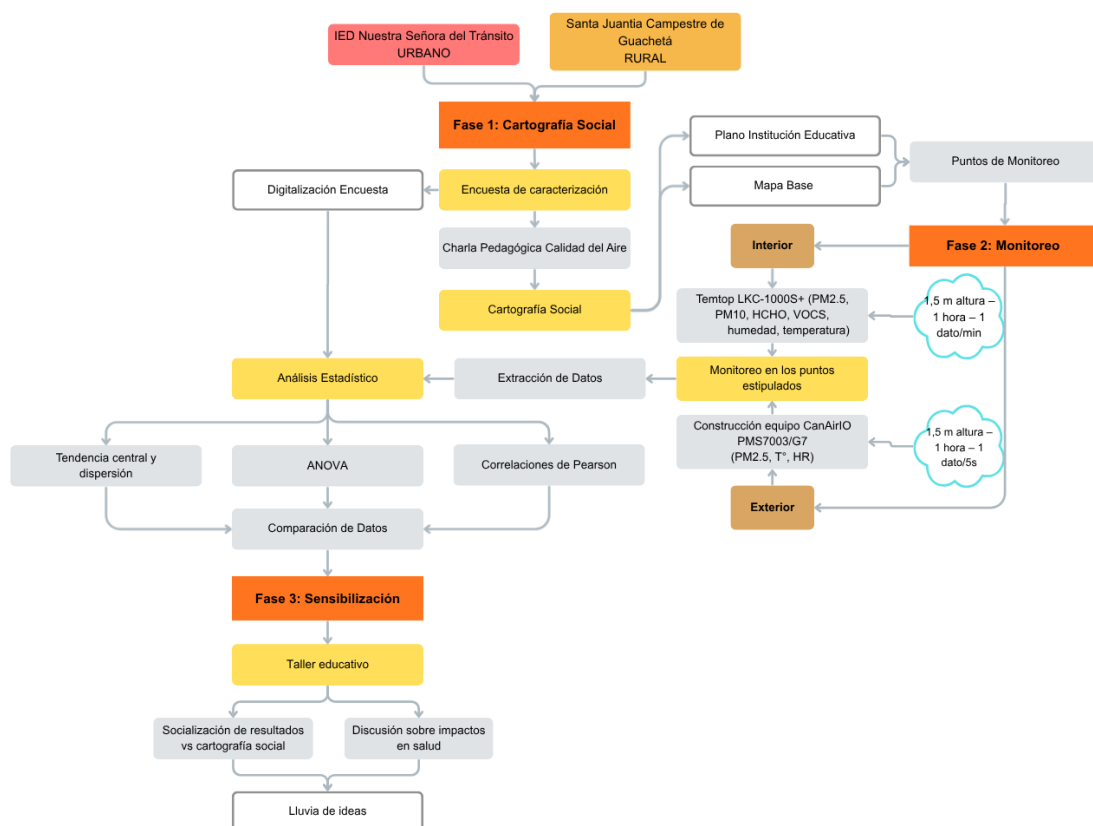


Figura 2 – Diagrama Metodológico

2.2 Fase 1: Cartografía Social

Dado que las instituciones analizadas cuentan con estudiantes desde los primeros grados hasta básica primaria, se seleccionó el grado quinto como grupo focal. En el caso del Gimnasio Campestre Santa Juanita, la actividad se realizó con el grupo ambiental conformado por estudiantes de segundo a quinto grado. A los participantes se les aplicó una encuesta para caracterizar aspectos como edad, tiempo de permanencia en la institución, actividades cotidianas, posibles fuentes de emisión y presencia de molestias respiratorias (Anexo 1). Posteriormente, se desarrolló un taller pedagógico sobre calidad del aire, principales contaminantes ($PM_{2,5}$ y PM_{10}) y su relevancia en el contexto municipal.

Después de esta actividad, se implementó la herramienta de cartografía social siguiendo la metodología de Barragán y Amador (2014), mediante la elaboración de un mapa temático centrado en la calidad del aire en el entorno escolar. La dinámica se realizó en grupos de cuatro a cinco estudiantes, utilizando dos mapas en blanco: uno del centro urbano del municipio, donde identificaron posibles fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos cercanas a su institución; y otro con el plano del colegio y sus alrededores, en el que señalaron los puntos críticos percibidos con mayor nivel de

contaminación.

Como apoyo para orientar el análisis, se establecieron convenciones gráficas que facilitaron la representación de las percepciones de los estudiantes sobre las dinámicas ambientales del territorio. Entre las indicaciones propuestas se incluyeron: representar el flujo vehicular en las vías cercanas mediante líneas de diferentes colores según la intensidad del tránsito (rojo: alto flujo vehicular, amarillo: flujo moderado y verde: bajo flujo); identificar con triángulos amarillos las plantas coquizadoras y con triángulos naranjas las minas; y señalar con un “chulo” verde los lugares percibidos con mejor calidad del aire y con una “X” aquellos considerados con peor calidad del aire. Finalmente, los resultados obtenidos fueron discutidos colectivamente con el fin de consensuar los puntos críticos identificados por los estudiantes (Anexo 2).

2.3 Fase 2: Monitoreo y análisis de datos

2.3.1 Monitoreo

A partir de los resultados obtenidos en la Fase 1, se seleccionaron cinco puntos estratégicos por institución educativa para realizar el monitoreo de la calidad del aire. Este proceso se llevó a cabo empleando el equipo Temtop LKC-1000S+ 2nd AQI (Figura 3) PM_{2,5} Detector, el cual permite medir concentraciones de PM_{2,5}, PM₁₀ en $\mu g/m^3$; HCHO, VOCs en mg/m^3 y variables ambientales como la humedad relativa y la temperatura en espacios cerrados.



Figura 3 – Monitor Temtop LKC-1000S+ 2nd AQI

El monitoreo se efectuó dentro de las instalaciones de cada institución, en horario de la mañana, registrando datos durante un periodo de una hora en cada punto, con una frecuencia de un dato por minuto. Siguiendo la metodología propuesta por Rojas et al. (2013), las mediciones se realizaron a

una altura de 1.5 metros sobre el nivel del suelo, en condiciones normales de jornada escolar.

Para el monitoreo en espacios exteriores, se construyó un dispositivo de medición de $PM_{2,5}$ en $\mu g/m^3$ respaldado por la Red Ciudadana de Monitoreo de Calidad del Aire “CanAirIO”. De acuerdo con la metodología establecida por esta comunidad, se ensambló el equipo CanAirIO Plantower PMS7003/G7, el cual permite medir concentraciones de $PM_{2,5}$, así como variables ambientales como temperatura y humedad relativa en ambientes abiertos (CanAirIO, 2025).

Para su construcción, se emplearon componentes como una tarjeta TTGO T-Display, un sensor de humedad y temperatura SHT31 y un sensor Plantower PMS7003/G7 para material particulado $PM_{2,5}$, además de elementos de conexión como jumpers y soldadura. Asimismo, se elaboró la estructura externa utilizando cartón y materiales reciclados, permitiendo el ensamblaje y funcionamiento del dispositivo, como se evidencia en la Figura 4. Dando así, como resultado final, un dispositivo capaz de visualizar datos en tiempo real a través de la aplicación colaborativa CanAirIO y la plataforma web Mobile CanAirIO, facilitando la gestión, consulta y transparencia de la información recolectada durante el monitoreo.



Figura 4 – Ensamble y resultado de Monitor CanAirIO Plantower PMS7003/G7

Al igual que en los espacios interiores, las mediciones en exteriores se realizaron a una altura de 1.5 metros sobre el nivel del suelo, durante un periodo de una hora, registrando un dato cada cinco segundos en horario escolar. Además, durante el monitoreo en exteriores se efectuó un conteo de tráfico vehicular, siguiendo la metodología de Rojas et al. (2013), registrando la frecuencia y el tipo de vehículos que transitaron por las vías cercanas a los puntos de medición.

2.3.2 Análisis de datos

El análisis de los datos se desarrolló en tres etapas complementarias. En primer lugar, las encuestas aplicadas a los estudiantes fueron digitalizadas y sistematizadas en el programa *LibreOffice Calc*, realizando un tratamiento descriptivo mediante el cálculo de frecuencias y porcentajes. Los resultados se representaron gráficamente con el propósito de identificar patrones en la percepción y el nivel de conocimiento sobre la calidad del aire en los espacios escolares.

De igual forma, en esta etapa se efectuó la estimación de la frecuencia vehicular. Los valores obtenidos se expresaron en vehículos por hora (*veh/h*) y se clasificaron cualitativamente en cuatro niveles de actividad vehicular: muy bajo ($0-50\text{veh/h}$), bajo ($51-150\text{veh/h}$), moderado ($151-350\text{veh/h}$) y alto ($> 350\text{veh/h}$), siguiendo la metodología adaptada de Elsharkawy et al. (2022) y la Environmental Protection Agency (2015) para estudios de calidad del aire en entornos escolares.

En segundo lugar, los datos obtenidos durante el monitoreo de la calidad del aire fueron sometidos a un proceso de análisis estadístico. Se aplicaron medidas descriptivas de tendencia central y dispersión (promedio y desviación estándar) para evaluar el comportamiento general de las variables registradas a través de las ecuaciones 1 y 2.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

donde x_i corresponde al valor obtenido de la variable analizada y n al número total de los valores considerados.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

donde (s) mide la dispersión de los datos respecto a su media (\bar{x}), indicando qué tan alejados se encuentran los valores individuales del promedio.

A partir de esta información, por medio del software libre *Python*, se aplicó la metodología ANOVA, análisis que permite evaluar la influencia de diferentes factores (Aguilar et al., 2014), como el tipo de espacio (interior o exterior), el colegio y los puntos de monitoreo. Es por esto, que se realizan los siguientes planteamientos:

1. Evaluar la influencia del tipo de espacio (interior o exterior) y del colegio sobre los niveles de $\text{PM}_{2,5}$. Para ello, se aplicó un modelo estadístico de ANOVA de dos factores (tipo de espacio e institución educativa). Este modelo (eq: 3) permitió identificar si las concentraciones diferían significativamente entre ambientes interiores y exteriores, si existían variaciones entre colegios y si el comportamiento del contaminante cambiaba según el tipo de institución

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (3)$$

Donde:

Y_{ijk} : valor observado de la concentración de $PM_{2,5}$.

μ : media general.

α_i : efecto del tipo de espacio (interior/exterior).

β_j : efecto del colegio.

$(\alpha\beta)_{ij}$: interacción entre ambos factores.

ε_{ijk} : error aleatorio.

2. Analizar las diferencias significativas entre los puntos de monitoreo de cada institución educativa según las concentraciones de los contaminantes $PM_{2,5}$, PM_{10} , HCHO y VOCs. Para esto, se aplicó un modelo de ANOVA de un factor (eq: 4), considerando como factor el *punto de monitoreo interior* (salón de clases, baños, restaurante, etc). El objetivo fue identificar si existían espacios que presentaran concentraciones significativamente diferentes dentro de cada colegio, permitiendo reconocer zonas con mayor acumulación de contaminantes y posibles diferencias asociadas al uso o ventilación de los espacios.

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

Donde:

Y_{ijk} : concentración observada del contaminante.

μ : media general.

α_i : efecto del punto de monitoreo.

ε_{ijk} : error aleatorio.

Así mismo, el ANOVA utiliza el estadístico **F** (eq: 5) para comparar la variabilidad entre los grupos con respecto a la variabilidad dentro de los grupos, en donde se aplica la consigna de que si las diferencias entre los grupos son grandes en comparación con la variabilidad interna, el valor de F será alto, lo cual sugiere que al menos un grupo difiere significativamente de los demás (Hernández, 2020).

$$F = \frac{MS_{entre}}{MS_{dentro}} = \frac{SS_{entre}/(k - 1)}{SS_{dentro}/(N - k)} \quad (5)$$

Donde:

SS_{entre} : suma de cuadrados entre grupos, que representa la variabilidad explicada por las

diferencias entre puntos de monitoreo.

SS_{dentro} : suma de cuadrados dentro de los grupos, asociada a la variabilidad interna o error.

k : número de puntos de monitoreo (grupos).

N : número total de observaciones.

Posteriormente, se aplicó de nuevo un ANOVA de dos factores (eq: 3) para los contaminantes PM_{10} , HCHO y VOCs, donde se compararon los colegios según el espacio interior, con el fin de identificar si existían diferencias conjuntas entre instituciones y ambientes.

Adicionalmente, con el fin de identificar las relaciones lineales entre las variables ambientales medidas en cada institución educativa, se aplicó un análisis de *correlación de Pearson*. Este método permite determinar el grado de asociación entre dos variables cuantitativas, expresado mediante el coeficiente r , cuyo valor varía entre -1 y 1 (Laguna, 2014), donde su coeficiente se define matemáticamente como:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

donde x_i y y_i representan los valores observados de las variables, \bar{x} y \bar{y} son sus medias respectivas, y n es el número total de observaciones.

Para este estudio, el análisis se realizó de forma independiente para cada institución educativa (Gimnasio Campestre Santa Juanita e IED Nuestra Señora del Tránsito) y para cada tipo de espacio (interior y exterior), con el propósito de identificar posibles diferencias en el comportamiento de los contaminantes según el entorno escolar, donde cada matriz se interpretó según los criterios propuestos por Mukaka (2012), donde:

$|r| < 0,3$: correlación débil o nula.

$0,3 \leq |r| < 0,7$: correlación moderada.

$|r| \geq 0,7$: correlación fuerte.

2.4 Fase 3: Sensibilización

Como fase final del proceso, se llevaron a cabo dos talleres educativos (uno en cada institución) orientados a la socialización de los resultados obtenidos durante el monitoreo de la calidad del aire y al fortalecimiento de la conciencia ambiental en las comunidades escolares.

Como primer ejercicio, se retomaron los conceptos abordados en el taller introductorio de la *Fase 1*, reforzando mediante actividades lúdicas y participativas la comprensión de los principales contaminantes atmosféricos y sus efectos sobre la salud humana. De acuerdo con la metodología de educación ambiental propuesta por Botrel et al. (2020), se desarrollaron dinámicas pedagógicas e interactivas entre ellas, el juego “Tingo Tingo Tango” que facilitó la apropiación de los conceptos

básicos necesarios para la interpretación de los resultados del proyecto.

De igual forma, como parte del desarrollo del taller, se presentaron los equipos empleados durante el monitoreo, entre ellos el detector *Temtop LKC-1000S+* y el sensor *CanAirIO Plantower PMS7003/G7*, explicando su funcionamiento, variables monitoreadas y aplicación en los espacios escolares. Cada estudiante tuvo la oportunidad de manipular los instrumentos y observar en tiempo real las mediciones de material particulado, lo que favoreció la comprensión práctica del proceso de muestreo y el fortalecimiento de las competencias científicas básicas.

Posteriormente, se implementó una actividad participativa para la interpretación de los resultados del monitoreo, utilizando un sistema visual de “caritas de colores”: verde (buena calidad del aire), amarilla (calidad moderada) y roja (mala calidad). Cada estudiante ubicó una marca (“X”) en el color correspondiente a su percepción sobre la calidad del aire en los puntos de medición de su institución, propiciando el diálogo sobre las diferencias observadas entre espacios interiores y exteriores, y sus posibles causas.

Finalmente, se conformaron grupos de trabajo de aproximadamente seis estudiantes, quienes desarrollaron una lluvia de ideas orientada a responder la pregunta: *¿Cómo cuidarme de la contaminación del aire?* A partir de esta reflexión, los grupos propusieron acciones individuales, escolares y comunitarias para prevenir y mitigar los impactos de la contaminación atmosférica, evidenciando la apropiación del conocimiento, la identificación de las fuentes locales de emisión y el fortalecimiento del sentido de corresponsabilidad ambiental en los entornos escolar y familiar.

3 Resultados y discusión

En la Fase 1 participaron 28 estudiantes de la IED Nuestra Señora del Tránsito y 10 del Gimnasio Campestre Santa Juanita. En la IED, la mayoría de los estudiantes reportó permanecer entre 2 y 4 horas dentro del aula, mientras que en el Gimnasio Campestre Santa Juanita este tiempo fue mayor, oscilando entre 4 y 8 horas.

De acuerdo con la normativa nacional, los estudiantes de primaria deben cumplir aproximadamente 25 horas semanales de clase, lo que equivale a cerca de 5 horas diarias en el aula (Presidencia de la República de Colombia, 2025). No obstante, se evidencian variaciones en la organización de la jornada entre las instituciones evaluadas. En el Gimnasio Campestre Santa Juanita, la jornada se extiende hasta las 2:45 p.m. e incorpora de manera constante actividades extracurriculares y espacios al aire libre. Por su parte, en la IED Nuestra Señora del Tránsito, los estudiantes asisten en un horario de 7:00 a.m. a 12:00 p.m., lo que implica un menor tiempo de permanencia en la institución, aunque dentro de los lineamientos establecidos a nivel nacional.

En ambas instituciones, las actividades más frecuentes corresponden al recreo y a la práctica deportiva, especialmente fútbol, baloncesto y clases de educación física, además del tiempo de

permanencia en el salón de clases (Figura 5). En este contexto, y en concordancia con Gallardo y Gallardo (2018), el juego se reconoce como una actividad fundamental en el desarrollo integral de los niños, que favorece la formación de valores, el respeto por las normas y una actitud positiva hacia el aprendizaje. En este tipo de población, estas dinámicas adquieren un papel central, lo cual se ve reflejado en la alta frecuencia de actividades relacionadas con el juego y la interacción física reportadas por los estudiantes.

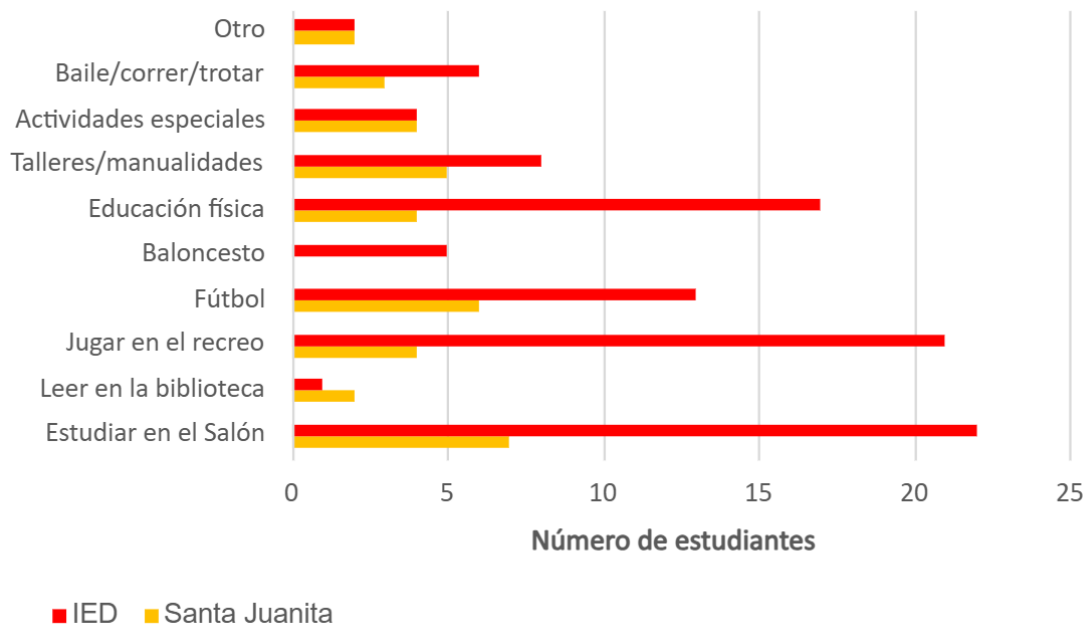


Figura 5 – Actividades más realizadas por los estudiantes

Adicionalmente, respecto a las preguntas relacionadas a la calidad del aire, el 100 % de los estudiantes consideró importante cuidar el aire, reconociéndolo como un elemento esencial para la vida y la salud. Asimismo, entre el 70 % y el 86 % manifestó interés en aprender sobre el estudio y cuidado de la calidad del aire, evidenciando una disposición positiva hacia procesos de educación ambiental.

En cuanto a las molestias reportadas por los estudiantes, predominaron síntomas respiratorios como alergias, estornudos y tos, además de dolor de cabeza y la evidencia de tres casos de asma (Figura 6). En concordancia, los encuestados consideran que los factores que afectan la calidad del aire y favorecen el desarrollo de dichas patologías, se relacionan con la presencia de polvo en salones y pasillos y fuentes externas como el tránsito vehicular, la quema de residuos y, en el contexto rural, las actividades agrícolas y ganaderas. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Saavedra et al. (2021), quien, en un estudio realizado en otras instituciones educativas del municipio, señala que la mayor probabilidad de desarrollar síntomas o enfermedades respiratorias en población escolar se asocia con la cercanía a vías de alto tráfico vehicular y a actividades mineras.

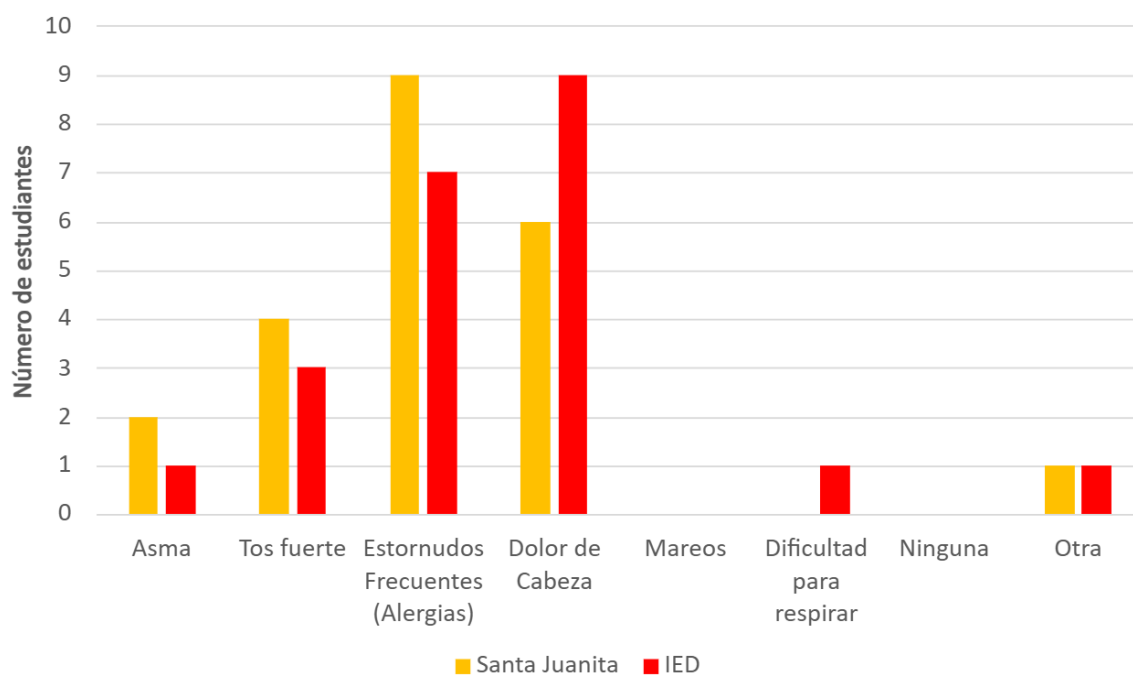


Figura 6 – Síntomas indicados por los estudiantes

Por otro lado, como resultado de la cartografía social, se obtuvo el mapa presentado en la Figura 7, el cual refleja los principales puntos y fuentes de contaminación en el municipio cercanos a las instituciones educativas, según la percepción de los estudiantes. En este se destaca la presencia de minas y plantas coquizadoras ubicadas en proximidad a vías principales, como la carrera 4, lo que evidencia la cercanía entre las actividades extractivas y los espacios cotidianos de la comunidad educativa. En concordancia, el mapa de usos del suelo y actividades productivas elaborado a partir de datos abiertos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2021), los títulos mineros vigentes del Catastro Minero Colombiano (Geoactivismo, 2022) y la información de OpenStreetMap (Figura 8) evidencian una alta actividad minera en la zona. Específicamente, se identifican alrededor de cuatro plantas coquizadoras cercanas a la carrera 4 y una importante área minera hacia el cerro ubicado al sur del casco urbano, donde se concentra la extracción del recurso. En esta zona predomina la explotación de carbón metalúrgico y algunas de sus variantes, como la antracita y el carbón térmico, en correspondencia con la distribución de títulos mineros.

En cuanto al uso del suelo, los estudiantes identificaron que las zonas rurales cercanas al casco urbano presentan un predominio de actividades ganaderas. Esta percepción concuerda con la información cartográfica, donde estas áreas corresponden principalmente a coberturas de pastos limpios. Asimismo, se reconocen algunos cultivos y espacios naturales en los alrededores, lo que sugiere una dinámica territorial en la que coexisten actividades agropecuarias y extractivas en proximidad a los espacios educativos. Estos resultados evidencian que los estudiantes reconocen

tanto las fuentes de contaminación como las características del entorno, lo que contribuye a un proceso de apropiación territorial y comprensión de las dinámicas socioambientales, siendo esto, un reconocimiento clave para fortalecer la toma de decisiones informadas y la construcción de soluciones desde el contexto local, como lo señalan Padilla y Flores (2022).



Figura 7 – Mapa de Guachetá - Cartografía Social (a. Santa Juanita; b. IED).

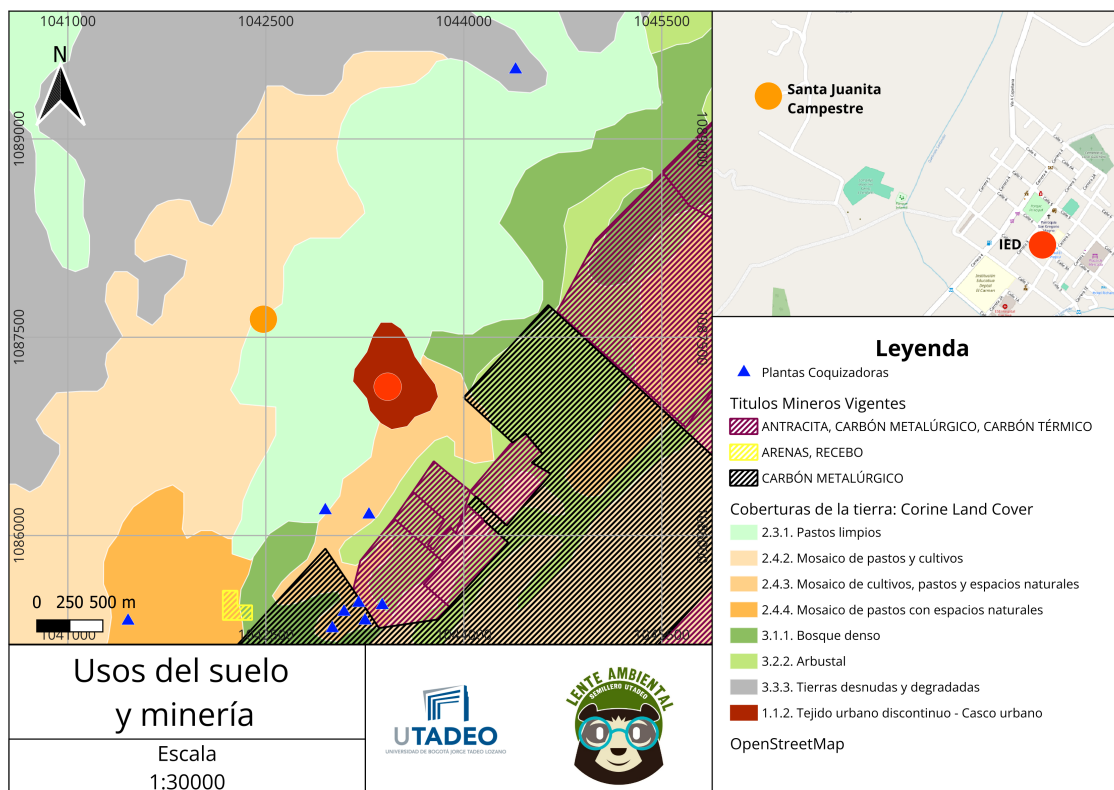


Figura 8 – Mapa usos del suelo y minería del municipio

De igual manera, los estudiantes elaboraron mapas al interior de las instituciones educativas (Figura 9), cuyos resultados fueron sintetizados en el mapa consolidado presentado en la Figura 10. A partir de este ejercicio, se identificaron los principales puntos de monitoreo, destacando zonas con alto flujo de estudiantes y condiciones de ventilación limitadas que podrían favorecer la acumulación de contaminantes en el aire. Asimismo, se reconocieron espacios asociados a posibles actividades emisoras, los cuales se describen en la Tabla 1.

Con base en los resultados obtenidos, se evidenció que los estudiantes perciben mayores niveles de contaminación en áreas cercanas al ingreso de la Institución Educativa Santa Juanita, principalmente asociados a fuentes externas. No obstante, en términos generales, los estudiantes consideraron que al interior de la institución las condiciones de calidad del aire eran adecuadas, aunque señalaron la zona de baños como uno de los espacios con posibles mayores niveles de contaminación. De igual forma, en la IED los puntos identificados con mayor percepción de contaminación en espacios cerrados correspondieron de igual manera a la zona de baños, considerada como uno de los lugares críticos dentro del entorno escolar. Sin embargo, los estudiantes indicaron que las aulas de clase presentaban condiciones favorables de calidad del aire, percepción que también se extendió a espacios como la cooperativa y el restaurante escolar, hallazgos que permitieron definir los lugares estratégicos para el desarrollo de la Fase 2 del estudio.

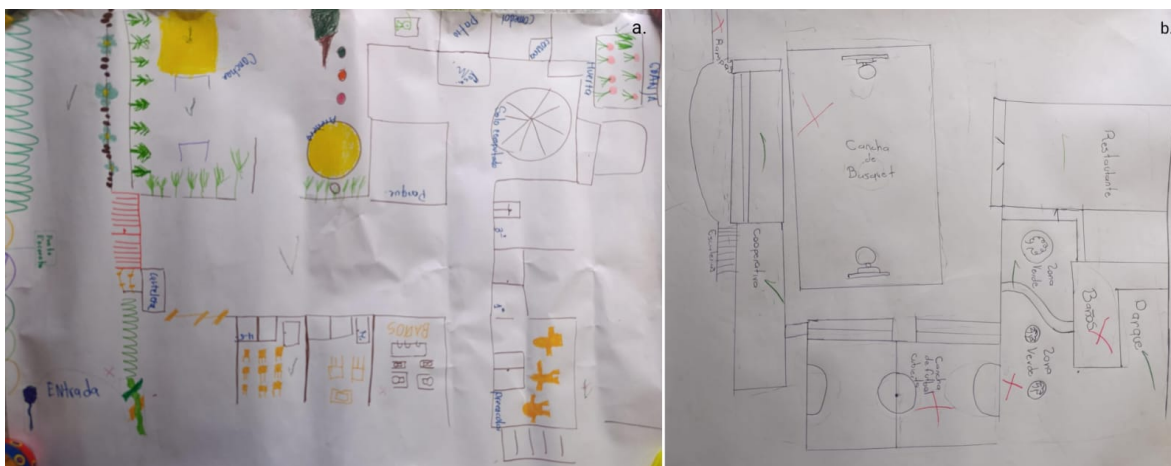


Figura 9 – Mapa Interior Colegios - Cartografía Social (a. Santa Juanita; b. IED.)

Tabla 1 – Puntos identificados para el monitoreo

IED		Santa Juanita	
Lugar	Descripción	Lugar	Descripción
Baños	Zona cercana a las canchas y con alta permanencia de estudiantes.	Baños	Espacio cerrado con alta permanencia de estudiantes y exposición directa al ingreso de viento exterior.
Cooperativa	Lugar donde se preparan alimentos mediante procesos de combustión. Los estudiantes realizan compras frecuentes, aunque el ingreso al área de preparación es limitado.	Casa	Espacio donde se preparan alimentos mediante combustión y se realizan actividades escolares. Los estudiantes permanecen e ingresan constantemente a esta zona.
Restaurante	Espacio destinado a la preparación y consumo de alimentos, con ingreso continuo de estudiantes.	Sala de computación	Lugar con almacenamiento y funcionamiento constante de equipos eléctricos, además de alta permanencia de estudiantes.
Salón 1 (5°)	Espacio con alta circulación de estudiantes, ubicado próximo a una vía vehicular. Los estudiantes participantes permanecen gran parte del tiempo en este lugar.	Granja	Zona con presencia de polvo y animales, además de alta circulación de estudiantes durante actividades escolares.
Salón 2	Área próxima al tránsito vehicular y con permanencia frecuente de estudiantes durante la jornada escolar.	Salón 1	Espacio con alta permanencia y circulación de estudiantes participantes. La principal fuente vehicular cercana corresponde al parqueadero institucional.

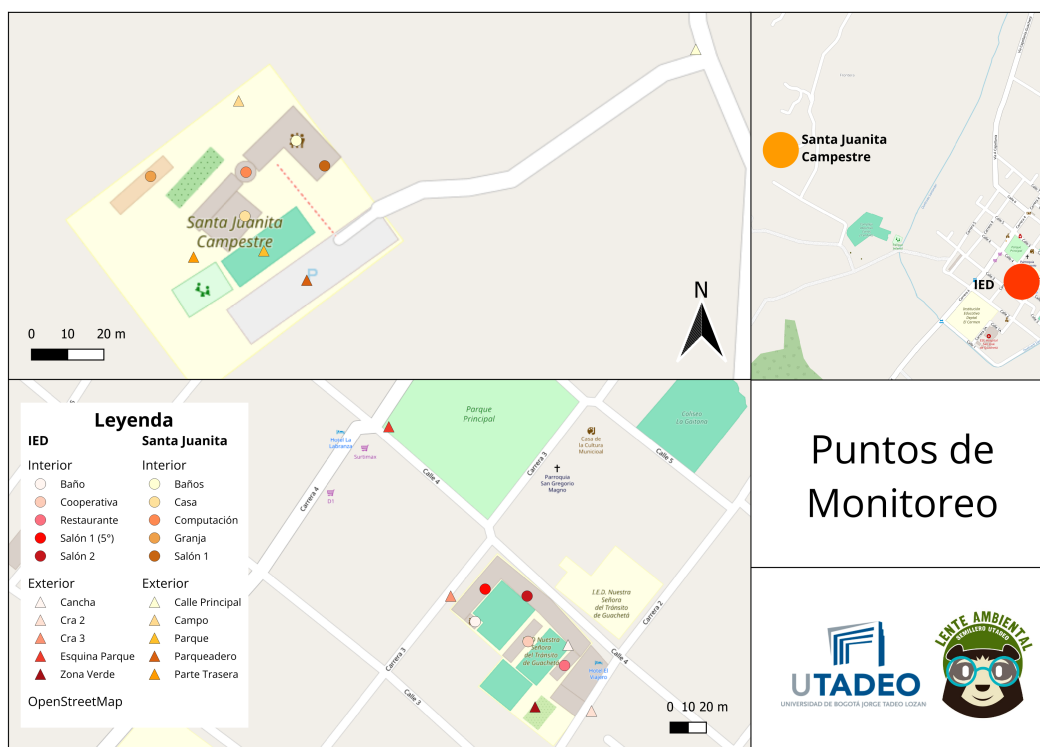


Figura 10 – Mapa puntos de monitoreo identificados

Para el monitoreo al interior de las instituciones educativas, las concentraciones de material particulado se mantuvieron, en general, en un rango bajo a medio, aunque se presentaron algunos episodios puntuales de incremento. En la IED Nuestra Señora del Tránsito, los espacios con mayor variabilidad fueron la Cooperativa y el Restaurante, donde se registraron medianas más elevadas y valores máximos de hasta $21\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} , acompañados de una amplia dispersión y presencia de valores atípicos. En contraste, los salones y baños presentaron concentraciones más estables y homogéneas. Por su parte, en el Gimnasio Campestre Santa Juanita, la mayoría de los espacios mostraron valores bajos y consistentes; sin embargo, la Casa registró las concentraciones más críticas, con máximos cercanos a $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $27\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2,5}$ (Figura 11).

A pesar de estos incrementos puntuales, los valores promedio se mantuvieron por debajo de los niveles de referencia establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). En la IED Nuestra Señora del Tránsito se obtuvieron concentraciones promedio de $3\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2,5}$ y $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} , mientras que en el Gimnasio Campestre Santa Juanita los promedios fueron de $5,4\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2,5}$ y $9,2\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} en periodos de una hora, valores que se consideran adecuados para la protección de la salud infantil. Incluso en la Casa, donde se evidenciaron mayores concentraciones, los promedios se mantuvieron cercanos a $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2,5}$ y $17\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} , estando de igual forma dentro de los rangos recomendados para exposiciones de una hora.

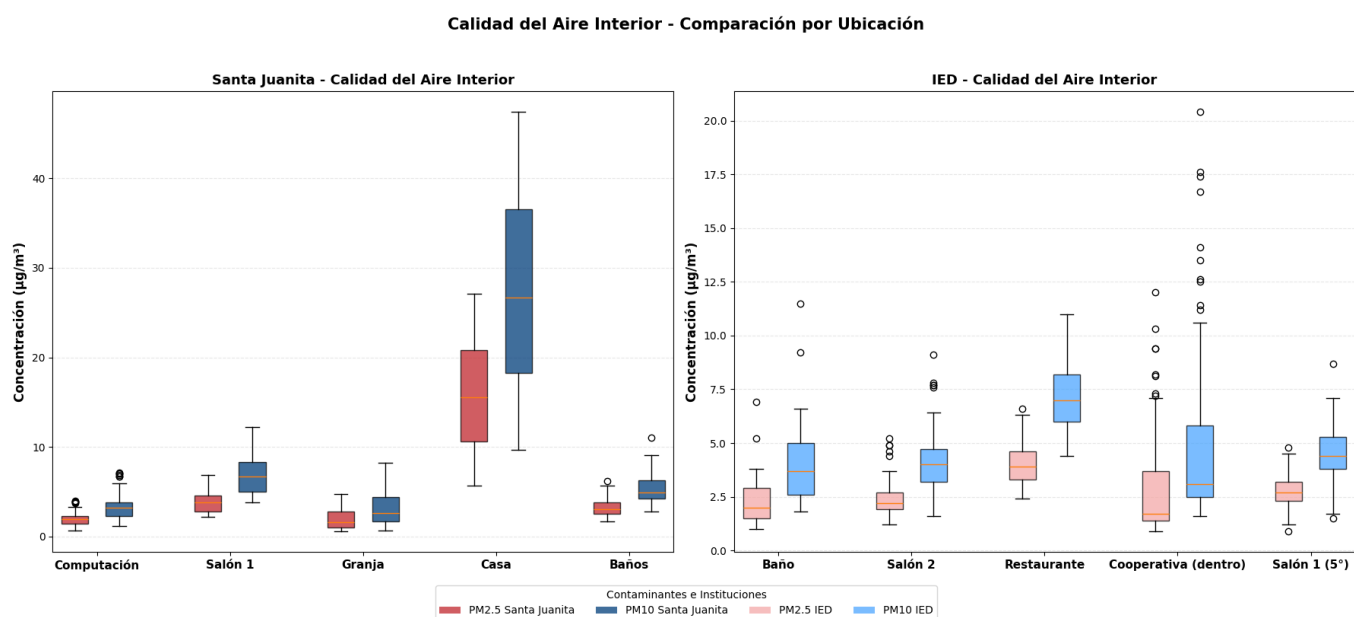


Figura 11 – Boxplot del monitoreo de calidad del aire en espacios interiores.

En cuanto al monitoreo de los puntos exteriores, el dispositivo CanAirIO con sensor Plantower mostró que en la IED se registraron concentraciones promedio de $PM_{2,5}$ superiores a las observadas en el Gimnasio Campestre Santa Juanita. En la IED se obtuvo un promedio general de $4,5 \mu g/m^3$ para $PM_{2,5}$, mientras que en Santa Juanita el promedio fue de $1,9 \mu g/m^3$, manteniéndose ambos dentro de los rangos establecidos por la Resolución 2254 de 2017 para la calidad del aire ambiente.

De igual manera, se evidenció una mayor dispersión en algunos puntos específicos, lo que indica variabilidad temporal en las concentraciones medidas. En particular, la Cra 2 en la IED presentó la mayor variabilidad, con una desviación estándar de 38,9, a pesar de registrar un promedio de $11 \mu g/m^3$ para $PM_{2,5}$, alcanzando valores máximos de hasta $445 \mu g/m^3$. Por su parte, se observó en la Calle Principal de Santa Juanita un promedio general que se mantuvo en $\sim 4 \mu g/m^3$; sin embargo, este punto presentó mayor dispersión comparado con los otros monitoreados en esta institución, presentando una desviación estándar de 7,9 y un valor máximo de $148 \mu g/m^3$ para $PM_{2,5}$ (Figura 12).

Calidad del Aire Exterior - Tendencias por Ubicación

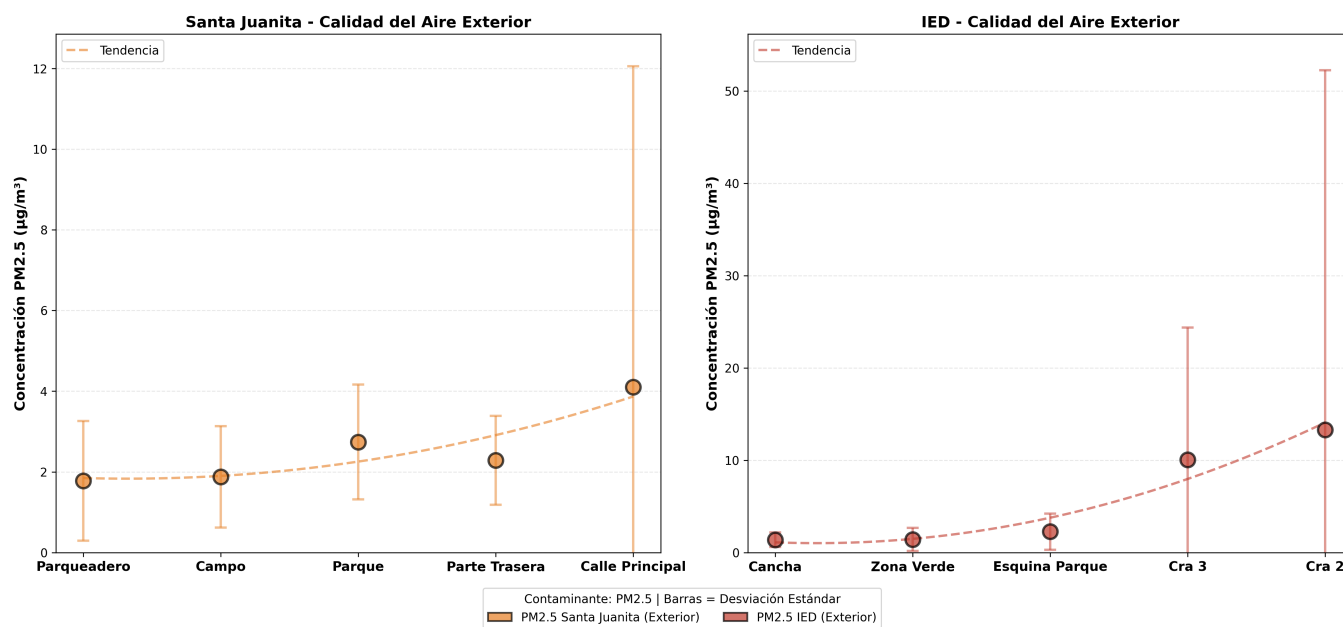


Figura 12 – Boxplot del monitoreo de calidad del aire en espacios exteriores.

Las variaciones observadas pueden asociarse principalmente a la influencia del tránsito vehicular en las zonas monitoreadas, ya que los sectores con mayor flujo de vehículos tienden a presentar incrementos en las emisiones atmosféricas y en la resuspensión de material particulado previamente depositado sobre las superficies, como lo indican Armesto y Cañón (2024) al señalar que una de las fuentes móviles de contaminación atmosférica más relevantes en el país está asociada al flujo vehicular, el cual contribuye significativamente a la concentración de $PM_{2,5}$. No obstante, los autores también destacan que las condiciones meteorológicas influyen directamente en la dinámica de dispersión de los contaminantes, lo que resulta particularmente relevante en entornos abiertos donde la ventilación natural puede favorecer la dilución de las concentraciones.

Estos planteamientos concuerdan con los resultados obtenidos en el presente estudio, ya que, al tratarse de espacios exteriores, la acción del viento y la ventilación natural generan variaciones temporales en las concentraciones registradas. Según las observaciones de campo, estas fluctuaciones pueden manifestarse en incrementos puntuales durante ciertos momentos del día, especialmente en los periodos asociados a mayores niveles de tráfico vehicular. Sin embargo, el análisis de la frecuencia vehicular (Figura 13) evidencia que la relación entre la cantidad de vehículos y la concentración de $PM_{2,5}$ no siempre es proporcional, lo que indica que intervienen otros factores asociados al entorno y a las características de las fuentes de emisión.

En este sentido, se observa que la configuración espacial del lugar de monitoreo puede favorecer o limitar la dispersión de contaminantes, influyendo en los niveles de exposición registrados.

Ejemplificado en los resultados obtenidos en la “esquina del parque”, donde se presentó una de las mayores frecuencias vehiculares ($240veh/h$), clasificada como flujo moderado; sin embargo, las concentraciones de $PM_{2,5}$ no evidenciaron un incremento proporcional, lo que puede explicarse por la presencia de un espacio más abierto y una mayor distancia entre el punto de medición y la vía, condiciones que facilitan la dispersión del material particulado. En contraste, en la “carrera 2”, donde la frecuencia vehicular fue menor ($118veh/h$, flujo bajo), el punto de monitoreo se encontraba más próximo a la vía vehicular y con menor separación entre el tránsito y la zona peatonal, lo que puede favorecer una mayor exposición directa a las emisiones. De manera complementaria, la “calle principal” de Santa Juanita presentó la menor frecuencia vehicular ($23veh/h$, flujo muy bajo), lo cual es consistente con los menores niveles observados de $PM_{2,5}$ en este punto.

Adicionalmente, se identificó que el tipo de vehículo predominante en la zona corresponde principalmente a motocicletas, seguido de camionetas y automóviles particulares, y en menor proporción camiones (Tabla 2). Este aspecto también puede influir en la variabilidad de las concentraciones registradas, debido a las diferencias en los factores de emisión asociados a cada categoría vehicular (Armesto & Cañón, 2024). En conjunto, los resultados evidencian que las concentraciones de $PM_{2,5}$ en entornos urbanos abiertos responden a la interacción entre la intensidad del tráfico, la composición vehicular y las condiciones de dispersión propias del entorno inmediato, como la distancia a la fuente de emisión y la configuración espacial del área de monitoreo.

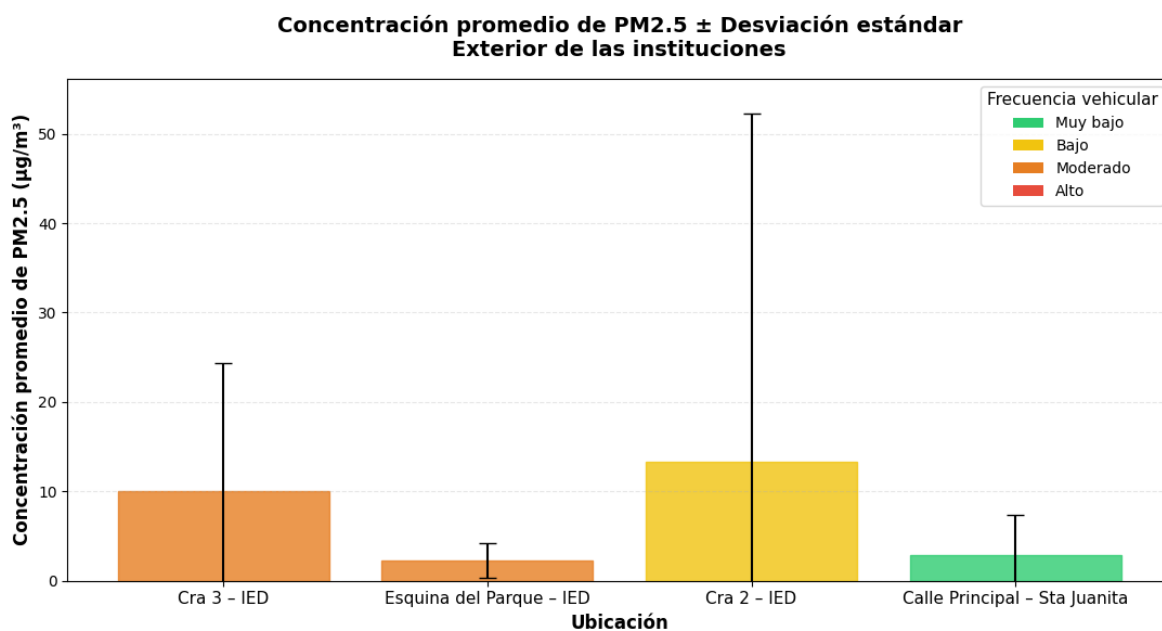


Figura 13 – Frecuencia vehicular y $PM_{2,5}$ en calles cercanas a las instituciones

Tabla 2 – Tipo de vehículo en los puntos de monitoreo (veh/h)

Vehículos	Cra 3 – IED	Esquina del Parque – IED	Cra 2 – IED	Calle Principal – Sta. Juanita
Moto	133	184	81	21
Carro	14	22	9	2
Camioneta	29	24	19	0
Camión pequeño	8	4	8	0
Camión grande	1	1	0	0
Bus	2	0	0	0
Van	1	4	0	0
Trimoto	0	1	1	0
TOTAL [veh/h]	188	240	118	23

En cuanto a los valores obtenidos en el ANOVA de dos factores para $PM_{2,5}$ (Tabla 3), globalmente no se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones promedio entre ambientes interiores y exteriores ($p > 0,05$), ni entre los distintos colegios evaluados ($p > 0,05$). Asimismo, la interacción entre el tipo de espacio y la institución no fue estadísticamente significativa ($p = 0,185$), lo que indica que no existe evidencia suficiente para afirmar que el comportamiento del contaminante varíe en función de la combinación entre institución y espacio. En concordancia con Molina (2017), estos resultados deben interpretarse en términos de evidencia estadística y no como una confirmación absoluta de la hipótesis nula, por lo que no se excluye la posibilidad de que existan variaciones en microambientes específicos de cada institución educativa. En conjunto, los hallazgos sugieren que las concentraciones de $PM_{2,5}$ son comparables entre ambientes, no presentan variaciones sistemáticas entre instituciones y no cambian en función del tipo de colegio, respondiendo más bien a fluctuaciones generales no asociadas a los factores analizados.

Tabla 3 – ANOVA para $PM_{2,5}$ entre interior y exterior

Factor	df	F	PR(> F)
Espacio	1	0,255	0,620
Colegio	1	0,000	0,980
Espacio:Colegio	1	1,992	0,185

En cuanto a los valores obtenidos en el ANOVA de dos factores (Tabla 4), se analizó simultáneamente el efecto del colegio, el efecto del lugar en espacios interiores y la interacción entre ambos factores. Para los contaminantes PM_{10} , HCHO y VOCs, el factor “lugar” resultó estadísticamente significativo ($p < 0,05$), indicando que las concentraciones varían entre los distintos espacios evaluados. No obstante, la interacción colegio \times lugar también fue significativa en todos los casos ($p < 0,05$), lo que evidencia que el efecto del lugar depende de la institución y con ello el punto de monitoreo.

En este sentido, un mismo tipo de espacio no presenta necesariamente el mismo comportamiento en ambos colegios, lo que sugiere que las condiciones particulares de cada institución modulan las concentraciones de los contaminantes. En conjunto, estos resultados indican que la calidad del aire en entornos escolares está determinada por la interacción entre el tipo de microambiente y el contexto específico de cada colegio.

Tabla 4 – ANOVA de dos factores (Colegio y Lugar)

Variable	Factor	df	F	PR(> F)
PM _{2,5}	Lugar	9	29,305	$2,81 \times 10^{-22}$
PM _{2,5}	Colegio:Lugar	9	370,749	$8,12 \times 10^{-181}$
PM ₁₀	Lugar	9	28,012	$2,37 \times 10^{-21}$
PM ₁₀	Colegio:Lugar	9	363,663	$6,33 \times 10^{-179}$
HCHO	Lugar	9	30,675	$2,98 \times 10^{-23}$
HCHO	Colegio:Lugar	9	57,358	$9,19 \times 10^{-49}$
VOCs	Lugar	9	163,657	$1,22 \times 10^{-94}$
VOCs	Colegio:Lugar	9	247,685	$2,82 \times 10^{-143}$

Por su parte, el ANOVA de un factor (Tabla 5) evidenció que, en ambas instituciones, las concentraciones de PM_{2,5}, PM₁₀, HCHO y VOCs presentan diferencias estadísticamente significativas entre los distintos puntos de monitoreo interior ($p < 0,05$). En el colegio Santa Juanita Campestre, estas diferencias fueron más pronunciadas, lo que indica una mayor variabilidad interna en la calidad del aire y sugiere la presencia de fuentes localizadas de emisión o contrastes en condiciones de ventilación y ocupación entre los espacios evaluados; en particular, algunos puntos como la casa presentaron concentraciones significativamente distintas respecto a los demás. En contraste, en la IED Nuestra Señora del Tránsito también se identificaron diferencias significativas entre los espacios, aunque con una menor magnitud estadística, lo que sugiere una distribución más homogénea de los contaminantes y menores contrastes entre microambientes. En ambos casos, los VOCs mostraron las mayores diferencias entre puntos de monitoreo, lo cual podría estar asociado a la presencia de fuentes específicas en interiores, como materiales, productos de limpieza o actividades desarrolladas en los espacios. En conjunto, estos resultados permiten identificar zonas con mayor acumulación de contaminantes y evidencian la influencia de las condiciones de uso y ventilación en la calidad del aire interior.

Tabla 5 – ANOVA de un factor "punto de monitoreo interior" por colegio

Colegio	Variable	df	F	PR(> F)
Santa Juanita	PM _{2,5}	4	283,082	$1,74 \times 10^{-100}$
Santa Juanita	PM ₁₀	4	277,481	$1,84 \times 10^{-99}$
Santa Juanita	HCHO	4	114,161	$4,97 \times 10^{-59}$
Santa Juanita	VOCs	4	1913,813	$4,29 \times 10^{-212}$
IED N.S. Tránsito	PM _{2,5}	4	14,424	$8,76 \times 10^{-11}$
IED N.S. Tránsito	PM ₁₀	4	16,360	$3,90 \times 10^{-12}$
IED N.S. Tránsito	HCHO	4	23,904	$3,54 \times 10^{-17}$
IED N.S. Tránsito	VOCs	4	100,159	$4,81 \times 10^{-54}$

En cuanto a los resultados obtenidos en la correlación de los parámetros medidos (Figura 14), se observó una correlación positiva muy fuerte entre PM_{2,5} y PM₁₀, lo que indica que ambos contaminantes comparten fuentes de emisión comunes. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Echeverri y Maya (2008), quienes identifican que la relación entre estos dos contaminantes es tan fuerte que es posible predecir datos de PM_{2,5} a partir de datos de PM₁₀, o viceversa. De igual forma, estudios realizados en zonas de influencia minera como el Cerrejón, La Guajira (Colombia) muestran aportes importantes de partículas asociadas a procesos de extracción, transporte de material y resuspensión de polvo (Rojano et al., 2015). Así mismo, para zonas urbanas estas concentraciones también pueden estar relacionadas con el tránsito vehicular, la resuspensión de polvo por el paso de personas y vehículos, y el aporte de partículas provenientes de vías no pavimentadas. En zonas rurales, el material particulado puede asociarse adicionalmente a procesos naturales como el arrastre de polvo, polen y otras partículas biogénicas presentes en el ambiente (Puigcerver & Carrascal, 2008).

En cuanto a los parámetros de condiciones ambientales, se observó una relación inversamente proporcional entre la humedad relativa y la temperatura, comportamiento que es físicamente consistente, ya que el aumento de la temperatura incrementa la capacidad del aire para retener vapor de agua, disminuyendo la humedad relativa cuando no existe un aporte adicional de humedad (Tejeda et al., 2018). Sin embargo, tanto la temperatura como la humedad relativa presentaron coeficientes de correlación bajos (generalmente menores a 0.1) con las concentraciones de PM_{2,5}, PM₁₀, VOCs y HCHO, lo que indica que su influencia sobre la variabilidad de los contaminantes fue limitada durante el periodo de medición. Dicha baja correlación asociada a la temperatura puede explicarse debido a que el rango observado en los puntos monitoreados fue relativamente estable, con valores promedio entre 20 y 24 °C, lo cual reduce la posibilidad de identificar relaciones estadísticas significativas. Aunque la temperatura influye físicamente en procesos como la dispersión de contaminantes y la velocidad de ciertas reacciones químicas, en espacios interiores el comportamiento de las concentraciones (CORNARE, 2016) suele depender en mayor medida de la cercanía a fuentes de emisión

directas y de las condiciones de ventilación del lugar.

En el caso de los compuestos orgánicos volátiles totales (VOCs) y el formaldehído (HCHO), se observó una correlación positiva, lo que sugiere que pueden compartir fuentes de emisión similares. Estos compuestos suelen originarse en procesos de combustión de gas natural y otros combustibles, así como en el uso de disolventes presentes en materiales de construcción, pinturas, mobiliario, productos de limpieza, marcadores y adhesivos (Salameh et al., 2020). Estas fuentes están directamente asociadas a las actividades desarrolladas en el entorno escolar, constituyéndose como una de las principales emisiones dentro del aula de clases. Adicionalmente, pueden presentarse aportes externos derivados de procesos de combustión de biomasa o carbón en zonas cercanas, incluyendo actividades relacionadas con la transformación del carbón (coquización), las cuales emiten compuestos orgánicos volátiles. No obstante, los valores promedio registrados fueron bajos ($\sim 0,02\text{mg}/\text{m}^3$ para HCHO y $\sim 0,04\text{mg}/\text{m}^3$ para VOCs), y se encuentran por debajo del valor guía de la Organización Mundial de la Salud (2010) para formaldehído ($0,1\text{mg}/\text{m}^3$ en una exposición de 30 minutos), lo que sugiere que su contribución a la contaminación del aire interior es limitada en las condiciones evaluadas.

Particularmente en la institución Santa Juanita, se observó una asociación entre los VOCs y el material particulado, lo cual podría relacionarse con la presencia de fuentes de combustión en el entorno, especialmente en el interior de la casa donde se preparaban los alimentos para los estudiantes. Los procesos de combustión generan simultáneamente partículas finas y compuestos orgánicos en fase gaseosa (Salameh et al., 2020), lo que explica la posible relación observada entre estas variables. Sin embargo, es importante resaltar que los valores promedio de VOCs y HCHO fueron bajos (aproximadamente entre $0,018$ y $0,019\text{mg}/\text{m}^3$), lo que sugiere concentraciones reducidas en comparación con otros estudios de calidad del aire interior.

En general, los resultados indican que las condiciones meteorológicas medidas durante el monitoreo no fueron el principal factor determinante en la variación de las concentraciones de contaminantes. Por el contrario, la proximidad a fuentes de emisión directas, como cocinas, tránsito vehicular y posibles aportes de actividades mineras cercanas, tuvo una mayor influencia en el comportamiento de los contaminantes evaluados. Esto se evidenció especialmente en el caso de Santa Juanita, donde el material particulado presentó valores más altos en el interior de la casa.

A partir de estos resultados, se dió inicio a la fase 3 del proyecto, orientada a la sensibilización de los estudiantes sobre la calidad del aire y sus efectos en la salud y el ambiente, promoviendo la comprensión de la relación entre las actividades cotidianas, las fuentes de emisión y la calidad del aire en su entorno.

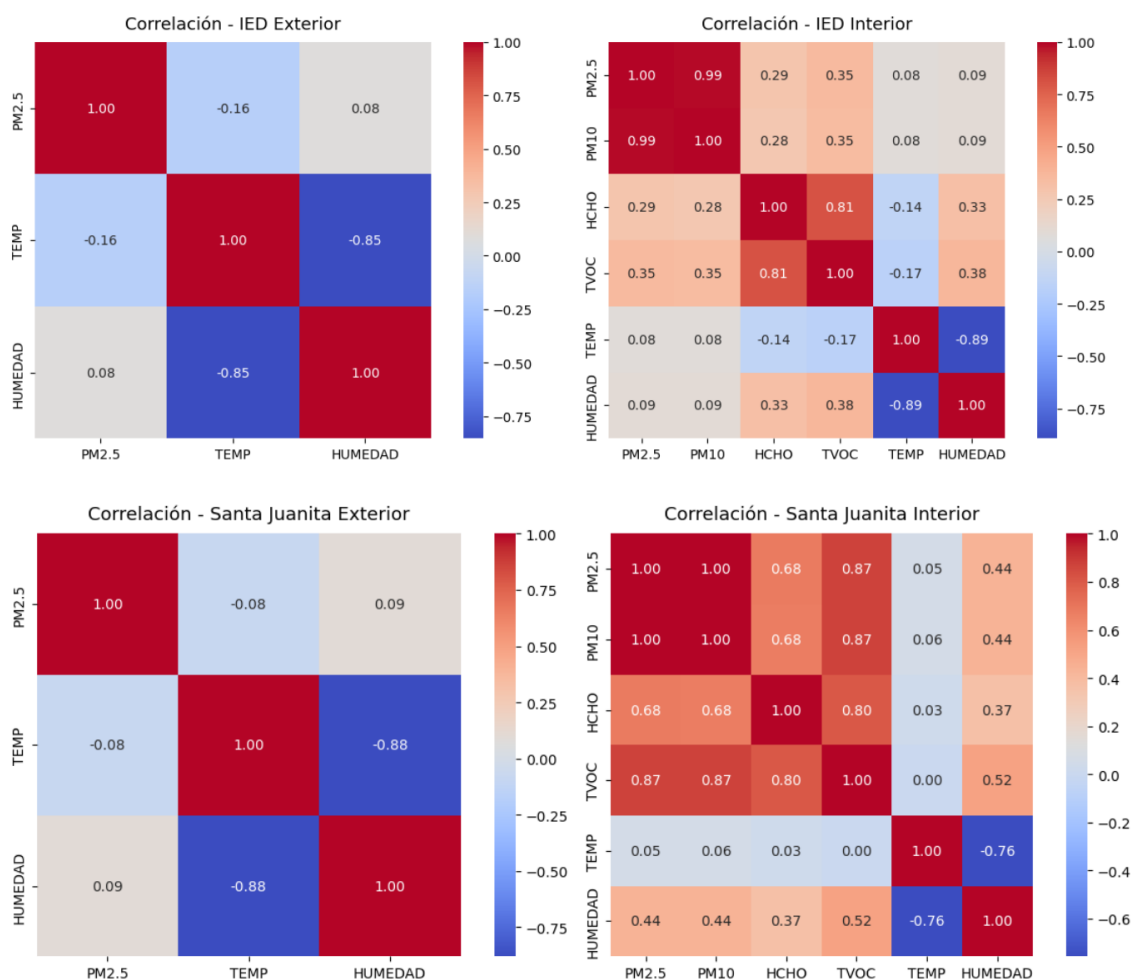


Figura 14 – Correlación de contaminantes y parámetros monitoreados.

Los talleres educativos desarrollados durante la fase de sensibilización evidenciaron un alto interés por parte de los estudiantes en torno a la calidad del aire. Se observó una apropiación de conceptos básicos, como la definición de calidad del aire, las principales fuentes de emisión en el municipio y los métodos de monitoreo. Este último aspecto generó especial interés, ya que los estudiantes manifestaron curiosidad por comprender el funcionamiento de los equipos utilizados, particularmente el CanAirIO Plantower PMS7003/G7. Durante las actividades, se evidenció su motivación por observar las variaciones de las concentraciones en distintos espacios, así como por entender cómo se construyen y operan estos dispositivos.

Este comportamiento se relaciona con el concepto de curiosidad, entendida como “un impulso natural de la persona por interactuar con su entorno, cuestionarse frente a él y explorarlo” (Bernal & Román, 2013), lo cual favorece la adquisición de conocimiento y su aplicación en la vida cotidiana. En este sentido, la interacción directa con los equipos de monitoreo fortaleció los procesos de aprendizaje y

comprensión de los fenómenos asociados a la calidad del aire por parte de los estudiantes.

A partir de esta experiencia, y mediante actividades lúdicas como el juego presentado y la actividad de las caritas evidenciada en la Figura 15, los estudiantes lograron reconocer e interpretar los resultados obtenidos dentro de sus instituciones. Llamó la atención que identificaran espacios con bajos niveles de contaminación, como los baños, los cuales inicialmente no consideraban como lugares con buena calidad del aire. Posteriormente, a través de una lluvia de ideas (Figura 16), se promovió la reflexión colectiva en torno a las acciones necesarias para el cuidado de la calidad del aire.



Figura 15 – Actividad sensibilización.

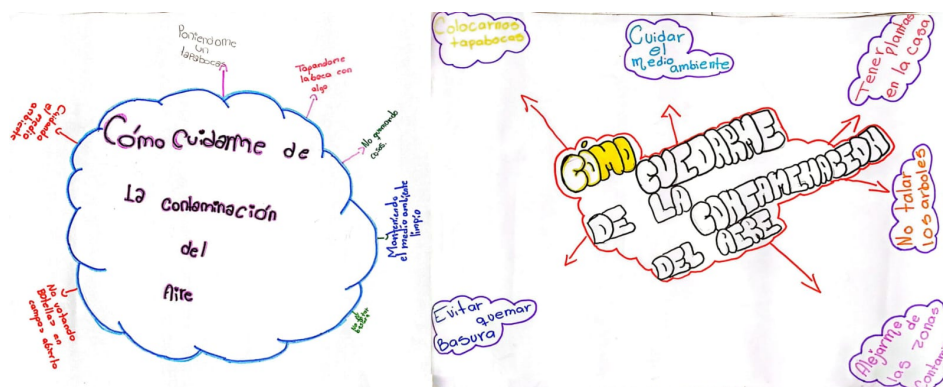


Figura 16 – Lluvia de ideas elaborada por lo estudiantes.

Como resultado, los estudiantes propusieron diversas estrategias orientadas al cuidado de la calidad del aire (Tabla 6). Entre ellas, se destaca el autocuidado mediante el uso de tapabocas en zonas con altas emisiones y flujo vehicular, especialmente en áreas con alta resuspensión de polvo, así como la

evasión de estos espacios cuando sea posible y tomar rutas alternas. Asimismo, plantearon acciones tanto en el hogar como en el entorno escolar, tales como evitar la quema de residuos, sensibilizar a sus familias y mantener una adecuada ventilación en espacios cerrados, particularmente en presencia de fuentes de combustión. Estas propuestas son coherentes con lo señalado por UNICEF (2016), quien destaca la importancia de reducir la exposición de los niños a contaminantes atmosféricos mediante medidas preventivas y el distanciamiento de fuentes de emisión. Finalmente, los estudiantes reconocieron la relevancia de proteger los recursos naturales y fortalecer la conciencia ambiental, promoviendo el cuidado del aire, el suelo y el agua como base para mejorar la calidad de vida en su municipio y en sus comunidades.

Tabla 6 – Resumen de estrategias propuestas por los estudiantes

Ámbito	Estrategias propuestas
Colegio	<ul style="list-style-type: none"> - Mantener los salones ventilados - Usar tapabocas en zonas con polvo - Realizar campañas de conciencia ambiental - Cuidar los espacios escolares - Evitar el uso de químicos en espacios cerrados
Hogar	<ul style="list-style-type: none"> - No quemar basura - Ventilar la vivienda - Reducir el humo dentro de casa - Enseñar prácticas ambientales en familia
Municipio y comunidad	<ul style="list-style-type: none"> - Evitar zonas con mucho tráfico - Buscar rutas con menor contaminación - Proteger el aire, el agua y el suelo - Promover el cuidado ambiental en la comunidad - Evitar paso de vehículos pesados dentro del casco urbano - Mejorar infraestructura vial

4 Conclusiones

En conclusión, los factores que afectan la calidad del aire no dependen únicamente de las condiciones ambientales o de fenómenos naturales, sino que pueden verse influenciados en mayor medida por la cercanía a fuentes de emisión directas. Estas fuentes pueden tener un peso predominante sobre el comportamiento de los contaminantes, opacando la influencia de variables como la temperatura y la humedad relativa, las cuales presentaron correlaciones bajas con las concentraciones de PM_{2,5},

PM₁₀, VOCs y HCHO en los espacios evaluados.

De igual forma, se evidenció que la ventilación es un factor clave para evitar la acumulación de contaminantes en espacios interiores, especialmente en aquellos lugares donde se generan procesos de combustión, como viviendas, restaurantes y la cooperativa donde se preparaban alimentos. Estos espacios presentaron valores diferenciales de material particulado frente a otros puntos evaluados, lo cual confirma que las actividades cotidianas pueden incidir significativamente en la calidad del aire interior.

Dicho esto, en términos generales, la calidad del aire en las instituciones educativas analizadas del municipio de Guachetá se mantuvo dentro de rangos considerados adecuados para los contaminantes evaluados, tanto en el casco urbano como en la zona rural. No obstante, se resalta la necesidad de priorizar el control y la gestión de las fuentes directas de emisión presentes en el territorio, como la quema de residuos, el tránsito vehicular, la resuspensión de material particulado y los posibles aportes asociados a actividades mineras cercanas. Esto debido a que dichas fuentes demostraron tener una influencia significativa sobre la variación de las concentraciones de contaminantes, especialmente en las zonas urbanas y en los espacios con mayor proximidad a focos de emisión

Por otra parte, la cartografía social demostró ser una herramienta fundamental para reconocer el territorio desde la perspectiva de la comunidad educativa, permitiendo integrar el conocimiento técnico con la percepción local. A través de este ejercicio, los estudiantes identificaron puntos relevantes de su entorno, reconocieron problemáticas asociadas a la calidad del aire y reflexionaron sobre posibles acciones de cuidado y autoprotección. Este proceso favorece la apropiación del conocimiento y fortalece la participación activa en la identificación de problemáticas ambientales del territorio.

De esta manera, se logró sensibilizar a la comunidad estudiantil sobre la importancia de estudiar la calidad del aire y sus efectos en la salud y el ambiente. El uso de herramientas accesibles como el monitor CanAirIO con sensor Plantower, construido con materiales reciclables, permitió acercar el conocimiento científico a los estudiantes, facilitando la comprensión del estado del aire que respiran y promoviendo el interés por el monitoreo ambiental participativo. Proceso que contribuye al fortalecimiento del ejercicio del derecho colectivo establecido en el artículo 79 de la Constitución Política de Colombia, el cual indica que “todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano” (Asamblea Nacional Constituyente de Colombia, 1991).

Es por esto que, se logró caracterizar el territorio escolar mediante cartografía social participativa, identificar áreas de mayor exposición a contaminantes a través del monitoreo de PM_{2,5}, PM₁₀, VOCs y HCHO, y sensibilizar a la comunidad estudiantil mediante talleres educativos que promovieron la comprensión del vínculo entre calidad del aire, salud y territorio. Resultados que evidencian la importancia de integrar herramientas técnicas y pedagógicas para fortalecer procesos de educación ambiental y la toma de decisiones informadas a nivel local.

5 Recomendaciones

Se recomienda fortalecer el control y seguimiento de las fuentes de emisión presentes en el municipio, especialmente aquellas asociadas a procesos de combustión en espacios cerrados, tránsito vehicular y actividades extractivas mineras cercanas a las instituciones educativas. Estas fuentes pueden influir de manera directa en la concentración de contaminantes, generando incrementos puntuales de material particulado en ambientes interiores y exteriores.

De igual forma, se sugiere ampliar el alcance de la investigación con el fin de obtener resultados más representativos del comportamiento de la calidad del aire en el territorio. No obstante, el análisis realizado permitió evaluar las condiciones generales de los colegios y establecer comparaciones entre los puntos de monitoreo; de igual forma, es importante considerar una población de estudio más amplia, incluyendo un mayor número de instituciones educativas y espacios comunitarios. Asimismo, se recomienda realizar mediciones en diferentes rangos de tiempo (mañana y tarde) y en distintos periodos del año, con el fin de identificar posibles variaciones asociadas a cambios climáticos, dinámicas de ocupación y actividades productivas del municipio.

Se recomienda también profundizar en el análisis de la influencia de la industria extractiva minera cercana a los colegios, así como realizar un inventario más detallado del flujo vehicular en las zonas de estudio, identificando los tipos de vehículos predominantes y estimando sus emisiones equivalentes. Esto permitiría establecer relaciones más precisas entre las concentraciones de contaminantes y factores abióticos como las condiciones topográficas, la dirección del viento y la ventilación natural del municipio, aportando una comprensión más integral de la dinámica de la calidad del aire en el territorio.

A pesar de que los resultados obtenidos presentaron concentraciones generalmente bajas de contaminantes, se recomienda a las instituciones educativas implementar medidas preventivas que favorezcan la ventilación natural en los espacios interiores, especialmente en áreas donde se desarrollen actividades de combustión, como cocinas o zonas de preparación de alimentos. La apertura de ventanas y puertas puede contribuir a reducir la acumulación de contaminantes en espacios cerrados y disminuir la exposición de la población estudiantil.

Adicionalmente, en zonas donde se evidencie un alto flujo vehicular, en especial de transporte pesado que genere emisiones de material particulado, se recomienda evitar la permanencia prolongada en estos espacios o, en caso de ser necesario, considerar el uso de elementos de protección personal como tapabocas, con el fin de reducir la inhalación de contaminantes. Estas acciones contribuyen a la prevención de enfermedades respiratorias asociadas a la exposición a contaminantes atmosféricos, particularmente en población infantil, la cual es más vulnerable a los efectos de la contaminación del aire.

Finalmente, se recomienda continuar promoviendo estrategias de educación ambiental que forta-

lezcan el conocimiento de la comunidad estudiantil sobre la calidad del aire y sus impactos en la salud y el ambiente, incentivando el uso de herramientas de monitoreo participativo como el sensor CanAirIO. Este tipo de procesos fomenta la apropiación del conocimiento científico y fortalece la participación comunitaria en la identificación y gestión de problemáticas ambientales del territorio.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a la vida por permitirme culminar esta etapa de mi vida con gran orgullo a través de este proyecto, el cual representa no solo un logro académico, sino también un proceso de crecimiento personal y profesional que espero seguir fortaleciendo en el futuro. Un agradecimiento muy especial a mis padres y a mi hermano, quienes con su amor y apoyo incondicional estuvieron presentes en cada viaje, en cada nuevo reto y en cada paso de este camino, brindándome siempre palabras de ánimo y motivándome a continuar incluso en los momentos más difíciles. A mis abuelitos, por acompañarme siempre con ilusión y alegría en cada uno de mis logros, siendo una fuente constante de inspiración, amor y cariño hasta su último aliento. A Ludwig, mi novio, por su amor, paciencia y compañía incondicional, por ser mi compañero de aventuras a lo largo de este proceso y hacer más llevadero cada reto con su apoyo y con ese espíritu que sorprende, ilumina y llena de alegría a cada segundo.

Asimismo, agradezco profundamente al profesor Andrés Muñoz por su acompañamiento, experiencia y dedicación durante el desarrollo de este proyecto y a lo largo de toda la carrera. Gracias por enseñarme la importancia de la ingeniería en el mundo y el poder transformador de la enseñanza cuando se realiza con pasión y desde el corazón. También agradezco a mis amigos, en especial a Alejandra, por escucharme siempre, acompañarme en los momentos más difíciles y brindarme su apoyo sincero cuando más lo necesité, de igual forma, a Felipe, Valentina y Katherin y a todas las personas con quienes compartí esta etapa universitaria, por las enseñanzas, el apoyo y los momentos que hicieron de esta experiencia algo inolvidable. Finalmente, agradezco a la Institución Educativa Departamental Nuestra Señora del Tránsito de Guachetá y al Colegio Santa Juanita Campestre por abrir sus puertas y permitir el desarrollo de esta investigación. Y del mismo modo, a cada persona, comunidad e institución que hizo parte de este camino y apoyó este proyecto, gracias, porque nada de esto habría sido posible sin ustedes.

Referencias

Agudelo, C. A., Quiroz, L., García, J. C., R., R., & García, C. A. (2015). Evaluación de condiciones ambientales: aire, agua y suelos en áreas de actividad minera en Boyacá, Colombia. *Revista de Salud Pública*, 18(1), 50-60. https://www.researchgate.net/publication/301717696_Evaluacion_de_condiciones_ambientales_aire_agua_y_suelos_en_areas_de_actividad_minera_en_Boyaca_Colombia

- Aguilar, M. I., Cruces, E., & Díaz, B. (2014). Análisis de la varianza (ANOVA). <https://share.google/dbrLrD46VcTOLXINO>
- Araujo, G. T. (2010). *Contaminación ambiental y sus efectos sobre la salud*. Instituto Nacional de Salud Pública. https://www.insp.mx/images/stories/INSP/Docs/cts/101208_cs1.pdf
- Armesto, A., & Cañón, J. E. (2024). Concentración de PM_{2,5} y su relación con el flujo vehicular y las condiciones meteorológicas del norte de Ocaña (Colombia). *Tecnura*, 28(80), 39-54. <https://doi.org/10.14483/22487638.19165>
- Constitución Política de Colombia de 1991. Artículo 79. Derecho a un ambiente sano (1991). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4125>
- Barragán, D. F., & Amador, J. C. (2014). La cartografía social-pedagógica: una oportunidad para producir conocimiento y re-pensar la educación. *Itinerario Educativo*, 28(64), 127-141. <https://doi.org/10.21500/01212753.1422>
- Bernal, A. d. P., & Román, J. V. (2013). La curiosidad en el desarrollo cognitivo: análisis teórico. *UNACIENCIA. Revista de Estudios e Investigaciones*, 6(11), -. <https://repository.unac.edu.co/bitstream/handle/11254/698/La%20curiosidad%20en%20el%20desarrollo%20cognitivo%20analisis%20teorico.pdf>
- Botrel, M. C. G., Gonçalves, L. D., & Silva, J. X. (2020). Propuestas didáctico-pedagógicas para la educación ambiental utilizando huertos escolares. *Research, Society and Development*, 9(12), e10888. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i12.10888>
- CanAirIO. (2025). *Getting started with CanAirIO*. <https://canair.io/docs/>
- Cardozo, L. M., Curtidor, L. A., & Lozano, L. A. (2017). Métodos de reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera. *Revista Tecnología y Productividad*. <https://revistas.sena.edu.co/index.php/rtyp/article/view/1557/1719>
- CORNARE. (2016). *Estudio de la dispersión de contaminantes atmosféricos en la jurisdicción de CORNARE: Informe general* (Informe técnico N.º Convenio de asociación No. 173 de 2015). CORNARE. Colombia. https://www.cornare.gov.co/SIAR/aire/CALIDAD_DE_AIRE/CONTENIDO/INFORME-GENERAL.I.pdf
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2024). *Boletines de Calidad del Aire 2007–2024*. <https://www.car.gov.co/vercontenido/2504>
- Departamento Nacional de Planeación. (2014). *Ficha de caracterización territorial: Guachetá – Cundinamarca*. DNP. https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Desarrollo%20Territorial/Fichas%20Caracterizacion%20Territorial/Cmarca_Guachet%C3%A1%20ficha.pdf
- Echeverri, C. A., & Maya, G. J. (2008). Relación entre las partículas finas (PM_{2,5}) y respirables (PM₁₀) en la ciudad de Medellín. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 7(12), 23-42. <https://www.redalyc.org/pdf/750/75011517002.pdf>
- Elsharkawy, M. F., Aljassim, M. T., Alsaif, A. S., & Alsulaiman, S. A. (2022). Indoor air quality at the Arab governmental girls' schools. *F1000Research*, 11, 1125. <https://doi.org/10.12688/f1000research.110775.1>
- Environmental Protection Agency. (2015). Best practices for reducing near-road pollution exposure at schools. https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2015-10/documents/ochp_2015_near_road_pollution_booklet_v16.508.pdf
- Gallardo, J., & Gallardo, P. (2018). Teorías del juego como recurso educativo. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7334691>
- Geoactivismo. (2022, 5 de enero). *Descarga la geoinformación minera de Colombia*. Consultado el 17 de abril de 2026, desde <https://geoactivismo.org/descarga-la-geoinformacion-minera-de-colombia/>

- y monóxido de carbono: resumen ejecutivo. Consultado el 23 de marzo de 2026, desde <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/346062/9789240035461-spa.pdf>
- Padilla, E., & Flores, I. (2022). Apropiación y empoderamiento en la educación ambiental para la sostenibilidad. *Educación y Educadores*, 25(1), e2511. <https://doi.org/10.5294/edu.2022.25.1.1>
- Palacios, Í., & Moreno, D. W. (2022). Contaminación ambiental. *RECIMUNDO*, 6(2), 93-103. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8374646.pdf>
- Decreto 277 de 2025 (2025, 13 de marzo). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=259896>
- Puigcerver, M., & Carrascal, M. D. (2008). *El medio atmosférico: Meteorología y contaminación*. Edicions Universitat de Barcelona. <https://books.google.com.co/books?id=cPYrHVmslewC>
- Querol, X. (2018). *La calidad del aire en las ciudades: un reto mundial*. Fundación Naturgy. <https://www.fundacionnaturgy.org/wp-content/uploads/2018/06/calidad-del-aire-reto-mundial.pdf>
- Ramírez, O. J. (2022). Análisis de la gobernanza en la minería de carbón en el municipio de Guachetá–Cundinamarca–Colombia. *Perspectivas de Desarrollo*, 13(20), 108-. <https://doi.org/10.15765/pdv.v13i20.3457>
- Rojano, R., Angulo, L., & Restrepo, G. (2015). Concentración y relación de PST, PM₁₀ y PM_{2,5} en poblaciones cercanas a minería a cielo abierto: Caso Cerrejón Colombia. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 30(3), 39-48. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652015000300005
- Rojas, N. Y., Behrentz, E., Franco, J. F., & Sarmiento, O. L. (2013). Urban air pollution in school-related microenvironments in Bogota, Colombia = Caracterización de la calidad del aire en microambientes de colegios distritales en Bogotá. *Ingeniería e Investigación*, 33(2). <https://babel.banrepcultural.org/digital/collection/p17054coll23/id/490>
- Saavedra, B. J., Sepúlveda, A. F., Sierra, R. J., & Blanco, L. C. (2021). Asociación entre material particulado y síntomas respiratorios en estudiantes del municipio de Guachetá, Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (104), 168-177. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210954>
- Salameh, T., Liu, X., & Querol, X. (2020). *Documentos guía para mediciones y modelización de nuevos contaminantes en calidad del aire: Compuestos orgánicos volátiles* (Informe técnico). RI-URBANS – Research Infrastructures Services Reinforcing Air Quality Monitoring Capacities in European Urban & Industrial Areas. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/sgalsi/atm%C3%B3sfera-y-calidad-del-aire/ST5_ESP%20MITERD_V2.pdf
- Servicio Geológico Colombiano. (2012). *Carbón colombiano: Recursos, reservas y calidad* (2.ª ed.).
- Tejeda, A., Méndez, I. R., Rodríguez, N. C., & Tejeda, E. (2018). *La humedad en la atmósfera: Bases físicas, instrumentos y aplicaciones*. Universidad de Colima. https://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/La-humedad-en-la-atmosfera_466.pdf
- UNICEF. (2016). *Limpiar el aire para los niños: Resumen ejecutivo* (Publicado en octubre de 2016). Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF). Nueva York, Estados Unidos. https://www.unicef.org/sites/default/files/2019-02/Clear_the_Air_for_Children_Executive_summary_SP.pdf