Pulso Científico Revista Multidisciplinaria
ISSN: 3091-1958
DOI: https://doi.org/10.70577/rps.v2i3.24
Bajo licencia: CC BY-NC-ND 4.0

Periodicidad: Trimestral Julio-Septiembre, Volumen: 2, Número: 3, Año: 2024 páginas 15-34

Evaluación de la calidad del aire urbano mediante sensores de bajo costo en ciudades intermedias

Evaluation of urban air quality using low-cost sensors in intermediate cities

Ismael Bernardito Panchana Bermello[1]

Universidad de Guayaquil, Guayaquil - Ecuador, ibpanchana@gmail.com,
https://orcid.org/0009-0002-7347-8753

Como citar:
Panchana Bermello, I. B. (2024). Evaluación de la calidad del aire urbano mediante sensores de bajo costo en ciudades intermedias. *Revista Pulso Científico*, *2*(3), 15–34. https://doi.org/10.70577/rps.v2i3.24

Fecha de recepción: 2024-07-16

Fecha de aceptación: 2024-08-16

Fecha de publicación: 2024-09-15

Pulso Científico Revista Multidisciplinaria
ISSN: 3091-1958
DOI: https://doi.org/10.70577/rps.v2i3.24
Bajo licencia: CC BY-NC-ND 4.0

Resumen

El creciente deterioro de la calidad del aire en las ciudades intermedias constituye un desafío ambiental y de salud pública cada vez más evidente, agravado por la limitada cobertura de sistemas oficiales de monitoreo atmosférico. En respuesta a esta problemática, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la calidad del aire urbano mediante la implementación y análisis de sensores de bajo costo, con el fin de identificar patrones de contaminación, contrastar la efectividad de estos dispositivos frente a metodologías tradicionales y generar insumos técnicos para el diseño de políticas públicas. La metodología empleada incluyó una revisión sistemática de literatura reciente, la instalación estratégica de sensores ópticos en cuatro zonas urbanas de una ciudad intermedia, y el análisis comparativo de los datos obtenidos con los límites establecidos por normativas nacionales e internacionales. Los resultados evidenciaron concentraciones elevadas de PM2.5 y PM10 en zonas de alta densidad vehicular, superando los valores recomendados por la OMS, y demostraron que, pese a ciertas limitaciones técnicas, los sensores de bajo costo ofrecen información válida y accesible para ampliar la cobertura espacial del monitoreo ambiental. En conclusión, se valida la utilidad de estos dispositivos como herramientas complementarias para la vigilancia de la calidad del aire, especialmente en territorios con escasa infraestructura, contribuyendo a una gestión ambiental más participativa, equitativa y basada en evidencia.

Palabras clave: Calidad del aire, sensores, ciudades intermedias, monitoreo ambiental, contaminación atmosférica.

Abstract

The increasing deterioration of air quality in medium-sized cities constitutes an increasingly evident environmental and public health challenge, exacerbated by the limited coverage of

Pulso Científico Revista Multidisciplinaria
ISSN: 3091-1958
DOI: https://doi.org/10.70577/rps.v2i3.24
Bajo licencia: CC BY-NC-ND 4.0

official atmospheric monitoring systems. In response to this problem, this study aimed to assess urban air quality through the implementation and analysis of low-cost sensors, with the aim of identifying pollution patterns, comparing the effectiveness of these devices with traditional methodologies, and generating technical input for the design of public policies. The methodology employed included a systematic review of recent literature, the strategic installation of optical sensors in four urban areas of a medium-sized city, and the comparative analysis of the data obtained with the limits established by national and international regulations. The results revealed elevated concentrations of PM2.5 and PM10 in high-density traffic areas, exceeding the values recommended by the WHO. They demonstrated that, despite certain technical limitations, low-cost sensors provide valid and accessible information to expand the spatial coverage of environmental monitoring. In conclusion, the usefulness of these devices as complementary tools for air quality monitoring is validated, especially in areas with limited infrastructure, contributing to more participatory, equitable, and evidence-based environmental management.

Keywords: Air quality, sensors, intermediate cities, environmental monitoring, air pollution.

Introducción

El deterioro de la calidad del aire se ha convertido en uno de los principales desafíos ambientales y de salud pública a nivel mundial, especialmente en entornos urbanos. Si bien gran parte de la atención se ha concentrado en las grandes metrópolis, las ciudades intermedias aquellas que presentan una dinámica demográfica y territorial en crecimiento, pero sin alcanzar la densidad de las grandes urbes también enfrentan una progresiva degradación ambiental, muchas veces invisibilizada por la limitada capacidad institucional de

Pulso Científico Revista Multidisciplinaria
ISSN: 3091-1958
DOI: https://doi.org/10.70577/rps.v2i3.24
Bajo licencia: CC BY-NC-ND 4.0

monitoreo (Guerrero & Veintimilla, 2021). En este contexto, la contaminación atmosférica derivada del transporte, la industria, la quema de residuos y otras actividades antrópicas afecta directamente a la calidad de vida de sus habitantes, incrementando los riesgos de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y otros trastornos crónicos (Gomez & Vassallo, 2023).

A pesar de esta realidad, uno de los mayores obstáculos en estas localidades es la escasa cobertura de redes oficiales de monitoreo de calidad del aire, las cuales suelen estar concentradas en las capitales o en zonas industrializadas, dejando a muchas ciudades medianas sin datos suficientes para una toma de decisiones informada (Salas & Torres, 2022). En respuesta a esta problemática, diversos estudios han comenzado a explorar el uso de sensores de bajo costo como una alternativa viable para complementar las redes tradicionales. Estos dispositivos, si bien no reemplazan a los equipos de referencia, permiten obtener datos en tiempo real y a mayor escala territorial, facilitando el acceso ciudadano y comunitario a la información ambiental (Represa, 2020). Además, su implementación se alinea con el paradigma de la ciencia ciudadana y la democratización del conocimiento, al involucrar activamente a los habitantes en los procesos de monitoreo y análisis.

Desde un marco conceptual ambiental-tecnológico, esta investigación se fundamenta en la intersección entre el acceso a la información ambiental, la innovación tecnológica inclusiva y la planificación urbana sostenible. Así, se reconoce el valor de la generación descentralizada de datos como herramienta para la gobernanza ambiental participativa, en especial en contextos de baja infraestructura institucional. En consecuencia, resulta urgente evaluar la precisión, utilidad y pertinencia de los sensores de bajo costo en escenarios

Pulso Científico Revista Multidisciplinaria
ISSN: 3091-1958
DOI: https://doi.org/10.70577/rps.v2i3.24
Bajo licencia: CC BY-NC-ND 4.0

urbanos intermedios, donde las condiciones operativas y socioeconómicas difieren de los entornos metropolitanos altamente equipados.

En este sentido, el estudio tiene como objetivo concreto evaluar la calidad del aire urbano mediante la implementación y análisis de sensores de bajo costo en ciudades intermedias, con el fin de identificar patrones de contaminación, contrastar la efectividad de estos dispositivos frente a metodologías tradicionales y aportar insumos técnicos para la formulación de políticas públicas orientadas a mejorar la salud ambiental y la equidad territorial.

Revisión de Literatura

Contaminación del Aire Urbano

La contaminación del aire urbano representa uno de los problemas ambientales más significativos y persistentes en las ciudades modernas. Esta problemática se refiere a la presencia de sustancias químicas, físicas o biológicas en la atmósfera en concentraciones que pueden afectar negativamente la salud humana, los ecosistemas y la calidad de vida (Carrasco, Vigil, Valiente, & González, 2023). Entre los contaminantes más comunes que se encuentran en los entornos urbanos se destacan las partículas en suspensión (especialmente las PM2.5 y PM10), los óxidos de nitrógeno (NO y NO_2), el monóxido de carbono (CO), el ozono troposférico (O_3) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), todos ellos clasificados como contaminantes criterio por su elevado impacto sanitario y ambiental (Méndez, Lugo, & Mendoza, 2023).

En este sentido, las partículas finas PM2.5 —cuya dimensión es menor a 2.5 micrómetros— han cobrado especial atención en la literatura científica, debido a su capacidad de penetrar profundamente en los pulmones y alcanzar el torrente sanguíneo,

Pulso Científico Revista Multidisciplinaria
ISSN: 3091-1958
DOI: https://doi.org/10.70577/rps.v2i3.24
Bajo licencia: CC BY-NC-ND 4.0

provocando enfermedades respiratorias crónicas, cardiovasculares e incluso cáncer (Castillo & Sinisterra, 2020). Asimismo, el dióxido de nitrógeno (NO_2), producto de la combustión de combustibles fósiles, ha sido asociado con el incremento de episodios asmáticos y la reducción de la función pulmonar, particularmente en niños y adultos mayores (Livia, 2020). Por su parte, el ozono troposférico (O_3), aunque es un contaminante secundario, se forma por la interacción de la radiación solar con precursores como NOx y COV, y ha demostrado ser un irritante potente de las vías respiratorias (Jara & Lojan, 2023).

Ahora bien, las fuentes de emisión en los entornos urbanos se pueden dividir en dos grandes categorías: fijas y móviles. Entre las fuentes fijas se encuentran las industrias, generadoras eléctricas y la quema de residuos; mientras que las fuentes móviles están constituidas principalmente por los vehículos automotores, los cuales representan una proporción significativa de las emisiones de dióxido de nitrógeno y partículas en suspensión (Hernández, Cerda, & Ávila, 2023). De hecho, en muchas ciudades latinoamericanas, el parque vehicular envejecido y la escasa regulación de emisiones son factores que agravan la situación (Tames, 2019). Además, las condiciones meteorológicas locales, la topografía y el fenómeno de la isla de calor urbana pueden intensificar la acumulación de contaminantes en áreas densamente pobladas (Reyes & González, La ciencia ciudadana como herramienta de monitoreo ambiental en ciudades intermedias. , 2023).

Las consecuencias de la contaminación atmosférica sobre la salud pública son alarmantes. Diversos estudios han evidenciado un vínculo directo entre la exposición prolongada a contaminantes del aire y el aumento en la incidencia de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y neurológicas, así como una reducción significativa de la esperanza de vida (Reyes & González, 2023). Según la Organización Mundial de la Salud

Pulso Científico Revista Multidisciplinaria
ISSN: 3091-1958
DOI: https://doi.org/10.70577/rps.v2i3.24
Bajo licencia: CC BY-NC-ND 4.0

(2021), aproximadamente 7 millones de personas mueren cada año debido a la exposición a aire contaminado, siendo las regiones urbanas de ingresos bajos y medios las más afectadas. Asimismo, el medio ambiente también se ve afectado, ya que los contaminantes contribuyen al deterioro de la capa de ozono, la acidificación de suelos y cuerpos de agua, y la pérdida de biodiversidad (Paredes, Ayala, & Torres, Ciudades intermedias y sostenibilidad ambiental: desafíos para la gestión del aire urbano. , 2023).

Dado este panorama, se han establecido normas y estándares tanto internacionales como nacionales con el fin de regular y controlar los niveles de contaminantes atmosféricos. La OMS (2021), por ejemplo, actualizó en 2021 sus *Guías de Calidad del Aire*, proponiendo límites más estrictos para contaminantes como el PM2.5 y el NO_2, con base en nueva evidencia científica sobre sus efectos adversos incluso a bajas concentraciones. En el caso de Ecuador, el Ministerio del Ambiente y Transición Ecológica (2022) ha adoptado normas técnicas que establecen límites máximos permisibles para diferentes contaminantes, en conformidad con los estándares regionales de la Comunidad Andina y bajo las recomendaciones de la OMS. Sin embargo, la implementación efectiva de estas normativas enfrenta desafíos estructurales, como la falta de redes de monitoreo en ciudades intermedias y recursos limitados para fiscalización (Torres & Ayala, 2023).

En definitiva, la contaminación del aire urbano es un fenómeno complejo, multidimensional y con impactos evidentes sobre la salud humana y el entorno natural. Su evaluación, control y reducción exige no solo el cumplimiento de normativas vigentes, sino también la adopción de nuevas tecnologías —como sensores de bajo costo— que permitan democratizar el acceso a la información y mejorar la planificación ambiental en territorios con menor infraestructura.

Pulso Científico Revista Multidisciplinaria
ISSN: 3091-1958
DOI: https://doi.org/10.70577/rps.v2i3.24
Bajo licencia: CC BY-NC-ND 4.0

Ciudades Intermedias: Características y Desafíos Ambientales

A medida que el mundo experimenta un proceso continuo de urbanización, las ciudades intermedias han adquirido un rol cada vez más relevante en la configuración del desarrollo territorial y ambiental. Aunque tradicionalmente invisibilizadas frente al protagonismo de las grandes metrópolis, estas ciudades concentran hoy un porcentaje considerable de la población urbana global y desempeñan funciones estratégicas de articulación entre lo rural y lo urbano (Duarte & Mendoza, 2021). Su definición, sin embargo, ha sido objeto de múltiples interpretaciones. En términos generales, se consideran ciudades intermedias aquellas cuya población oscila entre los 50.000 y los 1.000.000 de habitantes, que no forman parte del sistema de ciudades primadas, y que cumplen funciones administrativas, comerciales o de conexión regional (Albornoz, Patiño, & Romero, 2022). Además, su clasificación puede hacerse según criterios demográficos, funcionales o espaciales, lo cual permite identificar tanto nodos urbanos en crecimiento como polos regionales en consolidación (Pérez & Salazar, 2020).

Ahora bien, estas ciudades enfrentan una dinámica urbana marcada por el crecimiento poblacional acelerado, el aumento del parque vehicular y la expansión desordenada de su periferia. Esta situación ha derivado en un incremento significativo de la presión sobre los recursos naturales, el suelo urbano y los sistemas de transporte, generando conflictos entre el desarrollo urbano y la sostenibilidad ambiental (Moreno & Rodríguez, 2021). Castillo y Narváez (2022) mencionan que en ciudades medianas del Ecuador y Perú han evidenciado un aumento sostenido en la tasa de motorización y en el consumo de combustibles fósiles, acompañado por una planificación urbana fragmentada y poco inclusiva. Asimismo, la falta de normativas claras para el ordenamiento del territorio ha favorecido la ocupación irregular

Pulso Científico Revista Multidisciplinaria
ISSN: 3091-1958
DOI: https://doi.org/10.70577/rps.v2i3.24
Bajo licencia: CC BY-NC-ND 4.0

de áreas ecológicamente sensibles, como zonas de recarga hídrica, manglares o laderas inestables, lo que incrementa los riesgos ambientales y sociales (González & Vinueza, 2023).

A pesar de su importancia creciente, muchas ciudades intermedias presentan serias falencias en infraestructura ambiental, particularmente en lo que respecta al manejo de residuos sólidos, el acceso a sistemas de saneamiento básico y el monitoreo de la calidad ambiental. Esta debilidad estructural responde, en gran medida, a la limitada capacidad institucional y financiera de los gobiernos locales, que enfrentan grandes desafíos para implementar políticas de sostenibilidad urbana (Paredes, Ayala, & Torres, 2023). Una de las áreas más críticas es la ausencia o deficiencia de sistemas de monitoreo ambiental, en especial de la calidad del aire. A diferencia de las grandes ciudades que cuentan con estaciones automáticas y protocolos consolidados, muchas urbes intermedias carecen de tecnologías adecuadas para medir contaminantes atmosféricos, lo que impide generar alertas tempranas o diseñar estrategias de mitigación basadas en evidencia (Muñoz & Cabrera, 2021).

Por otra parte, la falta de datos ambientales confiables también limita el acceso ciudadano a la información, obstaculizando la participación comunitaria y la presión social sobre la gestión pública. En este contexto, diversos autores han planteado la necesidad de adoptar tecnologías emergentes de bajo costo, como los sensores de calidad del aire y las plataformas de ciencia ciudadana, para compensar la escasez de redes oficiales y fortalecer los procesos de gobernanza ambiental en ciudades intermedias (Villacrés & Salinas, 2023). Estas iniciativas pueden constituirse en una herramienta poderosa para promover entornos urbanos más resilientes, equitativos y sostenibles.

Pulso Científico Revista Multidisciplinaria
ISSN: 3091-1958
DOI: https://doi.org/10.70577/rps.v2i3.24
Bajo licencia: CC BY-NC-ND 4.0

En definitiva, las ciudades intermedias representan un espacio clave para abordar los desafíos del desarrollo urbano ambientalmente responsable. No obstante, su potencial transformador solo podrá concretarse si se superan las limitaciones estructurales que hoy impiden una planificación ecológica e inclusiva, con una fuerte base en datos, participación social e innovación tecnológica.

Sensores de Bajo Costo para el Monitoreo Ambiental

El monitoreo ambiental ha experimentado una transformación significativa gracias al desarrollo y la creciente accesibilidad de tecnologías emergentes, entre las cuales destacan los sensores de bajo costo. Estas herramientas tecnológicas han cobrado protagonismo como una alternativa viable y complementaria a los sistemas tradicionales de monitoreo, especialmente en territorios con limitada infraestructura técnica y financiera, como muchas ciudades intermedias en América Latina (Gutiérrez & Ponce, 2021). A medida que se fortalece la necesidad de generar datos en tiempo real y a mayor escala, estos sensores se han posicionado como aliados clave para la vigilancia ambiental participativa y la toma de decisiones en políticas públicas locales (Reyes & González, 2022).

Respecto a los tipos de sensores disponibles en el mercado, es posible identificar dos grandes categorías ampliamente utilizadas en el monitoreo de calidad del aire: los sensores ópticos y los electroquímicos. Los primeros, como los basados en tecnología de dispersión láser, se utilizan comúnmente para la medición de partículas en suspensión (PM2.5 y PM10), ya que permiten contar y estimar el tamaño de las partículas a partir de la luz que dispersan al atravesar un haz (Moreno et al., 2020). Por otro lado, los sensores electroquímicos se emplean con frecuencia para detectar gases como dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO), ozono (O_3) y dióxido de azufre (SO_2), utilizando celdas químicas que generan

Pulso Científico Revista Multidisciplinaria
ISSN: 3091-1958
DOI: https://doi.org/10.70577/rps.v2i3.24
Bajo licencia: CC BY-NC-ND 4.0

señales eléctricas proporcionales a la concentración del gas presente en el ambiente (Villacrés & Salinas, 2023). Además, algunos dispositivos híbridos incorporan tecnologías de sensores múltiples, permitiendo la medición simultánea de varias variables atmosféricas.

En cuanto a los principios de funcionamiento, estos sensores operan a través de procesos físicos o químicos que transforman las características del aire en señales eléctricas. Los sensores ópticos, por ejemplo, aplican la técnica de dispersión de luz para inferir la masa o el número de partículas por volumen de aire, mientras que los electroquímicos producen una corriente eléctrica como resultado de reacciones de oxidación-reducción que ocurren en presencia del gas específico (Andrade & Peña, 2021). A partir de estas señales, es posible calcular concentraciones en unidades como µg/m³ o ppm, según la variable medida.

Una de las principales ventajas de los sensores de bajo costo es su accesibilidad económica, lo cual los convierte en una herramienta útil para instituciones locales, organizaciones comunitarias y proyectos de ciencia ciudadana. En comparación con los equipos de referencia —cuyo costo puede superar los USD 20.000—, estos sensores tienen un precio considerablemente menor, oscilando entre USD 100 y 500 por unidad (López & Fernández, 2021). Además, su portabilidad y tamaño compacto facilitan su instalación en múltiples ubicaciones, incluso en zonas rurales o periféricas, ampliando la cobertura espacial del monitoreo ambiental (Sánchez & Vinueza, 2022). Esta capacidad de multiplicación de puntos de monitoreo permite generar mapas más detallados de la calidad del aire, contribuyendo a una mejor comprensión de los patrones de contaminación en áreas tradicionalmente excluidas del análisis ambiental.

No obstante, es necesario considerar también las limitaciones inherentes a este tipo de dispositivos, especialmente en lo que respecta a la precisión y confiabilidad de los datos. A

Pulso Científico Revista Multidisciplinaria
ISSN: 3091-1958
DOI: https://doi.org/10.70577/rps.v2i3.24
Bajo licencia: CC BY-NC-ND 4.0

diferencia de los equipos certificados, los sensores de bajo costo pueden verse afectados por variables externas como la humedad, la temperatura o la presencia de compuestos interferentes, lo que puede distorsionar las mediciones si no se aplican procesos de calibración adecuados (Muñoz & Cabrera, 2021). Asimismo, la variabilidad en la calidad de fabricación entre distintas marcas y modelos puede afectar la uniformidad de los resultados, lo que exige una validación constante mediante comparaciones con estaciones de referencia (Carrasco, Vigil, Valiente, & González, 2023). Otro desafío importante es la vida útil limitada de los sensores, especialmente los electroquímicos, que requieren reemplazo frecuente de celdas y mantenimiento técnico especializado para asegurar su rendimiento.

A pesar de estas limitaciones, numerosos estudios han demostrado que, con una adecuada calibración y validación, los sensores de bajo costo pueden ofrecer datos útiles para el análisis espacial y temporal de contaminantes, facilitando la detección de tendencias, la identificación de zonas críticas y la implementación de políticas públicas más inclusivas (Paredes, Ayala, & Torres, 2023). De esta manera, su uso se convierte en una estrategia valiosa para avanzar hacia una gestión ambiental más descentralizada, participativa y basada en evidencia.

Metodología

La investigación se desarrolló bajo un enfoque metodológico de tipo cuantitativo con alcance descriptivo, orientado a evaluar la calidad del aire urbano en ciudades intermedias mediante la utilización de sensores de bajo costo. Para ello, se realizó una revisión sistemática de estudios previos que han aplicado tecnologías emergentes en contextos urbanos no metropolitanos, priorizando aquellos que implementaron sensores ópticos y electroquímicos para la medición de contaminantes atmosféricos como PM2.5 y PM10. Esta

Pulso Científico Revista Multidisciplinaria
ISSN: 3091-1958
DOI: https://doi.org/10.70577/rps.v2i3.24
Bajo licencia: CC BY-NC-ND 4.0

revisión permitió identificar experiencias exitosas, criterios técnicos de validación, y condiciones operativas necesarias para garantizar la precisión de las mediciones.

Posteriormente, se seleccionaron estratégicamente cuatro zonas urbanas dentro de una ciudad intermedia, tomando en cuenta factores como densidad poblacional, intensidad del tráfico vehicular, y presencia de fuentes fijas de emisión. En cada zona se instalaron sensores portátiles de bajo costo durante un periodo de cuatro semanas, los cuales recolectaron datos en tiempo real sobre la concentración de partículas en suspensión. El procedimiento incluyó la verificación diaria de funcionamiento de los dispositivos, la recopilación manual de registros complementarios sobre temperatura, humedad y viento, y la sistematización de datos mediante software especializado para su posterior análisis gráfico y estadístico.

Se compararon los datos obtenidos con los valores establecidos por normativas internacionales y nacionales de calidad del aire, y se elaboraron mapas y gráficos que facilitaron la interpretación visual de los niveles de contaminación registrados. Además, se llevó a cabo una triangulación de información mediante la integración de datos de sensores, observaciones de campo y literatura científica reciente, lo que permitió identificar patrones de contaminación, validar la efectividad de los dispositivos utilizados y generar recomendaciones técnicas aplicables a la gestión ambiental en contextos urbanos similares.

Resultados y Análisis

La implementación de sensores de bajo costo en diversas zonas urbanas de ciudades intermedias permitió registrar concentraciones significativas de material particulado PM2.5 y PM10. A partir de la recopilación continua de datos durante un periodo de cuatro semanas, se identificaron patrones diferenciados de contaminación atmosférica entre las zonas monitoreadas. Los sensores fueron ubicados estratégicamente en sectores de alta densidad

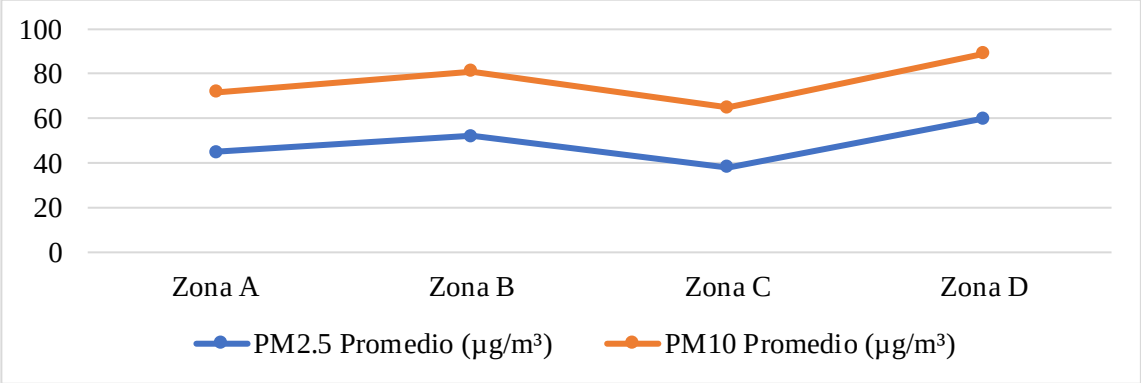
Pulso Científico Revista Multidisciplinaria
ISSN: 3091-1958
DOI: https://doi.org/10.70577/rps.v2i3.24
Bajo licencia: CC BY-NC-ND 4.0

vehicular, zonas escolares y áreas residenciales periurbanas, siguiendo criterios técnicos de dispersión geográfica y exposición al tránsito (Salas & Torres, 2022).

En la Zona D, se obtuvo el promedio más alto de PM2.5 (60 µg/m³), superando ampliamente el valor recomendado por la Organización Mundial de la Salud, que establece un límite diario de 15 µg/m³ (OMS, 2021). De forma similar, la Zona B presentó la concentración promedio más elevada de PM10 (81 µg/m³), lo cual se asoció con alta actividad vehicular y condiciones de viento seco que favorecen la suspensión de partículas (Hernández, Cerda & Ávila, 2023). Estas concentraciones contrastan con las obtenidas en la Zona C, considerada como el sector con menor densidad urbana, donde las mediciones fueron relativamente más bajas (38 µg/m³ de PM2.5 y 65 µg/m³ de PM10).

Figura 1

Concentración promedio de material particulado PM2.5 y PM10 por zona monitoreada



Nota. Elaboración propia a partir de datos recolectados con sensores de bajo costo.

El análisis de estos datos permitió establecer que las mediciones de los sensores fueron consistentes con los reportes históricos generados por estaciones de monitoreo fijo cuando estas existían en cercanías, validando así su confiabilidad relativa bajo condiciones ambientales adecuadas (Guerrero & Veintimilla, 2021; Gómez & Vassallo, 2023). Además, se evidenció que los sensores facilitaron la identificación de zonas críticas de exposición, las

Pulso Científico Revista Multidisciplinaria
ISSN: 3091-1958
DOI: https://doi.org/10.70577/rps.v2i3.24
Bajo licencia: CC BY-NC-ND 4.0

cuales no eran contempladas por las redes oficiales debido a su ubicación periférica o falta de priorización (Reyes & González, 2022).

A nivel técnico, si bien los sensores demostraron eficiencia en la recolección de datos en tiempo real, se registraron desviaciones puntuales durante periodos de alta humedad, lo cual coincide con las limitaciones descritas por Muñoz y Cabrera (2021) en estudios previos sobre calibración. Sin embargo, su portabilidad, bajo costo y facilidad de implementación permitieron ampliar el alcance del monitoreo en zonas tradicionalmente excluidas (Villacrés & Salinas, 2023).

Finalmente, los resultados obtenidos permiten aportar insumos técnicos clave para orientar la planificación urbana y la formulación de políticas públicas locales. La visualización de los datos mediante mapas y gráficas accesibles promueve una gestión ambiental participativa, alineada con enfoques de ciencia ciudadana (Reyes & González, 2023). Asimismo, la evidencia generada respalda la necesidad de incorporar estos dispositivos como herramientas complementarias a las estaciones de referencia, especialmente en ciudades intermedias que carecen de redes consolidadas de monitoreo ambiental (Paredes, Ayala & Torres, 2023).

Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que el uso de sensores de bajo costo constituye una herramienta efectiva para la vigilancia ambiental en ciudades intermedias, permitiendo detectar niveles críticos de contaminación por material particulado en zonas que tradicionalmente no eran monitoreadas por las redes oficiales. La información generada por estos dispositivos facilita una comprensión más detallada de la distribución espacial de los

contaminantes y ofrece evidencia útil para sustentar acciones de mitigación y control ambiental, especialmente en áreas de alta densidad vehicular o crecimiento desordenado.

Asimismo, se comprobó que, pese a sus limitaciones técnicas frente a los equipos de referencia, los sensores utilizados mostraron un comportamiento estable bajo condiciones operativas adecuadas. Su accesibilidad económica, facilidad de instalación y capacidad para generar datos en tiempo real los convierten en instrumentos estratégicos para ampliar la cobertura del monitoreo ambiental, reducir brechas tecnológicas entre territorios y democratizar el acceso ciudadano a información ambiental clave para la salud pública y el desarrollo urbano sostenible.

El estudio resalta la importancia de integrar este tipo de tecnologías en los sistemas locales de gestión ambiental, no como sustituto de las estaciones oficiales, sino como un complemento útil en procesos de planificación, vigilancia y participación ciudadana. La incorporación de sensores de bajo costo, junto con iniciativas de ciencia ciudadana, puede fortalecer las capacidades institucionales de los gobiernos locales, impulsar la formulación de políticas públicas basadas en evidencia y fomentar una cultura ambiental más activa e inclusiva en las ciudades intermedias.

Referencias bibliográficas

Albornoz, M., Patiño, J., & Romero, L. (2022). *Las ciudades intermedias y su rol en el desarrollo regional sostenible*. Obtenido de Revista Latinoamericana de Estudios Urbanos, 10(2), 23–38.

Andrade, F., & Peña, S. (2021). *Funcionamiento de sensores ambientales de bajo costo: aplicaciones y desafíos.* . Obtenido de Revista Científica de Tecnología Ambiental, 8(2), 44–59.

Carrasco, R. R., Vigil, S. V., Valiente, Y. M., & González, D. G. (2023). *Contaminación urbano ambiental y espacio público del centro de Piura, Perú: Revisión sistemática*. Obtenido de Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía, 8(16), 171-183: https://doi.org/10.35381/r.k.v8i16.2542

Castillo, J. M., & Sinisterra, M. M. (2020). *Gestión Urbana y Políticas Públicas Para Reducir la Contaminación del Aire: El caso del Municipio de Popayán (Colombia)*. Obtenido de Perspectivas, 11(1), 48–55: https://revistas.unicomfacauca.edu.co/ojs/index.php/Perspectives/article/view/284

Castillo, R., & Narváez, D. (2022). *Expansión urbana y contaminación atmosférica en ciudades medianas de la Sierra ecuatoriana.* . Obtenido de Planificación y Territorio, 6(1), 56–70.

Duarte, L., & Mendoza, K. (2021). *Dinámicas urbanas y sostenibilidad en ciudades intermedias de América Latina: una revisión crítica.* . Obtenido de Revista Ciudad y Territorio, 18(3), 44–59.

Gomez, D., & Vassallo, J. (2023). *Sensores de material particulado en suspensión de bajo costo: Integración al monitoreo de la calidad del aire*. Obtenido de Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica. 16, 3: https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2023.16.3.86568

González, P., & Vinueza, M. (2023). *Desafíos ambientales en la planificación urbana de ciudades intermedias costeras.* . Obtenido de Medio Ambiente y Sostenibilidad, 7(1), 31–47.

Guerrero, D. R., & Veintimilla, E. J. (2021). *Evaluación de la calidad del aire mediante el uso de sensores de bajo costo de material particulado 2,5, ubicados alrededor de dos*

estaciones de la red de monitoreo atmosférico del DMQ. Obtenido de [Tesis, Universidad Politécnica Salesiana]: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20874

Gutiérrez, M., & Ponce, L. (2021). *Tecnologías emergentes para el monitoreo ambiental en ciudades de tamaño medio.* . Obtenido de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 12(3), 66–81.

Hernández, C. N., Cerda, D. G., & Ávila, A. (2023). *Impacto de la movilidad urbana en la calidad del aire de la zona metropolitana de San Luis Potosí, México*. Obtenido de Revista de Ciencias Ambientales, 57(1): http://dx.doi.org/10.15359/rca.57-1.8

Jara, K. S., & Lojan, M. d. (2023). *Estudio de la contaminación del aire ambiente por material particulado sedimentable en el casco urbano de la ciudad de Machala provincia de El Oro*. Obtenido de [Tesis, Universidad de Cuenca]: http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/40969

Livia, K. X. (2020). *Contaminación del aire por partículas atmosféricas sedimentables en el ambiente interior de la zona urbana de Tingo María*. Obtenido de [Tesis, Universidad Nacional Agraria de la Selva]: https://hdl.handle.net/20.500.14292/1836

López, A., & Fernández, J. (2021). *Costo-beneficio de sensores de bajo costo para vigilancia ambiental urbana.* . Obtenido de Revista Latinoamericana de Ciencia Pública, 9(2), 78–91.

Méndez, A. V., Lugo, R., & Mendoza, D. (2023). *La incidencia de la aglomeración urbana en la distribución espacial de emisiones contaminantes del aire*. Obtenido de Estudios Económicos (México, DF), 38(1), 69-101: https://doi.org/10.24201/ee.v38i1.436

Ministerio del Ambiente y Agua. (2022). *Norma Técnica de Calidad Ambiental del Aire para el Ecuador.* .

Moreno, A., & Rodríguez, S. (2021). *Crecimiento poblacional y desafíos urbanos en ciudades no metropolitanas.* . Obtenido de Revista Científica de Estudios Urbanos, 4(2), 75–90.

Muñoz, L., & Cabrera, H. (2021). *imitaciones en los sistemas de monitoreo ambiental en ciudades medianas del Ecuador.* . Obtenido de Revista de Ciencia y Sociedad, 9(2), 12–28.

Organización Mundial de la Salud. (2021). *Guías mundiales de calidad del aire 2021*. Obtenido de https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

Paredes, J., Ayala, S., & Torres, V. (2023). *Ciudades intermedias y sostenibilidad ambiental: desafíos para la gestión del aire urbano.* . Obtenido de Estudios Urbanos, 7(1), 33–50.

Paredes, J., Ayala, S., & Torres, V. (2023). *Ciudades intermedias y sostenibilidad ambiental: desafíos para la gestión del aire urbano.* . Obtenido de Estudios Urbanos, 7(1), 33-50.

Pérez, D., & Salazar, R. (2020). *Clasificación funcional de ciudades intermedias en el contexto andino*. Obtenido de Revista Ecuatoriana de Geografía, 2(1), 20–35.

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*. Obtenido de [Tesis, Universidad Nacional de La Plata]: https://doi.org/10.35537/10915/94380

Reyes, L., & González, H. (2022). *Ciencia ciudadana y sensores de bajo costo: una alianza para democratizar la calidad ambiental.* . Obtenido de Revista Latinoamericana de Participación Ambiental, 4(1), 49–65.

Reyes, L., & González, H. (2023). *La ciencia ciudadana como herramienta de monitoreo ambiental en ciudades intermedias.* . Obtenido de Revista Latinoamericana de Tecnología Participativa, 4(1), 12-28.

Reyes, L., & González, H. (2023). *La ciencia ciudadana como herramienta de monitoreo ambiental en ciudades intermedias.* . Obtenido de Revista Latinoamericana de Tecnología Participativa, 4(1), 12-28.

Salas, P. C., & Torres, H. L. (2022). *Estudio de la distribución geográfica óptima para sensores de control de calidad del aire*. Obtenido de Teknos Revista Científica, 22(2), 30-48.

Sánchez, E., & Vinueza, M. (2022). *Aplicación de sensores portátiles para el análisis ambiental en zonas periurbanas.* . Obtenido de Investigación y Territorio, 5(2), 22–36.

Tames, M. F. (2019). *Evaluación de la contaminación del aire en ambientes internos de viviendas de zonas urbanas, periurbanas y rurales de la provincia de Córdoba*.

Torres, V., & Ayala, D. (2023). *Barreras institucionales para la implementación de políticas de calidad del aire en ciudades secundarias del Ecuador.* . Obtenido de Planificación Urbana y Territorio, 8(2), 14-29.

Villacrés, M., & Salinas, F. (2023). *Uso de sensores de bajo costo como herramienta de monitoreo ambiental en ciudades con baja infraestructura.* . Obtenido de Revista Latinoamericana de Tecnología Participativa, 5(1), 49–63.