Revista de I+D TECNOLÓGICO
Portal de revistas: http://revistas.utp.ac.pa

Sistemas de bajo costo para el monitoreo de contaminación del aire: evaluación, viabilidad y aplicaciones

Low-cost air pollution monitoring systems: evaluation, feasibility, and applications

Felisindo García[1,2], Gerald Sáez[1,2], Yessica Sáez[1,2,3], Edwin Collado[1,2,3,]*

[1]Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
[2]Centro Regional de Azuero, Grupo de Investigación en Ingeniería de Telecomunicaciones y Sistemas Inteligentes aplicados a la sociedad (ITSIAS), Los Santos, Panamá
[3]Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología AIP (CEMCIT AIP), Panamá

***Autor de correspondencia:** edwin.collado@utp.ac.pa

RESUMEN. El monitoreo de la calidad del aire es fundamental tanto para la salud pública como para la protección ambiental. Este artículo presenta una revisión del estado del arte sobre los sistemas de monitoreo de contaminación del aire de bajo costo, destacando su viabilidad, aplicaciones y potencial para hacer accesible la monitorización en diversos entornos urbanos y rurales. Se evalúan diversos sensores y tecnologías de comunicación, subrayando la importancia de técnicas avanzadas como la inteligencia artificial (IA) y el Internet de las Cosas (IoT) para mejorar la precisión y la confiabilidad de estos sistemas. La calibración es uno de los principales desafíos en la implementación de estos dispositivos, especialmente bajo condiciones ambientales variables, como la temperatura y la humedad, que pueden comprometer la exactitud de las mediciones. Para mitigar estas limitaciones, el estudio explora metodologías avanzadas de calibración, incluidas técnicas de regresión y algoritmos de aprendizaje automático, que ajustan los datos de los sensores y optimizan la calidad de las mediciones, contribuyendo a una monitorización más eficaz y precisa.

Palabras clave. Calibración de sensores, Calidad del aire, Contaminación de aire, Internet de las Cosas, Monitoreo de aire, Sensores de bajo costo.

ABSTRACT. Air quality monitoring is fundamental for public health and environmental protection. This article presents a state-of-the-art review of low-cost air pollution monitoring systems, highlighting their feasibility, applications, and potential to make monitoring accessible across diverse urban and rural environments. Various sensors and communication technologies are evaluated, emphasizing the importance of advanced techniques like Artificial Intelligence (AI) and the Internet of Things (IoT) to enhance the accuracy and reliability of these systems. Calibration represents a primary challenge in the deployment of these devices, particularly under changing environmental conditions, such as temperature and humidity, which can affect measurement accuracy. To address these limitations, the study explores advanced calibration methodologies, including regression techniques and machine learning algorithms, which adjust sensor data and improve measurement quality, contributing to more effective and precise monitoring.

Keywords. Calibration of sensors, Air quality, Air pollution, Internet of Things, Air monitoring, Low-cost sensors.

1. Introducción

La contaminación del aire representa uno de los mayores desafíos para la salud pública y el medio ambiente, siendo responsable de millones de muertes prematuras anualmente. Entre los principales contaminantes atmosféricos que afectan la calidad del aire se encuentran el material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), el ozono (O_3), el

Citación: F. García, G. Sáez Y. Sáez y E. Collado, "Sistemas de bajo costo para el monitoreo de contaminación del aire: evaluación, viabilidad y aplicaciones", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 22, no. 2, pp. (0), 2026.
Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 14 de enero de 2025. **Recibido con correcciones:** 19 de octubre de 2026. **Aceptado:** 19 de octubre de 2026.
DOI.
Copyright: 2026 F. García, G. Sáez Y. Sáez y E. Collado. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

dióxido de nitrógeno (NO_2), y los compuestos orgánicos volátiles (VOC), que están vinculados a enfermedades respiratorias, cardiovasculares y neurológicas [1] .Estos contaminantes son particularmente peligrosos en áreas urbanas densamente pobladas, donde la exposición prolongada contribuye a un deterioro significativo de la salud pública [2].

El monitoreo continuo de la calidad del aire es fundamental para identificar fuentes de contaminación y mitigar sus efectos. Sin embargo, las estaciones de monitoreo tradicionales son costosas, lo que limita su implementación en diversas regiones, especialmente en países en desarrollo [3]. Los sensores de bajo costo han emergido como una solución alternativa, permitiendo la expansión de redes de monitoreo y facilitando la recolección de datos en tiempo real. No obstante, estos sensores presentan desafíos en términos de precisión, especialmente cuando se enfrentan a cambios ambientales como temperatura y humedad.

Este trabajo se centra en la evaluación y viabilidad de los sistemas de monitoreo de calidad del aire de bajo costo, considerando el impacto de las metodologías de calibración y las nuevas tecnologías como la inteligencia artificial (IA) y el Internet de las Cosas (IoT) para mejorar la precisión de las mediciones. A través de la integración de sensores con sistemas de comunicación avanzados, se espera optimizar la monitorización tanto en entornos urbanos como rurales, proporcionando información clave para la toma de decisiones y la implementación de políticas públicas más efectivas.

2. Materiales y Métodos

Para la ejecución de esta revisión sistemática, se adoptaron las directrices PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) con el objetivo de analizar exhaustivamente los sensores utilizados en el monitoreo de calidad del aire, con un enfoque en sensores de bajo costo y las técnicas de calibración aplicadas. Esta metodología proporciona un marco estructurado y transparente que asegura la reproducibilidad de los resultados, abordando cada etapa del proceso con rigor. Incluye la formulación de preguntas de investigación clave, el diseño de estrategias de búsqueda en bases de datos relevantes, y la definición de criterios de inclusión y exclusión para garantizar la selección de estudios pertinentes. Además, se aplicaron técnicas específicas para evaluar la calidad de los documentos seleccionados, considerando aspectos como la validez, relevancia y confiabilidad de los datos. La síntesis y extracción de datos fue realizada mediante herramientas estandarizadas para identificar patrones, comparaciones y tendencias relevantes en los estudios analizados. Finalmente, se incluyó una evaluación del riesgo de sesgo para garantizar la objetividad de los resultados, utilizando métodos como las tablas de riesgo y los gráficos de viñeta. Este enfoque permite ofrecer conclusiones fundamentadas que respaldan la toma de decisiones informadas en el campo del monitoreo de calidad del aire.

2.1 Preguntas de investigación

Se identificaron las siguientes preguntas de investigación (PI) y se proporcionó un análisis detallado para poder responderlas. Se desarrollaron preguntas específicas para orientar la revisión sistemática, buscando abordar aspectos cruciales relacionados con las tecnologías utilizadas para el monitoreo de calidad del aire:

- PI1. ¿Qué métodos utilizan los sensores de bajo costo para la medición?
- PI2. ¿Cuáles son los métodos que se utilizan para la calibración?
- PI3. ¿Cómo se pueden proteger dichos sensores en el medio ambiente sin afectar la obtención de los datos?
- PI4. ¿Cuáles son los requisitos de uso y tiempo de vida aproximado?
- PI5. ¿Qué métodos de comunicación utilizan?

Las preguntas de investigación (PI1-PI5) formuladas en este estudio se diseñaron con el propósito de guiar una revisión sistemática sobre las tecnologías de monitoreo de calidad del aire, centrándose en sensores de bajo costo. En primer lugar, la PI1 busca identificar y comparar los diferentes métodos de medición utilizados por los sensores de bajo costo, evaluando su precisión, fiabilidad y aplicabilidad en diversos entornos. La PI2 explora los métodos de calibración de estos sensores, lo cual es esencial para garantizar que las mediciones sean precisas

incluso bajo condiciones ambientales cambiantes como variaciones de temperatura y humedad. La PI3 se enfoca en cómo proteger los sensores contra factores ambientales como lluvia o polvo sin que esto afecte la calidad de los datos recolectados, ya que la protección es clave para su durabilidad. La PI4 analiza los requisitos técnicos y el tiempo de vida útil de los sensores, aspectos esenciales para evaluar la viabilidad y rentabilidad de estos dispositivos en proyectos a largo plazo. Finalmente, la PI5 investiga los métodos de comunicación utilizados por los sensores (como Wi-Fi, Bluetooth, etc.), lo cual es importante para garantizar su integración en redes y su desempeño eficiente en campo, permitiendo la transmisión de datos de manera efectiva. En conjunto, PI1 y PI2 aportan criterios para la evaluación del desempeño; PI3 y PI4 permiten examinar la viabilidad técnica y operativa, mientras que PI5, junto con los escenarios de implementación, contribuye a identificar las aplicaciones y las condiciones necesarias para su funcionamiento.

2.2. Proceso detallado de búsqueda

Con el fin de realizar una revisión detallada y obtener información pertinente, se seleccionaron Google Scholar, IEEE Xplore y Scielo, debido a su extenso repositorio de artículos sobre diversos métodos de medición de la contaminación del aire. Se utilizaron palabras clave como: sensores, calibración, calidad del aire, IoT y monitoreo, y se optó por buscar los términos en inglés debido a la mayor cantidad de artículos disponibles en este idioma. En el proceso de búsqueda pudimos encontrar 53 artículos, 36 de Google Scholar, 12 de IEEE xplore y 5 de Scielo, de los mismos se seleccionaron 29 artículos que cumplían con el enfoque de nuestra investigación, siendo seleccionados 20 de Google Scholar, 8 de IEEE Xplore y 1 de Scielo. El proceso de búsqueda se organizó en varias etapas temáticas para garantizar un enfoque integral. La Figura 1 muestra una gráfica de pastel que explica en términos de porcentaje, la cantidad de artículos seleccionados en nuestra revisión literaria:

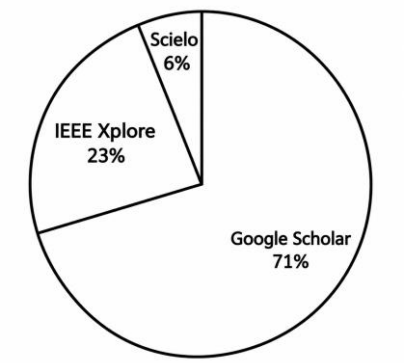


Figura 1. Cantidad de artículos seleccionados de cada buscador (en porcentaje).

En primer lugar, se investigaron artículos relacionados con sistemas de monitoreo de la calidad del aire en general, con el fin de identificar cuál de estos sistemas resultaba ser el más conveniente. A continuación, la búsqueda se centró en sensores de bajo costo capaces de medir contaminantes específicos, permitiendo evaluar tanto las opciones disponibles en el mercado actual como los avances tecnológicos en esta área. Esto no solo proporcionó información sobre los métodos de medición empleados por los diferentes sensores, sino también sobre sus mecanismos de transmisión de datos.

Con esta información preliminar, se llevó a cabo una revisión de los métodos de comunicación de datos más relevantes y compatibles con los sensores identificados previamente, con el fin de establecer un flujo eficiente de recopilación y transmisión de la información generada. Este enfoque permitió obtener un panorama claro sobre los sensores y tecnologías más adecuados para el monitoreo de la calidad del aire, considerando tanto su rendimiento como sus capacidades de comunicación de datos.

2.3. Cadena de búsqueda

La estrategia de búsqueda se estructuró a partir de los conceptos que se repetían con mayor frecuencia en la literatura relacionada con el objetivo del estudio: calidad del aire, sensores de bajo costo, calibración, Internet de las Cosas (IoT), monitoreo ambiental y tecnologías de comunicación. Para ampliar la recuperación de estudios relevantes se utilizaron operadores booleanos AND y OR, así como comillas para expresiones compuestas. La

cadena general empleada para localizar estudios sobre monitoreo y sensores de bajo costo fue ("air quality" OR "air pollution") AND ("low-cost sensor*" OR "air quality sensor*") AND (monitoring OR measurement). Para profundizar en el desempeño y la calibración se utilizaron combinaciones como ("air quality" OR "air pollution") AND ("low-cost sensor*" OR "electrochemical sensor*" OR "particulate matter sensor*") AND (calibration OR validation OR performance OR accuracy OR "field evaluation").

A medida que se identificaron las tecnologías de interés, la búsqueda se hizo más específica. Para los contaminantes considerados se combinaron los términos (PM2.5 OR PM10 OR CO OR NO2 OR O3 OR SO2) AND ("low-cost sensor*" OR "electrochemical sensor*" OR "optical sensor*") AND (monitoring OR calibration). En el caso de los sistemas conectados se utilizó ("air quality" OR "air pollution") AND (IoT OR "Internet of Things" OR "wireless sensor network*") AND (monitoring OR sensor*), mientras que para el análisis de las tecnologías de comunicación se empleó ("air quality" OR "environmental monitoring") AND (LoRa OR LoRaWAN OR LPWAN) AND (sensor* OR IoT). Estas combinaciones se adaptaron a las opciones de búsqueda disponibles en Google Scholar, IEEE Xplore y SciELO, manteniendo los mismos conceptos principales. También se realizaron búsquedas complementarias en español para localizar antecedentes regionales.

2.4. Fechas de búsqueda

Como criterio temporal se priorizaron publicaciones comprendidas entre 2017 y 2024, intervalo en el que se concentra la mayor parte de los trabajos identificados sobre sensores de bajo costo, IoT y redes inalámbricas aplicadas al monitoreo ambiental. La búsqueda bibliográfica se desarrolló durante la elaboración de la revisión y se actualizó hasta incluir publicaciones del año 2024. Se conservaron de manera excepcional antecedentes anteriores cuando aportaban información directamente relacionada con métodos de monitoreo o enfoques complementarios de interés para el estudio, evitando descartar trabajos relevantes únicamente por su antigüedad.

2.5. Filtros utilizados

Con el fin de reducir resultados ajenos al alcance de la revisión, se aplicaron filtros de fecha, idioma, tipo de publicación y pertinencia temática. En Google Scholar se utilizó el intervalo de años definido y se priorizaron coincidencias relacionadas con calidad del aire, sensores de bajo costo, calibración, IoT y monitoreo. En IEEE Xplore se restringieron los resultados por año de publicación y por tipo de contenido, considerando principalmente artículos de revista y trabajos de congresos técnicos. En SciELO se utilizaron los filtros disponibles de año e idioma. Se priorizaron documentos en inglés por la mayor disponibilidad de literatura técnica en este idioma, complementando la búsqueda con publicaciones en español para incorporar estudios latinoamericanos. Los criterios específicos utilizados para decidir la inclusión o exclusión de los documentos recuperados se presentan posteriormente en la Sección 2.7.

2.6. Eliminación de duplicados

Los registros recuperados de Google Scholar, IEEE Xplore y SciELO se organizaron en Zotero antes de realizar la selección final. La identificación de posibles duplicados se efectuó comparando, en primer lugar, el DOI de cada publicación y, cuando este identificador no estaba disponible, el título del documento, los autores, el año de publicación y la fuente. La herramienta de detección de duplicados de Zotero se utilizó como apoyo y posteriormente se realizó una verificación manual para evitar eliminar documentos diferentes con títulos similares. Cuando el mismo trabajo aparecía en más de un buscador se conservó un único registro, dando preferencia a la versión publicada por la revista, el congreso o la editorial correspondiente. Este procedimiento permitió evitar la contabilización repetida de un mismo estudio dentro del conjunto utilizado para la revisión.

2.7. Criterios de Inclusión y Exclusión

Criterios de inclusión:

- **Artículos de sistemas basados en IoT:** Se seleccionaron artículos que estaban centrados en el Internet de las Cosas (IoT) como base para el monitoreo de contaminantes atmosféricos, aprovechando las capacidades de interconexión

y recopilación de datos que ofrece esta tecnología.

- **Metodología clara del sistema de monitoreo:** Se priorizaron los artículos que presentaban una metodología clara y detallada sobre el diseño, implementación y funcionamiento de los sistemas de monitoreo de calidad del aire.
- **Publicaciones recientes:** Se priorizaron artículos publicados entre 2017 y 2024 para garantizar la inclusión de investigaciones recientes y relevantes en el campo. De manera excepcional, se conservaron antecedentes anteriores cuando aportaban información directamente relacionada con los métodos de monitoreo o enfoques complementarios analizados.
- **Funcionamiento de los sensores:** Se incluyeron artículos que proporcionaban información detallada sobre el funcionamiento de los sensores utilizados en el monitoreo de contaminantes atmosféricos, incluyendo aspectos como principios de detección, características técnicas y calibración.

Criterios de exclusión:

- **Tipos de sensores no detallados o no disponibles en el mercado:** Se excluyeron artículos que no detallaban los tipos de sensores utilizados en el estudio o que presentaban sensores no disponibles comercialmente, garantizando así la relevancia y aplicabilidad práctica de los resultados.
- **Trabajos tipo tesis o estudios secundarios:** Se descartaron tesis académicas o estudios secundarios que no cumplían con los estándares de rigor científico requeridos para la revisión literaria.
- **Artículos sobre interior de edificios:** Se excluyeron estudios que se centraban exclusivamente en la calidad del aire interior de edificios, ya que el enfoque de esta revisión se limitaba al monitoreo de contaminantes atmosféricos en entornos exteriores.
- **Artículos duplicados:** Se eliminaron duplicados para evitar la redundancia en la selección de artículos.

2.8. Selección de Estudios

Se hizo un análisis comparativo para cada sección de la revisión literaria, para poder determinar cuáles eran las mejores opciones de cada uno. Para analizar los sensores, se realizó un análisis exhaustivo de las características más esenciales de los sensores. Exploramos en profundidad aspectos como la precisión de los sensores en diferentes condiciones de operación, incluyendo la humedad relativa y la temperatura óptimas. Además, se abordó detalladamente el tiempo de vida esperado de los sensores y cómo su precisión puede decaer gradualmente con el paso del tiempo, lo cual es crucial para una implementación a largo plazo en proyectos de monitoreo ambiental.

Para el análisis de estaciones monitoreo, se buscaron artículos en los cuales los autores hayan implementado sistemas de monitoreo utilizando varios sensores para medir diferentes contaminantes. La complejidad de estos sistemas varía según la cantidad de nodos utilizados, en función de los objetivos específicos de cada autor en la realización de su sistema de monitoreo ambiental.

Para el estudio sobre redes de comunicación, se tomaron en gran consideración los métodos más utilizados por los autores. Se destaca la tecnología LoRaWAN y sus variantes, debido a su amplio alcance y bajo consumo energético, lo que la convierte en una opción viable para el proyecto. Varios autores proponen la implementación de sistemas intermedios entre el emisor y el receptor para optimizar la transferencia de datos y garantizar la velocidad necesaria para el funcionamiento eficiente del proyecto, ajustándose a su complejidad. Para este propósito, se empleó la metodología PRISMA. A continuación, en la Figura 2 se presenta la metodología utilizada en nuestro trabajo.

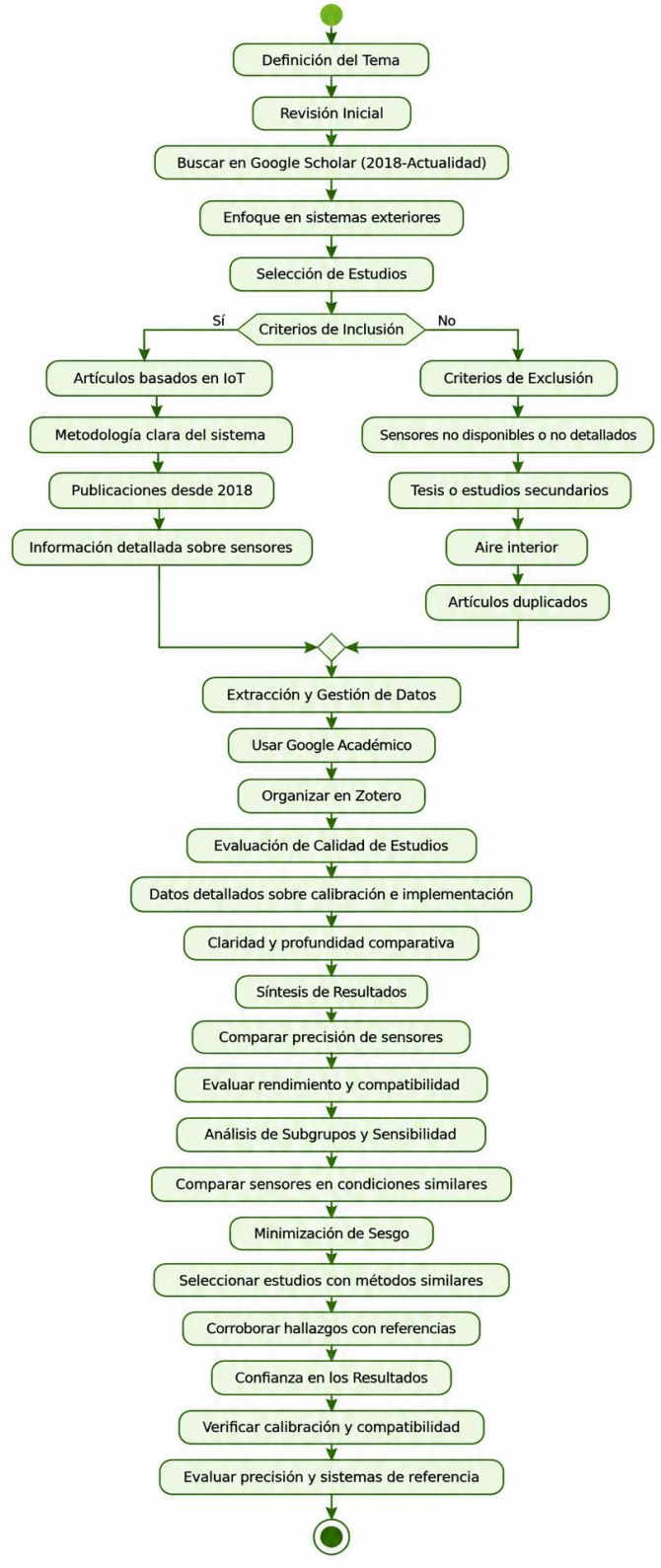


Figura 2. Diagrama de flujo PRISMA para la revisión Sistemática.

2.9. Síntesis y extracción de datos

En el proceso de extracción de datos, se abordaron las preguntas de investigación planteadas (PI1-PI5) para proporcionar una comprensión completa del estado actual de las tecnologías utilizadas para el monitoreo de la calidad del aire. La información extraída incluyó:

1. Métodos utilizados por los sensores de bajo costo (PI1): Se revisaron artículos relacionados con los sensores de bajo costo empleados en la medición de la calidad del aire. Los estudios destacaron diferentes principios de medición, como métodos ópticos, electroquímicos y basados en semiconductores [4], [5], [6], [7], [8]. También se identificaron aplicaciones específicas para la detección de contaminantes como material particulado (PM2.5 y PM10) y gases como CO2, NO2 y O3. Asimismo, se resaltaron diseños enfocados en la reducción de costos, sin sacrificar aspectos fundamentales como la precisión y sensibilidad de los sensores.

2. Métodos de calibración utilizados (PI2): En cuanto a los métodos de calibración, se observó que los estudios priorizan estrategias precisas para mejorar la exactitud de los sensores como la calibración en entornos controlados antes de la implementación en campo [4], [5], [8], [9]. También se resaltó los ajustes personalizados en función de condiciones locales como temperatura y humedad [10] y el uso de herramientas de calibración basadas en la nube para análisis y ajustes remotos [10] .

3. Protección de los sensores en el medio ambiente (PI3): La revisión abordó los métodos propuestos para garantizar la durabilidad de los sensores bajo condiciones ambientales adversas, destacando el uso de recubrimientos resistentes al agua y a la corrosión para evitar daños en entornos extremos [5], [6]. De igual manera se destacaron las cápsulas protectoras diseñadas para preservar la funcionalidad, sin comprometer la precisión de los datos obtenidos [5]. En particular, el estudio [21] describe una carcasa fabricada mediante impresión 3D, con cubierta para limitar el ingreso de lluvia, aberturas para permitir el flujo de aire y espacio para incorporar ventilación forzada. Estos elementos buscan proteger los componentes electrónicos y permitir la toma de muestras del aire exterior. Sin embargo, las

simulaciones térmicas y de circulación de aire no sustituyen la verificación experimental de posibles efectos de la carcasa sobre las mediciones.

4. Requisitos de uso y tiempo de vida aproximado (PI4): Los estudios revisados muestran que la vida útil de los sensores de bajo costo depende de la tecnología de detección, el modelo y las condiciones de operación. En [12] se señala una vida de servicio aproximada de 1 a 3 años para los sensores considerados en su estudio. Sin embargo, otros trabajos muestran diferencias entre modelos y tecnologías, por lo que no es posible establecer un único rango aplicable a todos los sensores. Además, factores como las condiciones ambientales, el envejecimiento, el mantenimiento y la necesidad de recalibración pueden influir en su desempeño durante períodos prolongados [1], [2], [3], [12].

5. Métodos de comunicación utilizados (PI5): Se recopilaron datos sobre los métodos de comunicación empleados para la transmisión de datos, resaltando tecnologías como Wi-Fi, Bluetooth y LoRa, dependiendo de los requerimientos de alcance y eficiencia energética [13], [14], [15], [16], [17], [18] . También la implementación de sistemas basados en Internet de las Cosas (IoT), que facilitan el monitoreo en tiempo real y el análisis remoto de datos [10], [13], [14], [20] y redes inalámbricas específicas para el monitoreo continuo de contaminantes del aire [13].

Para complementar la identificación de estas limitaciones, se empleó una matriz de evaluación de la calidad metodológica adaptada a partir de la herramienta QATSDD (Quality Assessment Tool for Studies with Diverse Designs), considerando la diversidad de los trabajos incluidos, como evaluaciones experimentales, pruebas de campo, sistemas IoT y estudios de calibración. En lugar de aplicar los criterios originales del instrumento en su totalidad, se valoraron seis aspectos relevantes para esta revisión: muestra y selección, procedimiento y calibración, validez y referencia, condiciones ambientales, reproducibilidad y análisis, y limitaciones y sesgo. Cada criterio se calificó de 0 a 3 puntos (0: no abordado; 1: abordado mínimamente; 2: abordado parcialmente; 3: desarrollado completamente), con un máximo de 18 puntos por estudio. El porcentaje de la Tabla 1 corresponde al puntaje obtenido dividido entre 18 y multiplicado por 100. Los resultados reflejan esta adaptación y no deben interpretarse como puntuaciones equivalentes a una aplicación íntegra del QATSDD.

La evaluación permitió relacionar la calidad metodológica de los estudios con las principales fuentes de variabilidad identificadas en esta revisión. Los trabajos que describieron procedimientos de calibración utilizaron equipos o métodos de referencia y consideraron variables ambientales como temperatura y humedad presentaron una metodología más completa para sustentar sus resultados. Por otro lado, algunos estudios centrados principalmente en el desarrollo de

sistemas IoT o tecnologías de comunicación mostraron menor profundidad en aspectos relacionados con la validación de las mediciones, la representatividad de las pruebas y el análisis de posibles fuentes de error. De esta manera, la matriz de seis criterios adaptada del QATSDD permitió valorar de forma sistemática la calidad de los estudios incluidos y considerar sus limitaciones al momento de interpretar los resultados de la revisión.

La Tabla 1 presenta la evaluación de la calidad metodológica de los estudios seleccionados, destacando la representatividad de la muestra, los métodos de validación y las principales limitaciones identificadas.

Tabla 1. Evaluación de la calidad metodológica de los estudios seleccionados

Ref.	Estudio	Muestra y selección	Procedimiento y calibración	Validez y referencia	Condiciones ambientales	Reproducibilidad y análisis	Limitaciones y sesgo	Total /18	%
[1]	Alfano et al.	2	2	2	2	2	3	13/18	72.2
[2]	Rai et al.	2	2	2	2	2	3	13/18	72.2
[3]	Karagulian et al.	3	3	3	3	3	3	18/18	100
[4]	Nguyen et al.	2	3	3	2	3	2	15/18	83.3
[5]	Guerrón et al.	1	2	2	3	2	1	11/18	61.1
[6]	Diez et al.	1	2	1	1	2	2	9/18	50.0
[7]	Kobbekaduwa et al.	1	3	2	1	3	2	12/18	66.7
[8]	Cho y Baek	2	3	3	3	3	2	16/18	88.9
[9]	Laref et al.	2	3	3	3	3	2	16/18	88.9
[10]	Hofman et al.	1	2	2	2	3	1	11/18	61.1
[11]	Smith	1	3	2	2	2	3	13/18	72.2
[12]	Bílek et al.	3	3	3	3	3	3	18/18	100
[13]	Asadobay Sinaluisa et al.	1	2	2	1	2	2	10/18	55.6
[14]	Ochoa Duarte et al.	1	2	2	2	2	2	11/18	61.1
[15]	Khutsoane et al.	2	2	1	1	2	2	10/18	55.6
[16]	Tzortzakis et al.	1	2	1	1	2	1	8/18	44.4
[17]	Križanović et al.	3	3	3	2	3	3	17/18	94.4
[18]	Huang y Wang	1	2	2	1	2	1	9/18	50.0
[19]	Sellers y Espinoza	2	3	2	2	2	2	13/18	72.2
[20]	De León et al.	2	3	3	3	3	2	16/18	88.9
[21]	Collado et al.	3	3	3	3	3	2	17/18	94.4
[22]	Quintero et al.	2	3	3	2	3	2	15/18	83.3
[23]	Papaconstantinou et al.	3	3	3	3	3	3	18/18	100
[24]	Kaur y Kelly	3	3	3	3	3	3	18/18	100
[25]	Kotzagianni et al.	1	2	2	3	2	2	12/18	66.7
[26]	García Navarrete y Rico Soto	1	2	1	3	2	2	11/18	61.1
[27]	Han et al.	3	3	3	3	3	3	18/18	100
[28]	Candia et al.	1	2	1	1	2	1	8/18	44.4

Ref.	Estudio	Muestra y selección	Procedimiento y calibración	Validez y referencia	Condiciones ambientales	Reproducibilidad y análisis	Limitaciones y sesgo	Total /18	%
[29]	Gonzales Vargas et al.	2	3	2	2	3	2	14/18	77.8

Los resultados muestran diferencias en la calidad metodológica de los estudios seleccionados. Los trabajos [3], [12], [23], [24] y [27] presentaron las valoraciones más altas, destacándose por una mejor integración entre la selección de la muestra, los procedimientos de medición y calibración, la validación de los resultados y la consideración de las condiciones ambientales. En la representatividad de las pruebas sobresalieron [3], [12], [17], [21], [23], [24] y [27], mientras que en los criterios relacionados con calibración y validación destacaron [3], [8], [9], [12], [20], [21], [23], [24] y [27]. Asimismo, [23] y [21] resaltaron por considerar de forma específica la influencia de las condiciones ambientales.

Por otro lado, los estudios [16], [18] y [28] obtuvieron menores valoraciones debido a que se enfocaron principalmente en tecnologías de comunicación y transmisión de datos. En general, los estudios con mayor puntuación ofrecen un mayor respaldo para analizar la precisión, calibración y confiabilidad de los sensores de bajo costo.

3. Resultados y discusión

Los resultados revisados muestran que el desempeño de los sensores de bajo costo depende principalmente del tipo de contaminante, la tecnología de detección, las condiciones ambientales y el método de calibración empleado. En el caso del material particulado, los sensores basados en dispersión óptica presentan resultados favorables, aunque su desempeño varía según el tamaño y las características de las partículas. En [4] se reportaron altas correlaciones para sensores láser comerciales, destacándose el SPS30 para PM10 (R^2=0.99) y el PMS5003 para PM2.5 (R^2=0.95). Sin embargo, en [24] se observó que, durante eventos de polvo, el PMS5003 presentó un desempeño considerablemente inferior para PM10 (R^2<0.49) y una marcada subestimación de las concentraciones, mientras que el OPC-N3 alcanzó correlaciones entre R^2=0.865 y 0.937. Después de aplicar una corrección específica, el desempeño del PMS5003 mejoró, lo que indica que su precisión depende tanto del tamaño de partícula como de la calibración utilizada. Por tanto, el OPC-N3 presenta ventajas para la medición de PM10 en ambientes con presencia significativa de partículas gruesas, mientras que sensores como el PMS5003 pueden resultar adecuados para PM2.5 o para PM10 cuando se implementan correcciones apropiadas.

La estabilidad a largo plazo también difiere entre tecnologías. En [12] se observó que los sensores ópticos OPC-N3 mantuvieron un comportamiento consistente durante un periodo prolongado de operación, especialmente para concentraciones normales y elevadas de PM10. En contraste, el sensor electroquímico Cairsens utilizado para NO_2 presentó una correlación más limitada con el instrumento de referencia. Estos resultados sugieren que los sensores ópticos pueden ofrecer una mayor estabilidad para el monitoreo continuo de partículas, aunque su respuesta continúa dependiendo de las propiedades del aerosol y de factores ambientales. Esta interpretación coincide con el estudio [8], que demostró que la compensación de temperatura, humedad, ruido y variabilidad entre unidades redujo considerablemente las diferencias entre sensores, obteniendo una repetibilidad inferior a 2 $\mu g/m^3$.

Para los contaminantes gaseosos, los sensores electroquímicos muestran un comportamiento más dependiente tanto del contaminante como de las condiciones ambientales. En [23] se encontró que los sensores de CO presentaron el mejor desempeño entre los dispositivos evaluados, mientras que los sensores de SO_2 mostraron errores considerablemente mayores cuando las concentraciones ambientales se encontraban próximas o por debajo de sus límites de detección. Además, el incremento de la temperatura y la disminución de la

humedad relativa produjeron mayores errores y menores correlaciones, particularmente para CO y NO_2. Esto demuestra que la selección de un sensor electroquímico no debe realizarse únicamente en función del contaminante objetivo, sino también considerando las condiciones climáticas del lugar de instalación.

Los resultados también evidencian que la calibración constituye uno de los factores más determinantes para mejorar el desempeño de los sensores electroquímicos. En [9] se redujo el RMSE de la estimación de NO_2 de 6.34 a 4.71 µg/m³ y el de O_3 de 8.76 a 6.89 µg/m³ mediante regresión PLS incorporando las respuestas de los sensores, la temperatura y la humedad. De manera similar, en [27] se encontró que los métodos Random Forest y LSTM mejoraron considerablemente las estimaciones de NO_2, O_3 y SO_2 en comparación con las regresiones lineales, mientras que para CO las mejoras fueron menores debido a que este contaminante ya presentaba una buena respuesta mediante calibración lineal. En consecuencia, los métodos de aprendizaje automático muestran mayores ventajas cuando existen relaciones no lineales, interferencias entre gases o una influencia significativa de las variables ambientales, mientras que para sensores con respuestas más lineales pueden no ser necesarios modelos de elevada complejidad.

Al considerar conjuntamente estos resultados y la evaluación de calidad metodológica presentada en la Tabla 1, las conclusiones anteriores encuentran mayor respaldo en los estudios [12], [23], [24] y [27], que obtuvieron las puntuaciones metodológicas más altas y realizaron evaluaciones prolongadas o comparaciones directas con instrumentos de referencia. En este sentido, la evidencia disponible no permite identificar una única tecnología como superior para todas las aplicaciones. Los sensores ópticos presentan resultados especialmente favorables para material particulado cuando son seleccionados y calibrados de acuerdo con el rango de partículas de interés, mientras que los sensores electroquímicos constituyen una alternativa viable para contaminantes gaseosos siempre que se consideren la temperatura, la humedad, las interferencias cruzadas y los límites de detección. La calibración, particularmente cuando incorpora variables ambientales y modelos multivariables o de aprendizaje automático, constituye el principal elemento común para mejorar la confiabilidad de ambas tecnologías.

Desde el punto de vista de implementación, los sistemas IoT permiten complementar estas tecnologías mediante transmisión y visualización remota de las mediciones. Sin embargo, los resultados relacionados con protocolos de comunicación no deben interpretarse como evidencia directa de una mayor precisión en la medición de contaminantes. En este aspecto, trabajos como [21] aportan principalmente evidencia sobre la viabilidad de integrar sensores, adquisición de datos y carcasas protectoras para operación en ambientes tropicales. Por ello, la selección final de una plataforma de monitoreo debe considerar de manera conjunta la precisión requerida, el contaminante objetivo, las condiciones ambientales, la estrategia de calibración, la protección física y las necesidades de comunicación del sistema.

La protección física constituye otro aspecto esencial para la operación de sensores en exteriores. En [21] se diseñó en SolidWorks una carcasa para ambientes tropicales que se fabricó mediante impresión 3D con PLA, incorporando una cubierta para reducir la entrada de agua, aberturas para la circulación del aire y un espacio destinado a un ventilador. Su propuesta considera la exposición a lluvia, radiación solar, polvo y humedad, factores que pueden afectar los componentes electrónicos. Sin embargo, proteger el dispositivo no garantiza por sí solo mediciones confiables: un flujo de aire insuficiente o un calentamiento interno podrían alterar el muestreo. Por ello, las simulaciones térmicas y de flujo del diseño deben complementarse con comprobaciones de funcionamiento y comparación con equipos de referencia, especialmente en instalaciones prolongadas.

La viabilidad de estos sistemas debe valorarse más allá del costo inicial de los sensores. En [21] se reportó un costo de hardware de aproximadamente 400 a 450 USD para su estación de monitoreo, cifra que corresponde a los componentes del sistema y no representa por sí sola el costo completo de operación a largo plazo. A esta

inversión deben añadirse aspectos como el mantenimiento de las carcasas, la recalibración, la alimentación eléctrica, la conectividad y el reemplazo de sensores. En este sentido, en [12] se examinó el desempeño durante un año de operación continua, mientras que en [23] se identificaron pérdidas de desempeño de ciertos sensores electroquímicos bajo temperaturas elevadas y humedades relativas reducidas. Por tanto, la viabilidad técnica y económica depende de la estabilidad de las mediciones y de los recursos necesarios para conservarlas durante la vida útil del sistema.

En cuanto a las aplicaciones, los sistemas de bajo costo pueden atender objetivos distintos según el contaminante y las condiciones del sitio. En [22] se desarrolló un prototipo IoT con el sensor Nova PM SDS011 para registrar $PM_{2.5}$ y PM_{10} en las proximidades de un vertedero a cielo abierto en Chitré, Panamá, y transmitir los datos a una plataforma de visualización. Por su parte, en [21] se integraron sensores de gases, material particulado y variables meteorológicas en una estación orientada a ambientes tropicales. En [24] se evaluó un escenario diferente: eventos de polvo, en los que el OPC-N3 presentó mejores resultados para PM_{10} que el PMS5003 sin corrección. Estas diferencias muestran que una plataforma adecuada para el seguimiento local de partículas no necesariamente es la mejor opción para todas las concentraciones o contaminantes. Su uso como complemento de la vigilancia ambiental requiere especificar el objetivo de medición y validar el sistema en condiciones representativas.

La Tabla 2 presenta una selección de estudios representativos de la revisión, destacando los métodos, entornos de evaluación y resultados obtenidos en cada estudio. Los resultados abarcan una amplia gama de dispositivos y entornos de evaluación, destacando la diversidad de métodos empleados en la investigación. Se observa evidencia de un creciente interés en el desarrollo y validación de sistemas de monitoreo de calidad del aire basados en sensores de bajo costo, destacando su potencial para ampliar la cobertura de vigilancia ambiental, especialmente en entornos urbanos. Los estudios revisados muestran una evolución progresiva en la precisión y confiabilidad de estos sensores, siendo común la necesidad de procesos de calibración, tanto en laboratorio como en campo, para reducir errores sistemáticos y mejorar la correlación con equipos de referencia. Diversos enfoques de validación han sido empleados, desde comparaciones directas con estaciones certificadas hasta la aplicación de modelos estadísticos y de inteligencia artificial, como redes neuronales, que han demostrado una mejora sustancial en la exactitud de las mediciones. Sin embargo, persisten limitaciones asociadas a la detección de partículas finas, interferencias por contaminantes complejos, y variabilidad del desempeño en condiciones climáticas extremas. Adicionalmente, se han explorado soluciones innovadoras como la calibración en la nube, el uso de líquenes como bioindicadores, y estrategias participativas mediante ciencia ciudadana, lo que refleja una tendencia hacia sistemas híbridos que integran tecnologías digitales y enfoques colaborativos para una evaluación más robusta de la calidad del aire.

Tabla 2. Descripción general de los artículos seleccionados

Año	Referencia	Evaluación de la Calidad del Aire	Método de Validación	Resultado
2017	[2]	Sensores de bajo costo para monitoreo de contaminación del aire	Análisis estadístico de precisión: Comparación de datos de sensores con mediciones de estaciones de referencia.	Los sensores de bajo costo no detectaron partículas menores de 3 µm, pero el análisis estadístico permitió filtrar errores y mejorar la precisión de las lecturas de los sensores.
2018	[14]	Sistema IoT para la medición de la calidad del aire	Se evaluó el funcionamiento de un prototipo IoT que integra sensores ambientales mediante Arduino, Raspberry Pi, Wi-Fi y MQTT para adquirir, almacenar y visualizar mediciones. El artículo no documenta una comparación metrológica con medidores comerciales de referencia.	La propuesta permite integrar sensores de diferentes fabricantes mediante herramientas de código abierto, a diferencia de sistemas comerciales de plataforma cerrada. La ventaja económica se relaciona con el uso de hardware accesible y software libre, pero no se cuantifica el costo total ni el ahorro frente a equipos comerciales.
2019	[3]	Desempeño de sensores de bajo costo para monitoreo de calidad del aire	Comparación de desempeño con medidores de alta precisión: Validación a través de la comparación de lecturas obtenidas por sensores de bajo costo con medidores de alta gama.	Los sensores de bajo costo tuvieron un desempeño aceptable, aunque la precisión fue inferior a la de los medidores de referencia. Esto sugiere que se necesita mejorar la calibración.
2018	[6]	Estación experimental para monitoreo de calidad del aire	Comparación con mediciones de estaciones certificadas: Validación del desempeño de los sensores mediante comparación con	Aunque los sensores de bajo costo mostraron un rendimiento prometedor, las diferencias en precisión con los

			estaciones fijas y de referencia.	medidores de referencia subrayan la necesidad de calibración para optimizar resultados.
2020	[26]	Sensores de bajo costo para monitoreo de calidad del aire	Se revisaron las características de sensores de bajo costo y los límites de calidad del aire establecidos en México mediante normas oficiales, como la NOM-020-SSA1-2014 para O_3 y la NOM-025-SSA1-2014 para $PM_{2.5}$ y PM_{10}. No se describe una calibración experimental propia con patrones nacionales.	El estudio considera contaminantes atmosféricos como O_3, CO, SO_2, NO_2, $PM_{2.5}$ y PM_{10}, así como la influencia de las condiciones ambientales. Las normas mexicanas citadas establecen criterios de calidad del aire, no una certificación específica de sensores de bajo costo; tampoco se cuantifican interferencias de mezclas de contaminantes urbanos.
2018	[28]	Sistema LoRaWAN para monitoreo de calidad del aire	Validación mediante comparación con otros sistemas: Comparación del desempeño con otros sistemas de monitoreo de calidad del aire en entornos urbanos y rurales.	El sistema LoRaWAN funcionó adecuadamente en la transmisión de datos a larga distancia, pero mostró limitaciones en la cobertura en zonas con obstrucciones físicas, como edificios altos.
2021	[27]	Calibración de sensores de contaminación para gases	Validación mediante modelos matemáticos (regresión lineal y redes neuronales): Ajuste de las lecturas de los sensores para mejorar la precisión en gases como CO, NO_2 y O_3.	Las redes neuronales ofrecieron una mejora significativa en la precisión, superando el rendimiento de la regresión lineal, especialmente en condiciones de alta contaminación.
2020	[10]	Mapeo de calidad del aire en ciudades IoT	Calibración en la nube y análisis de datos:	La calibración en la nube mejoró

			Validación mediante calibración de datos en la nube y la inferencia a partir de la información recopilada de sensores distribuidos en la ciudad.	significativamente la precisión de los sensores, lo que permitió obtener resultados más confiables y representativos del aire urbano en tiempo real.
2021	[4]	Evaluación de sensores de bajo costo para monitoreo de calidad del aire	Se compararon los sensores láser PMS5003, SPS30 y SM-UART-04L con un contador Met One Aerocet 531s en una sala limpia ISO 5, a temperaturas de 15 a 30 °C y humedades relativas de 50 a 85 %. Se generaron partículas con humo de cigarrillo y se registraron lecturas cada 60 segundos; no se especifica la duración total de los ensayos.	El SPS30 alcanzó una correlación de R^2 = 0.99 para PM_{10} y el PMS5003 de R^2 = 0.95 para $PM_{2.5}$. El desempeño dependió del tamaño y la concentración de las partículas, por lo que los autores analizaron métodos de calibración frente al instrumento de referencia.
2020	[1]	Revisión de sensores de bajo costo para monitoreo de calidad del aire	Revisión de 50 modelos de sensores de material particulado y de estudios de laboratorio y campo. Las pruebas controladas descritas en la literatura utilizaron cámaras de aerosoles con concentración de partículas, temperatura y humedad reguladas, además de generadores de partículas y medidores de referencia; no fueron todas experimentos propios de los autores.	Los estudios revisados reportaron correlaciones de hasta R^2 = 0.99 bajo condiciones favorables y con calibración adecuada. En ausencia de calibración frente a un equipo de referencia en el ambiente de operación, se encontraron correlaciones inferiores a R^2 = 0.5.

2020	[13]	Red inalámbrica para monitoreo en línea de contaminantes	Se simuló una red inalámbrica Zigbee con Riverbed Modeler 17.5 PL7 durante 60 minutos, comparando las topologías en malla y estrella mediante retardo, carga y tasa efectiva de transmisión de datos. También se analizaron configuraciones con 10, 20 y 30 nodos.	La topología en malla alcanzó cerca de 30 000 bit/s de tasa efectiva, frente a 21 000 bit/s para la topología estrella; además, se estimó una capacidad de hasta 120 nodos. Las pruebas de medición mostraron errores diferentes según el contaminante, de modo que no fue inferior al 5 % en todos los casos.
2016	[29]	Aplicabilidad de líquenes como bioindicadores de calidad del aire	Correlación con contaminantes en el aire: Validación mediante el análisis de muestras de líquenes y su relación con los niveles de contaminantes en diferentes puntos de la ciudad.	Los líquenes mostraron una alta correlación con las concentraciones de NO_2 y PM10, lo que los convierte en un indicador eficaz para monitorear la calidad del aire en áreas urbanas.
2023	[23]	Evaluación de sensores electroquímicos en condiciones extremas	Se evaluaron durante aproximadamente un año sensores electroquímicos Alphasense y Winsen para CO, NO_2, O_3 y SO_2, junto a instrumentos de referencia en Nicosia, Chipre. La temperatura varió entre −0.4 y 42.4 °C y la humedad relativa entre 2.8 y 96.8 %.	La exposición a temperaturas superiores a 40 °C y humedades inferiores al 10 % aumentó los errores y redujo la correlación de algunos sensores; también se observaron indicios de deterioro persistente.
2023	[24]	Evaluación de sensores en eventos de polvo	Evaluación en campo durante aproximadamente un mes y cinco eventos de polvo en el Valle de Salt Lake, Utah, comparando las	El OPC-N3 presentó mejores correlaciones para PM_{10} (R^2 = 0.865–0.937), mientras que el PMS5003 sin corrección mostró R^2

			mediciones de PM_{10} del OPC-N3 y del PMS5003 con un monitor de referencia FEM y un espectrómetro GRIMM.	< 0.49 y subestimó las concentraciones durante los eventos de polvo. La corrección mediante la relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ mejoró las estimaciones del PMS5003.
2023	[25]	Estrategias de calibración en ciencia ciudadana	Validación mediante proyectos de ciencia ciudadana: Comparación de sensores de bajo costo con equipos de referencia en proyectos de monitoreo de la calidad del aire gestionados por ciudadanos.	Las estrategias de calibración implementadas mejoraron la precisión de los sensores, lo que permitió obtener datos más confiables y representativos de la calidad del aire en áreas urbanas.
2024	[5]	Diseño de un sistema de monitoreo de contaminación basado en un nodo sensor de bajo costo	Se presentó el diseño de un nodo de monitoreo de bajo costo basado en sensores electroquímicos Alphasense para contaminantes gaseosos, considerando la influencia de la temperatura y la humedad relativa sobre su respuesta.	El diseño plantea una alternativa de monitoreo mediante sensores de bajo costo. Sin embargo, la información disponible no permite establecer un precio por nodo, un presupuesto total ni un porcentaje de ahorro frente a medidores comerciales, por lo que no se atribuye una cifra económica específica.

4. Conclusiones

El análisis realizado en este estudio subraya el potencial de los sistemas de monitoreo de contaminación del aire de bajo costo como una herramienta accesible y económica para enfrentar los desafíos globales de calidad del aire. Los hallazgos destacan que, aunque estas tecnologías ofrecen una solución viable para ampliar la cobertura de monitoreo, enfrentan limitaciones significativas en términos de precisión y durabilidad debido a factores como las condiciones ambientales variables y la calidad de los sensores.

Uno de los aspectos clave identificados es que estos dispositivos requieren calibraciones frecuentes y mantenimiento debido a la influencia de factores ambientales como temperatura y humedad. Para solventar esto, se proponen técnicas avanzadas de calibración para mejorar la fiabilidad de las mediciones. El uso de algoritmos de aprendizaje automático y la integración de plataformas basadas en la nube han

demostrado ser métodos efectivos para ajustar los datos de los sensores y mitigar los efectos de las variaciones ambientales. Sin embargo, estas estrategias requieren recursos tecnológicos y conocimiento especializado, lo que podría limitar su implementación en áreas con infraestructura tecnológica deficiente.

Otro hallazgo significativo es el papel de las tecnologías de comunicación, como LoRaWAN, Wi-Fi y Zigbee, que facilitan la recopilación y transmisión de datos en tiempo real. Estas tecnologías han demostrado ser adecuadas para entornos urbanos y rurales, aunque los desafíos relacionados con la escalabilidad y la eficiencia energética aún deben ser abordados para garantizar una operación sostenida en redes densas.

En términos de aplicabilidad, las carcasas protectoras constituyen un componente importante para reducir la exposición de los sensores a lluvia, polvo y otras condiciones ambientales adversas. El sistema propuesto en [21] muestra cómo integrar protección física y ventilación en una estación destinada a ambientes tropicales. No obstante, la protección debe evaluarse junto con la circulación de aire y la calidad de las mediciones para comprobar que no introduzca errores adicionales durante el funcionamiento.

En resumen, los sistemas de monitoreo de contaminación del aire de bajo costo representan una herramienta prometedora para democratizar el acceso a datos de calidad del aire. Su implementación en redes de ciencia ciudadana y proyectos basados en IoT tiene el potencial de transformar la vigilancia ambiental a nivel local y global. Sin embargo, para maximizar su impacto, es esencial abordar las limitaciones actuales mediante el desarrollo de metodologías de calibración más robustas, la optimización de diseños de hardware, y la mejora de las capacidades de comunicación en redes complejas. En consecuencia, la evaluación debe relacionar el desempeño con el contaminante y las condiciones de medición; la viabilidad debe incluir los costos, el mantenimiento y la durabilidad; y las aplicaciones deben definirse según las necesidades de cada entorno y las exigencias de validación.

Estos hallazgos refuerzan la importancia de invertir en investigación interdisciplinaria que combine avances en sensores, inteligencia artificial y tecnologías de comunicación para desarrollar soluciones sostenibles y escalables en el monitoreo de calidad del aire. A largo plazo, estas innovaciones podrían no solo mejorar la calidad de los datos disponibles, sino también informar políticas públicas más efectivas para mitigar los efectos de la contaminación atmosférica.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

A continuación, se especifica la contribución de cada autor: Investigación, G.S., F.G y E.C.; Conceptualización, G.S., F.G y E.C. Revisión sistemática, G.S. , F.G y E.C. Preparación y corrección del artículo, G.S. , F.G y E.C. Supervisión, G.S. , F.G. y E.C. Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

Referencias

[1] B. Alfano et al., “A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers’ Perspectives,” *Sensors*, vol. 20, no. 23, art. 6819, 2020, doi: 10.3390/s20236819.

[2] A. C. Rai et al., “End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring,” *Science of the Total Environment*, vols. 607-608, pp. 691-705, 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.266.

[3] F. Karagulian et al., “Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring,” *Atmosphere*, vol. 10, no. 9, art. 506, 2019, doi: 10.3390/atmos10090506.

[4] N. H. Nguyen, H. X. Nguyen, T. T. B. Le, and C. D. Vu, “Evaluating Low-Cost Commercially Available Sensors for Air Quality Monitoring and Application of Sensor Calibration Methods for Improving Accuracy,” *Open Journal of Air Pollution*, vol. 10, no. 1, 2021, doi: 10.4236/ojap.2021.101001.

[5] R.-A. Guerrón et al., “Design of an Air Pollution Monitoring System Based on a Low-Cost Sensor Node,” in *2024 IEEE International Workshop on Metrology for Living Environment (MetroLivEnv)*, pp. 384-389, 2024, doi: 10.1109/MetroLivEnv60384.2024.10615537.

[6] S. Diez, E. J. Guizzo, T. Fichetti, and J. Britch, “Allin-Wayra: Una estación experimental para el monitoreo continuo de la calidad del aire empleando sensores de bajo costo,” *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 5, supl. 2, pp. 45-49, 2018.

[7] N. Kobbekaduwa, P. Oruthota, and W. R. de Mel, “Calibration and Implementation of Heat Cycle Requirement of MQ-7 Semiconductor Sensor for Detection of Carbon Monoxide Concentrations,” *Advances in Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 377-392, 2021, doi: 10.31357/ait.v1i2.5068.

[8] H. Cho and Y. Baek, “Practical Particulate Matter Sensing and Accurate Calibration System Using Low-Cost Commercial Sensors,” *Sensors*, vol. 21, no. 18, art. 6162, 2021, doi: 10.3390/s21186162.

[9] R. Laref, E. Losson, A. Sava, and M. Siadat, “Field Nitrogen Dioxide and Ozone Monitoring Using Electrochemical Sensors with Partial Least Squares Regression,” *Chemistry Proceedings*, vol. 5, no. 1, art. 61, 2021, doi: 10.3390/CSAC2021-10622.

[10] J. Hofman et al., “Mapping Air Quality in IoT Cities: Cloud Calibration and Air Quality Inference of Sensor Data,” in *2020 IEEE SENSORS*, pp. 1-4, 2020, doi: 10.1109/SENSORS47125.2020.9278941.

[11] R. J. Smith, “Test and Calibrate DHT22 / AM2302 / RHT03 Hygrometers,” [Online]. Available: https://www.kandrsmith.org/RJS/Misc/Hygrometers/calib_dht22.html. [Accessed: Oct. 3, 2026].

[12] J. Bílek, O. Bílek, P. Maršolek, and P. Buček, “Ambient Air Quality Measurement with Low-Cost Optical and Electrochemical Sensors: An Evaluation of Continuous Year-Long Operation,” *Environments*, vol. 8, no. 11, art. 114, 2021, doi: 10.3390/environments8110114.

[13] M. I. Asadobay Sinaluisa, A. Paca Aucancela, J. Guerra Salazar, J. Morales Gordon, and J. R. Santillán Castillo, “Propuesta de una red inalámbrica para supervisión en línea de contaminantes del aire,” *Revista Telemática*, vol. 19, no. 1, pp. 32-47, 2020.

[14] A. Ochoa Duarte, L. D. Cangrejo Aljure, and T. Delgado, “Alternativa Open Source en la implementación de un sistema IoT para la medición de la calidad del aire,” *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, vol. 12, no. 1, pp. 189-204, 2018.

[15] O. Khutsoane, B. Isong, and A. M. Abu-Mahfouz, “IoT Devices and Applications Based on LoRa/LoRaWAN,” in *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 6107-6112, 2017, doi: 10.1109/IECON.2017.8217061.

[16] K. Tzortzakis, K. Papafotis, and P. P. Sotiriadis, “Wireless Self Powered Environmental Monitoring System for Smart Cities Based on LoRa,” in *2017 Panhellenic Conference on Electronics and Telecommunications (PACET)*, pp. 1-4, 2017, doi: 10.1109/PACET.2017.8259970.

[17] V. Križanović, K. Grgić, J. Spišić, and D. Žagar, “An Advanced Energy-Efficient Environmental Monitoring in Precision Agriculture Using LoRa-Based Wireless Sensor Networks,” *Sensors*, vol. 23, no. 14, art. 6332, 2023, doi: 10.3390/s23146332.

[18] C.-J. Huang and K. Wang, “An Experimental Study of LoRa Transmission Parameter Selection in Various Circumstances,” in *2021 IEEE 4th International Conference on Knowledge Innovation and Invention (ICKII)*, pp. 14-19, 2021.

[19] C. Sellers and C. Espinoza, “Publicación de contaminantes atmosféricos de la estación de monitoreo de la ciudad de Cuenca, utilizando servicios estándares OGC,” *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, vol. 9, no. 1, pp. 94-103, 2017, doi: 10.18272/aci.v9i15.300.

[20] O. De León, B. Cedeño, E. Collado, Y. Sáez, and F. Canto, “Diseño de un Sistema Basado en Internet de las Cosas para Monitoreo de Contaminantes de Aire,” in *19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, 2021, doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.160.

[21] E. Collado et al., “Open-source Internet of Things (IoT)-based air pollution monitoring system with protective case for tropical environments,” *HardwareX*, vol. 19, art. e00560, 2024, doi: 10.1016/j.ohx.2024.e00560.

[22] E. Quintero, J. González, F. García, Y. Sáez, and E. Collado, “IoT-based system prototype for particulate matter monitoring in the city of Chitre, Panama,” in *21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, Buenos Aires, Argentina, 2023, doi: 10.18687/LACCEI2023.1.1.847.

[23] R. Papaconstantinou et al., “Field evaluation of low-cost electrochemical air quality gas sensors under extreme temperature and relative humidity conditions,” *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 16, pp. 3313-3329, 2023, doi: 10.5194/amt-16-3313-2023.

[24] K. Kaur and K. E. Kelly, “Performance evaluation of the Alphasense OPC-N3 and Plantower PMS5003 sensor in measuring dust events in the Salt Lake Valley, Utah,” *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 16, pp. 2455-2470, 2023, doi: 10.5194/amt-16-2455-2023.

[25] M. Kotzagianni et al., “Calibration strategies for low-cost compact field sensors in Citizen Science Air Quality measurements: Insights from SOCIO-BEE project,” in *2023 8th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, pp. 1-6, 2023, doi: 10.23919/SpliTech58164.2023.10193423.

[26] G. García Navarrete and K. G. Rico Soto, “Sensores de bajo costo para el monitoreo de calidad del aire,” *Epistemus*, vol. 13, no. 27, pp. 30-37, 2020, doi: 10.36790/epistemus.v13i27.108.

[27] P. Han et al., “Calibrations of Low-Cost Air Pollution Monitoring Sensors for CO, NO_2, O_3, and SO_2,” *Sensors*, vol. 21, no. 1, art. 256, 2021, doi: 10.3390/s21010256.

[28] A. Candia, N. S. Represa, D. S. Giuliani, M. Á. Luengo, L. A. Marrone, and A. A. Porta, “Soluciones para SmartCities: propuesta de un sistema de monitoreo de la calidad del aire basado en una red LoRaWAN con sensores portátiles,” in *I Congreso Argentino de Ciencias de la Informática y Desarrollos de Investigación (CACIDI)*, Buenos Aires, Argentina, 2018.

[29] N. Gonzales Vargas, M. Luján Pérez, G. Navarro Sánchez, and R. Flores Mercado, “Aplicabilidad de líquenes bioindicadores como herramienta de monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Cochabamba,” *Acta Nova*, vol. 7, no. 4, pp. 455-482, 2016.