

Criterios técnicos en la selección de sensores de bajo costo para el monitoreo de PM_{2.5}. Zona urbana de clima

Technical criteria in the selection of low-cost sensors for PM_{2.5} monitoring. Urban hot climate zone: Cúcuta case.

Recibido: 08 de septiembre de 2025

Aprobado: 11 de diciembre de 2025

Cómo citar: M. L. Pinzón Bedoya, A. A. Ibarra Cruz, and J. C. Rojas Vargas, "Criterios técnicos en la selección de sensores de bajo costo para el monitoreo de PM_{2.5}. Zona urbana de clima cálido: Caso Cúcuta", Mundo Fesc, vol. 16, no. 35, May. pp. 49-69 2026, doi: 10.61799/2216-0388.2096.

Martha Lucía Pinzón-Bedoya^{1*}



Doctora,
mlpinzon@unipamplona.edu.co,
0000-0002-8953-3748,
Docente Tiempo Completo, Villa del Rosario, Colombia

Andrés Alejandro Ibarra-Cruz²



Especialista,
andres.ibarra@unipamplona.edu.co,
0000-0002-5655-2168,
Docente Hora Catedra, Villa del Rosario, Colombia.

Juan Carlos Rojas-Vargas³



Doctor,
juan.rojas@unipamplona.edu.co,
0009-0006-1189-0776,
Docente Tiempo Completo, Pamplona, Colombia

***Autor para correspondencia:**

mlpinzon@unipamplona.edu.co



Criterios técnicos en la selección de sensores de bajo costo para el monitoreo de PM_{2.5}. Zona urbana de clima cálido: Caso Cúcuta

Palabras clave: Calidad del aire; Material Particulado 2,5 (PM_{2.5}); Sensores de bajo costo; Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA); USEPA.

Resumen

Los sensores de bajo costo para la medición de PM_{2.5} son herramientas que, debido a los desarrollos tecnológicos, facilidad de operación, precio y accesibilidad, están siendo utilizados para complementar las mediciones registradas por los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire en Colombia y a nivel mundial, siempre y cuando cumplan con los lineamientos propuesto por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Una parte fundamental en el uso de estos sensores, consiste en su adecuada selección, por lo cual deben tenerse en cuenta los parámetros técnicos establecidos, encontrándose un vacío en el momento de escoger el equipo a utilizar, puesto que no existe una ponderación de los parámetros para su priorización. Este trabajo se centra, en la selección de equipos analizando los criterios técnicos indicados en los lineamientos. La metodología desarrollada consistió en identificar las diferentes referencias de sensores, que utilizan el mismo principio de medición que las estaciones de referencia, mediante una exhaustiva revisión bibliográfica de literatura científica, encontrándose 22 referencias de marcas comerciales. Posteriormente, mediante un análisis comparativo de las características técnicas de cada sensor, se seleccionaron 2 referencias. Los criterios aplicados para esta selección, en orden de importancia fueron los siguientes: especificaciones técnicas completas dadas por el fabricante, rango de humedad relativa y temperatura de la zona de estudio (para este artículo se realizó un análisis climatológico con datos de 30 años, tomados del Sistema de Información para la gestión de datos Hidrológicos y Meteorológicos del IDEAM), precisión, precio, certificaciones en las mediciones y facilidad de adquisición en el territorio. Después de haber aplicado estos filtros, se encontró que, para llevar a cabo en Cúcuta un programa de monitoreo con sensores de bajo para la medición de PM_{2.5}, las referencias a usar son el Sensirion SPS30 y Plantower PMS7003.

Technical criteria in the selection of low-cost sensors for PM_{2.5} monitoring. Urban hot climate zone: Cúcuta case.

Keywords: Air Quality Monitoring System (AQMS); Air Pollution; Low-cost sensors; Particulate Matter 2.5 (PM2.5); USEPA.

Abstract

Low-cost PM_{2.5} sensors are tools that, thanks to technological advancements, ease of use, affordability, and accessibility, are being used to supplement measurements recorded by air quality monitoring systems in Colombia and around the world, provided they comply with the guidelines established by the U.S. Environmental Protection Agency. A fundamental aspect of using these sensors is their proper selection; therefore, established technical parameters must be taken into account. However, there is a gap in the process of choosing the equipment to be used, as there is no weighting of the parameters to prioritize them. This study focuses on equipment selection by analyzing the technical criteria outlined in the guidelines. The methodology developed consisted of identifying the different sensor models that use the same measurement principle as the reference stations through an exhaustive review of the scientific literature, resulting in the identification of 22 commercial brands. Subsequently, through a comparative analysis of the technical characteristics of each sensor, two models were selected. The criteria applied for this selection, in order of importance, were as follows: complete technical specifications provided by the manufacturer; the relative humidity and temperature range of the study area (for this article, a climatological analysis was conducted using 30 years of data from IDEAM's Information System for Hydrological and Meteorological Data Management); accuracy; price; measurement certifications; and ease of procurement in the region. After applying these filters, it was found that, to carry out a monitoring program in Cúcuta using low-cost sensors for PM_{2.5} measurement, the recommended models are the Sensirion SPS30 and the Plantower PMS7003.

Introduction

La contaminación del aire puede ser entendida como, la alteración y afectación del equilibrio en la mezcla de gases contenidos en la atmosfera terrestre, producto de diferentes actividades. El ser humano, en su búsqueda del desarrollo tecnológico y social, realiza acciones que, en la mayoría de los casos, son nocivas para el medio ambiente. Las causas de esta contaminación, obedecen a la quema de combustibles fósiles, deforestación, industrialización, urbanización y prácticas agrícolas, las cuales tiene un impacto directo sobre el recurso aire, debido a las emisiones de ciertos gases contaminantes [1], [2]. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) [3], define a este tipo de contaminación como la existencia en el aire de partículas pequeña o en algunos casos, productos secundarios en estado gaseoso que, pueden generar un posible riesgo o molestia para la comunidad que se encuentre expuesta a esta.

En el ámbito de la salud pública, la contaminación atmosférica se visualiza como una de las mayores amenazas para la salud de las personas [4], [5], [6]. De acuerdo con el estudio, Carga Mundial de Morbilidad 2021, realizado por el Instituto para la Medición y Evaluación de la Salud, la contaminación ambiental por partículas en el aire se encuentra dentro de los principales factores de riesgo a nivel mundial y en cada nivel del índice sociodemográfico [7].

La Política colombiana, para el mejoramiento de la calidad del aire, aprobada mediante el CONPES 3943 de 2018, contiene la definición de los contaminantes atmosféricos, como los son el material particulado que es el polvo, humo, niebla o ceniza que se encuentra presente en la atmosfera y puede estar en estado líquido o sólido. Pudiéndose encontrar, dentro de este las partículas suspendidas totales (PST), material particulado con diámetro menor a 10 micras (PM10) y material particulado con diámetro menor a 2,5 micras (PM2.5) [8].

En la literatura científica, se han reseñado diferentes afectaciones en la salud de la población, producto de la contaminación atmosférica, como salud mental [9], productividad laboral [10], cambios de comportamiento y actividades al aire libre [11] y en general, en la salud de las personas [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18].

En Colombia, las concentraciones de los contaminantes atmosféricos, son monitoreadas por las estaciones que conforman los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA), cuyos lineamientos técnicos de diseño y operación, se establecen en el "Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire", adoptado mediante la Resolución 650 del 2010 y modificado mediante Resolución 2154 de 2010. A partir de los citados lineamientos, las autoridades ambientales dentro del territorio de su competencia, han venido monitoreando la calidad del aire a través de diversos tipos de SVCA.

En el último informe publicado por el IDEAM, sobre el Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2023, destaca que, en el país operaron 23 SVCA, con un total de 209 estaciones de monitoreo divididas entre fijas (192) e indicativas (17); dependiendo estas, del tipo de SVCA, el cual está en función de la cantidad de habitantes que tiene el municipio. De igual manera, en el 2023 se registró el mayor número de estaciones de monitoreo con tecnologías automáticas; este es el caso del SVCA de la Ciudad de Cúcuta, cuyo funcionamiento es competencia, de la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR) [19]; el cual, de acuerdo a sus informes ejecutivos diarios de la calidad del aire, publicados en su portal web (<https://corponor.gov.co/web/index.php/boletin-ambiental/calidad-del-aire/>), indica que, Cúcuta contaba con SVCA, tipo tres (III), conformado por tres (3) estaciones fijas, ubicadas en los barrios El Salado, Comuneros y El Centro, que contenían un equipo muestreador manual de alto volumen (Hi-Vol) para medir concentraciones de PM10.

Producto del contrato número 81066274 de 2020 entre la Confederación Suiza, representada por el Departamento Federal de Asuntos Exteriores, actuando por medio de la Embajada Suiza en Colombia – Ayuda Humanitaria y Desarrollo, y Hill Consulting SAS-, en marzo de 2022 se publicó el documento Rediseño del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire de Cúcuta-Región [20], donde se propuso, mantener las tres estaciones fijas que componen el SVCA, detallando las características de las estaciones y parámetros a medir e incluyendo una estación de fondo rural, que permita evaluar la calidad del aire que ingresa a la ciudad. De igual manera, como recomendación, sugiere el uso de los sensores de bajo para la densificación del SVCA, previa validación de los mismos con las estaciones de referencia, para que las mediciones puedan ser integradas al sistema, especificando su proveniencia.

Los sensores para la medición de la calidad del aire, son instrumentos tecnológicos no regulatorios que tienen un costo menor, son portátiles y, en general, más fáciles de operar que los monitores utilizados con fines regulatorio. Estos suelen proporcionar mediciones de concentración de contaminantes del aire, relativamente rápidas o instantáneas y permiten medir la calidad del aire en más lugares. El término sensor, a menudo describe un conjunto integrado de hardware y software que utiliza uno o más elementos para detectar o medir concentraciones de contaminantes [21].

Debido al avance tecnológico, actualmente se han desarrollado múltiples tipos de sensores de bajo costo, de acuerdo con la European Commission, se tiene los siguientes tipos de sensores:

-Sensores electroquímicos: Como su nombre lo indica, la fundamentación de estos corresponde a una reacción química entre dos fases: gas y líquido. La fase gaseosa está representada por los contaminantes atmosféricos y la fase líquida por el electrodo del sensor. Se caracterizan por: ser sensibles a la humedad y temperatura ambiente, lo cual es función del líquido que hay dentro del electrodo del sensor y ser poco selectivos. Sin embargo, poseen un tiempo de respuesta rápido y buena sensibilidad.

- Sensores de fotoionización: ionizan los compuestos orgánicos volátiles presentes en el ambiente, mediante un detector de fotoionización. No diferencia entre los COV existentes que pueden llegar a ser ionizados por las lámparas UV. La medición de los sensores es influenciada por la temperatura y humedad, y presentan buena sensibilidad, así como de tener un tiempo de respuesta rápido.
- Contadores ópticos: usan el principio de dispersión de la luz, mediante la emisión de laser que pasa a través de una masa de aire, son usados para cuantificar el material particulado en el aire, tienen la capacidad de diferenciar el tamaño que tienen las partículas. Una de sus características es que son de respuesta rápida y tienen buena sensibilidad.
- Sensores Ópticos: La forma en que cuantifican la contaminación, es por la medición de la cantidad de luz infrarroja, sin embargo, a diferencia de los anteriores, estos, detectan gases como monóxido de carbono y dióxido de carbono. Tienen una buena sensibilidad, pero son más demorados para dar a emitir los valores de la concentración. Su medición depende de la humedad y temperatura, por lo cual se deben corregir [22].

La guía de sensores de aire mejorada (The Enhanced Air Sensor Guidebook) de la United States Environmental Protection Agency (EPA), establece que, para llevar a cabo un programa de monitoreo con sensores de bajo costo, se debe realizar la selección del sensor, en donde antes de comprarlo, se deben evaluar los criterios específicos, que ayuden a desarrollar la actividad que se quiera implementar, así, como el propósito de recopilación de datos [21]. De acuerdo con lo anterior, esta investigación aporta lineamientos para el establecimiento de criterios técnicos, para selección de sensores de bajo costo en la medición de PM2.5 en la zona urbana, como complemento de los SVCA en una ciudad de clima cálido.

Materiales y Métodos

El diseño metodológico utilizado para desarrollar esta investigación es semicuantitativo, combinando características cualitativas y cuantitativas. Para ello, se llevó a cabo una consulta en diferentes bases de datos: Springer Nature, IEEE Xplorer y Google Scholar, la cual consistió en buscar, seleccionar y analizar literatura científica nacional e internacional sobre el uso de los sensores de bajo costo en la medición de la concentración de PM2.5. Esta metodología, se basa en la evaluación sistemática y estructurada, sin requerir datos numéricos precisos o extensos, pero, teniendo en cuenta una cuantificación subjetiva, sin necesidad de aplicar métodos estadísticos, que permitan, priorizar criterios y fundamentar la toma de decisiones que soporten la selección de los sensores de bajo costo [23], [24].

Después de haber usado los motores de búsqueda en las bases de datos indicadas, como primer filtro, se tuvo en cuenta el título y abstract de los artículos, monografías, trabajos de grados, ponencias y demás estudios, en los cuales, el uso de los sensores de bajo

costo para la medición de PM_{2.5} fue el tema principal. Posteriormente, con la aplicación de esta condición, se revisaron los artículos seleccionados a profundidad para extraer información relevante de esta investigación.

Finalmente, a partir de la información anterior, se consultaron las características de los sensores de bajo costo que fueron identificados, en donde, después de haber estudiado las especificaciones técnicas se extrajo el método de medición, temperatura y humedad de operación, precisión y su valor comercial.

Debido a las variables climatológicas como la humedad relativa y temperatura, que influyen en la medición de la concentración de PM_{2.5}, en los sensores de bajo costo. Se llevó a cabo un análisis climatológico de la ciudad de Cúcuta. Para ello se consultaron los datos de estas variables en el Sistema de Información para la gestión de datos Hidrológicos y Meteorológicos del IDEAM (<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>). Con el fin de determinar los datos medios de humedad relativa y temperatura; lo anterior, se debe que algunos sensores presentan un rango de operación adecuado para estas variables.

Una vez obtenida la información anterior, se procedió a determinar cuáles son los criterios de mayor importancia y que puede llegar a influir en la compra de un sensor de bajo costo, para la medición de PM_{2.5} como complemento del SVCA.

En la figura 1, se presenta el esquema de la metodología aplicada en esta investigación.

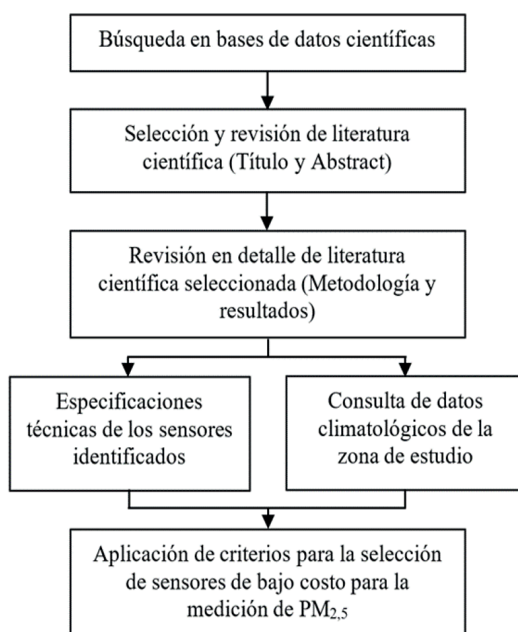


Figura 1. Esquema metodológico usado en este proyecto.

Resultados y Discusión

Producto de la revisión exploratoria inicial de la literatura científica sobre el uso de los sensores de bajo costo en la calidad del aire, en las bases de datos, se encontró una gran cantidad de resultados. Se procedió a fijar como variable el contaminante a medir, en este caso PM_{2.5}, para posteriormente revisar el título y resumen, Seleccionando las investigaciones que estuviesen alineadas con el propósito del presente trabajo.

Los resultados de la búsqueda anterior, se filtraron nuevamente, analizando que los artículos presentaran correlaciones de los datos medidos por los sensores de bajo costo, con un sistema de referencia. Además, se tuvo en cuenta el país de aplicación y calibración. A partir de esta información, se construyó la tabla No. 1, en donde se relaciona además de lo anterior, el título de la investigación y el (los) sensor (es) utilizado (s). Vale la pena resaltar que en este nuevo tamizaje se empiezan a vislumbrar investigaciones realizadas en Colombia.

Tabla 1. Resultados de la revisión bibliográfica sobre el uso de los sensores de bajo costo para la medición de PM_{2.5}.

Título	País	Sensor Usado	Correlación	Calibración
Evaluación de las concentraciones internas y externas de material particulado PM _{2.5} en dos instituciones educativas de la ciudad de Barranquilla, Atlántico [25].	Colombia	PA-II-SD (Plantower PMS5003)	R2: 0,6722 R2: 0,526 R2: 0,5231 R2: 0,5349	Estación de referencia
Evaluación del desempeño de un sensor de bajo costo para medir la calidad del aire [26].	Colombia	Temtop M2000C	R2: 0,8295	Estación de referencia RMCAB*
Evaluación de microsensors de material particulado para construir la red colaborativa de sensores de bajo costo de Bogotá [27].	Colombia	Clarity Node S PA-II-SD (PMS 5003) Davis Airlink TSI BlueSky uRAD monitor Smoogie PM (PMS 7003)	R2(Clarity): 0,76 R2(Plantower): 0,82 R2(Davis): 0,76 R2(Bluesky):0,61 R2(uRAD): 0,76	Met One BAM 1020-9800
Propuesta de bajo costo para el monitoreo de material particulado PM _{2.5} y PM ₁₀ en tiempo real en la Universidad El Bosque, Bogotá [28].	Colombia	HPMA 115s0 (Honeywell) PMS3003 PPD2NS (PPD42NJ Shinyei) SDS011 (Nova)	No cuenta con R2	Sin estación de referencia
Calibración y validación de dos equipos de bajo costo para la medición de material particulado a partir de los modelos de regresión lineal simple y multiple [29].	Colombia	2 sensores, sin información	EBC 52 R2 cercanos a 0 EBC 9 PM _{2.5} R2=0,72	Aeroqual (portatil)
Modelos para la validación del empleo de sensores de bajo costo en la medición de la calidad del aire [30].	Colombia	SEN0233	Sin información	Estación de referencia
Evaluación del desempeño de sensores de bajo costo como complemento para el monitoreo de la calidad del aire de Bogotá y como herramienta para la determinación del grado de exposición de una población caso de estudio [22].	Colombia	Clarity	2 meses R2 0,32 Kennedy R2 0,44 Ferias R2 0,44 Usaquén 4 meses R2 0,41 Kennedy R2 0,57 Ferias R2 0,59 Usaquén	Estación de referencia
Nuevos métodos de monitorización de material particulado para el estudio de la calidad del aire [31].	Colombia	Shinyei	Sin información	Estación de referencia

Monitoreo de la calidad de aire en el sur de la ciudad de Cali empleando un sensor a bajo costo [32].	Colombia	Airbeam2 (Shenyei PP-D60PV)	Entre PM2.5y PM10 del sensor R2 0,98	Estación de referencia (658 m de distancia)
Ciudadanos Científico [33]	Colombia	PPD42NS (Shinyei) SDS011 (Nova) Bjhike HK-A5	Correlación > a 0,6 y 67% de sensores correlación > a 0,8.	Estación de referencia
Caracterización y evaluación de exactitud para establecer la factibilidad del uso de sensores de bajo costo de PM2.5 y PM10 en el monitoreo de la calidad del aire en smart cities [34].	Colombia	PMSA003I (Plantower)	Chia R2=0,54 Bosa R2=0,7074	Estación de referencia
Niveles de concentración por PM2.5 mediante sensores de bajo costo. Caso de estudio: Pamplona, Colombia [35].	Colombia	SPS30 (Sensirion)	Sin información	Sin calibración
Diseño e implementación de un sistema IoT para monitorear calidad del aire [36].	Colombia	GP2Y1010AU0F (Sharp)	No se indica	No se indica
Aplicabilidad del uso de sensores electroquímicos de bajo costo como alternativa en la medición de la calidad del aire: caso PM2.5 [37].	Colombia	PMS7003 (Plantower)	R2=0,483-0,489	
		PMSA003 (Plantower)	R2=0,499-0,590	
		PMA 115SO (Honeywell)	R2=0,492-0,544	
		SPS30 (Sensirion)	R2=0,504-0,592	
		SN-GCJA5 (Panasonic)	R2=0,489-0,581	
Calibración de sensores de bajo costo para la medición de concentraciones de material particulado en interiores mediante evaluación de laboratorio/campo [38].	Corea del Sur	PMS3003 (Plantower) PMS7003 (Plantower)	R2 > 0,99	GRIMM 11-D
Evaluación del desempeño en campo de sensores PM2.5 de bajo costo para mejorar la resolución espacial del monitoreo de PM2.5: un estudio de caso en la ciudad inteligente de Sejong, Corea [39].	Corea del Sur	PM2105 (Cubic Sensor and Instrument)	Regresión lineal 0,938 y 3,962 para Areum UAQMS y 0,902 y 2,433 para Hansol UAQMS	BAM 5014i
Evaluación del rendimiento del sensor de partículas de bajo coste NOVA SDS011 en diversos microambientes [40].	Serbia	SDS011 (Nova)	R21 : 0,71 R22 : 0,68 R23 : 0,55	Estaciones de referencia
Evaluación del funcionamiento de un sensor de PM2.5 de bajo coste durante un periodo de casi cuatro meses en Oslo (Noruega) [41].	Noruega	PMS5003 (Plantower)	Coefficiente de correlación (R) 0,70, 0,81, 0,73 y 0,67.	(SASS) sampler periods & MERRA-2
Evaluación del rendimiento de sensores de PM de bajo costo en múltiples sitios de la red COALESCE [42].	India	PMS5003 (Plantower)	Coefficiente de correlación (R) 0,70, 0,81, 0,73 y 0,67.	(SASS) sampler periods & MERRA-2
Múltiples sensores de PM de bajo costo, datos de múltiples estaciones y múltiples modelos de calibración [43].	India	PMS5003 (Plantower)	R2:0,86-0,87-0,87	BAM 1022
		PMS7003 (Plantower)	R2 : 0,86	
		Sensirion	R2 : 0,87 y 0,89	
		Nova	R2 : 0,78	
		Honeywell	R2 : 0,66	
		PAS-OUT-01 (Prana)	R2 : 0,66	
		Winsen	R2: 0,63	
Desarrollo de un modelo de regresión múltiple para calibrar un sensor de bajo coste considerando medidas de referencia y parámetros meteorológicos [44].	Perú	SDS011 (Nova)	Horarias Entre sensores R2 entre 0,99 y 1 Diarias Con referencia R2 0,84-0,86	BAM 1020, TEOM 1400 y filtros Partisol 2000i
Desempeño en campo de un sensor de bajo costo en el monitoreo de material particulado en Santiago de Chile [45].	Chile	PMS1003 (Plantower)	R2 entre 0,41 a 0,95	BAM-1020 y TEOM
Aplicación experimental de un sensor de dispersión láser para estimar las PM2.5 inducidas por el tráfico en Pekín [46].	China	PMS1003 (Plantower)	R2 entre 0,41 a 0,95	BAM-1020 y TEOM

Evaluaciones de sensores de calidad del aire de bajo costo para material particulado (PM _{2.5}) en condiciones interiores y exteriores [47].	Malasia	SEN55 (Sensirion)	R2 : 0,60	TOPAS de Turnkey Instruments.
		SPS30 (Sensirion AG.)	R2 : 0,60	
		PMS5003 (Plantower)	R2 : 0,63	
		HPMA115S0 (Honeywell)	R2 : 0,71	
		ZH03B (Winsen).	R2 : 0,60	
Consideraciones prácticas para el uso de sensores de bajo costo para evaluar la exposición al humo de los incendios forestales en entornos escolares y de guarderías [48].	USA	PMS5003 (Plantower)	Últimos 10 minutos de datos (media R2 : 0,94). Últimas 3 horas (media R2:0,60)	Impactadores Harvard [HPEM].
Uso de sensores de bajo costo para evaluar fuentes comunes de contaminación del aire en múltiples residencias [49].	Inglaterra	OPC-N3 (Alphasense)	Antes de calibración Pearson r: 0.799 Después de calibración R >: 0,799 NMF, con altos valores R2 (0,983–0,999)	Instrumento de referencia TSI-3330
Viabilidad de los tipos de sensores de partículas de bajo costo en estudios de salud sobre contaminación del aire interior a largo plazo después de calibraciones repetidas, 2019-2021 [50].	USA	2 sensores Airbeam (Shinyei PPD60PV y Plantower PMS 7003)	Shinyei R2 : 0,16 Plantower R2 : 0,09	Thermo Scientific Personal DataRAM PDR-1500

RMCAB* Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá.

Tabla II. Especificaciones técnicas de los sensores de bajo costo para la medición de PM_{2.5}.

Sensor	Temperatura	Humedad relativa	Precisión	Precio comercial
PMS5003 [51]	-10 °C a 60°C	0 - 99 %	±10% (0 - 500 µg/m ³)	102124 COP
M2000c [52]	NO DATA	NO DATA	±10 µg/m ³ (0>100 µg/m ³)	629101 COP
HPMA 115s0 [53]	-20°C a 50°C	0 a 95%	±15 µm/m ³ (0 µm/m ³ a 100 µm/m ³) ±15 % (100 µm/m ³ a 1000 µm/m ³)	233321 COP
PMS3003 [54]	-10 °C a 60°C	0 a 95%	±10% (100 a 500 µg/m ³) ±10µg/m ³ (0 a 100 µg/m ³)	75621 COP
PPD2NS (PPD42NJ) [55]	NO DATA	NO DATA	NO DATA	19215 COP
SDS011 [56]	-10 a 50°C	0-70%	Máximo ±15% y ±10 µm/m ³	172000 COP
SEN0233 [57]	-20 a 90°C	0-99%	±10% (100-500µg/m ³) ±10µg/m ³ (0-100µg/m ³)	203610 COP
Clarity [58]	-10 A 55 °C	10 A 98%	R2Optimal Conditions: 0.97 Typical Conditions: > 0.7	No data
Shenyei PPD60PV-T2 [59]	0 a 45 °C	<95%	NO DATA	394721 COP
Bjhike HK-A5 [60]	-20 a 50°C	0-80%	NO DATA	NO DATA
PMSA0031 [61]	-10 a 60°C	0-99%	±10% (100 a 500 µg/m ³) ±10µg/m ³ (0 a 100 µg/m ³)	259900 COP
SPS30 [62]	-10 a 60°C	0-90%	±10% (100 a 1000 µg/m ³) ±10µg/m ³ (0 a 100 µg/m ³)	187280COP
GP2Y1010AU0F [63]	-10 a 65°C	NO DATA	NO DATA	26000COP
PMS7003 [64]	-10 a 60°C	0-99%	±10% (100 a 1000 µg/m ³) ±10µg/m ³ (0 a 100 µg/m ³)	149940COP
Panasonic SN-GCJA5 [65]	-10 a 60°C	<95%	±10% > 35µg/m ³ ±10% < 1000 µg/m ³	115736 COP
PM2105 [66]	-10 a 60°C	0-95%	±10 µg/m ³ (0-100 µg/m ³) ±10 % > 100 µg/m ³	269975COP
PAS-OUT-01 [67]	-20 a 70°C	0-99%	±10 µg/m ³ ±10 %	NO DATA
SEN55 [68]	-10 a 50°C	0-90%	±10%	299900COP
ZH03B [69]	-10 a 50°C	0-85%	±15µg/m ³ (0-100µg/m ³) ±15% (101~1000µg/m ³)	190144 COP
OPC-N3 [70]	-10 a 50°C	0-95%	NO DATA	2228429 COP

AirLink [71]	-10 a 60°C	0,1 a 100 %	±10 µg/m3	1637000 COP
Bluesky [72]	-10 a 60°C	0-95%	±10 µg/m3 (0-100µg/m3) ±10% (100-1000µg/m3)	NO DATA

De acuerdo con lo establecido anteriormente y la revisión realizada, se encontraron 22 referencias diferentes de sensores. Una vez consultadas las especificaciones técnicas de cada sensor, se evidencia que, en todo ellos, el principio de medición es dispersión de luz, el cual utiliza un haz láser focalizado para iluminar el aire de la muestra entrante, que se controla mediante un ventilador. “La luz dispersada por las partículas en la corriente de aire se recoge en un fotodiodo que convierte la intensidad de la luz en una señal eléctrica. Mediante algoritmos patentados, el sensor de partículas convierte la señal eléctrica en varias salidas de concentración de masa y número, incluso con un flujo de aire de muestra pequeño (debido al diseño miniaturizado) y un tiempo de medición corto” [73].

Adicionalmente, se tuvo en cuenta la temperatura y la humedad relativa, debido a que estas variables influyen en la medición de la concentración del contaminante, de la misma manera, la precisión en la toma de datos y el precio comercial del sensor. En la tabla 2, se presenta la información de los 22 sensores que fueron identificados en la tabla 1.

Para continuar con el desarrollo de la metodología, se determinaron los valores medios de humedad relativa y temperatura de la ciudad de Cúcuta. Estas variables, pueden ser consideradas como un criterio relevante para la selección de los sensores, porque, de acuerdo con las especificaciones técnicas, cada uno de estos, cuentan con un rango de operación adecuado. Las estaciones en donde se consultó la información, se seleccionaron de acuerdo con la cantidad de registros para estos dos parámetros, registrado en el Sistema de Información para la gestión de datos Hidrológicos y Meteorológicos del IDEAM.

De acuerdo con lo anterior, se utilizaron los datos horarios de humedad relativa del aire a 2 m, en las estaciones: Universidad Francisco de Paula Santander (16015110), con registros desde 09-2005 hasta 12-2024; Aeropuerto Camilo Daza (16015501), con datos desde 10-2015 hasta 12-2014 y Cinera Villa Olga (16025040) con valores desde 06-2017 hasta 12-2024. Producto de este análisis, se generó la figura 2, donde se presenta la humedad relativa promedio mensual multianual para la ciudad de Cúcuta.

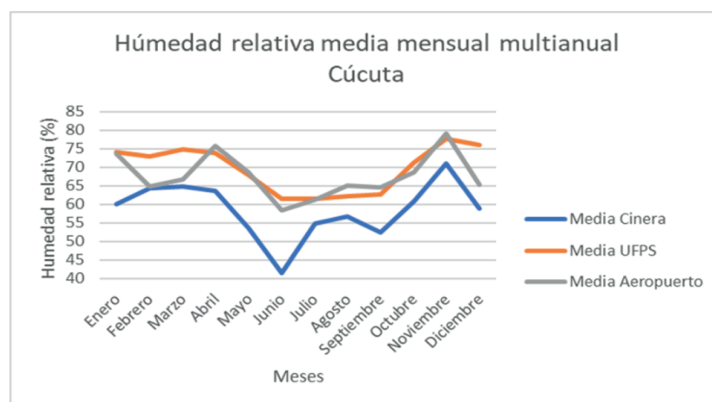


Figura 2. Humedad relativa promedio mensual multianual estaciones UFPS, Aeropuertos y Cinera.

Los datos registrados por el Sistema de Información para la gestión de datos Hidrológicos y Meteorológicos (IDEAM), exhiben que la humedad relativa media mensual varía entre 41,5 % (junio) hasta 79,3 % (noviembre), como mención importante, estos datos corresponden a valores promedio mensuales. Sin embargo, se han registrado valores superiores a 85% de humedad (marzo y diciembre, 85,2 % y 85,3 %, respectivamente).

Con relación a la temperatura, se descargó el parámetro de temperatura máxima diaria, en donde la estación seleccionada fue la denominada Carmen de Tonchalá, código 16025010, con registros desde 01-01-1996 hasta el 30-12-2024. A partir de estos datos, se generó la figura No. 3, teniendo en cuenta los datos máximos, debido a que los sensores, para su adecuado funcionamiento poseen un rango de temperatura.

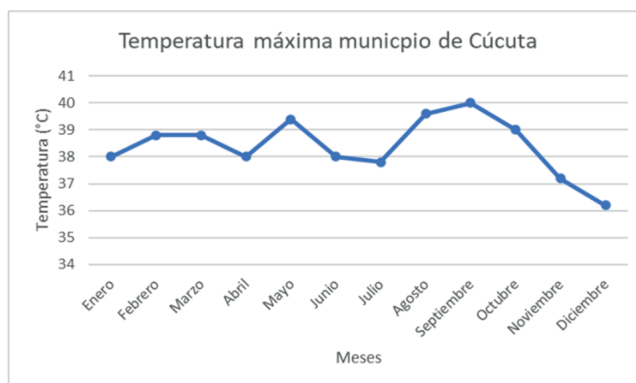


Figura 3. Temperatura máxima mensual multianual estación 16025010.

Los datos graficados, pertenecen a los valores máximos de temperatura, en donde presentan registros máximos de 40 °C en el mes de septiembre, aclarando que estos no son datos promedio.

En la tabla No. 2, hay 22 diferentes referencias de sensores que fueron identificados en la revisión de literatura científica, pero, ¿Qué sensor se debe adquirir para realizar la campaña de monitoreo que se pretende llevar a cabo en Cúcuta? La guía de sensores

de aire mejorada [22], establece los factores que se deben tener cuenta para la selección del sensor, entre los cuales están: límite y rango de medición, precisión, calibración, tiempo de respuesta, durabilidad, facilidad de uso y costo.

Los criterios establecidos por la guía no están priorizados, por lo cual, se necesita de un lineamiento que facilite la selección del sensor. Para ello, se procedió a analizar las especificaciones técnicas, de las referencias presentadas en la tabla No. 2 e ir descartando aquellos que no cumplan con las características para la zona de estudio. Inicialmente, no se tuvieron en cuenta aquellas referencias, que carecen de algún dato, estas son Temtop M2000c, Shinyei PPD2NS (PPD42NJ) y PPD60PD-T2, Clarity, Bjhike HK-A5, Sharp (GP2Y1010AU0F), PAS-OUT-01 (Prana), Alphasense OPC-N3 y TSI Bluesky.

Con relación a la temperatura, el funcionamiento del sensor no tendrá ningún inconveniente, puesto que, la totalidad de las referencias restantes operan a temperaturas superiores a 40 °C (valor máximo de temperatura registrado en la Cúcuta en los últimos 30 años). Sin embargo, para la humedad relativa, hay 2 referencias de sensores con un valor máximo de humedad, menor al registrado en la ciudad (85 %), estos son Nova SDS011 y Winsen ZH03B, con un valor máximo de humedad de operación de 70 % y 85%, respectivamente.

El siguiente criterio de selección, fue la precisión reportada en las fichas técnicas de cada sensor, encontrándose que, la gran mayoría presentan la misma precisión, la cual es de $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para concentraciones entre $00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $\pm 10 \%$ para concentraciones entre $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, hay un sensor, que registra para el mismo rango de operación, un valor menor en la precisión, es decir, una mayor variación de la medición. Esta es la referencia Honeywell HPM115s0.

Las especificaciones técnicas de los 10 sensores restantes, son adecuadas para el rango de temperatura y humedad relativa, así como del nivel de precisión en la toma de información ($\pm 10\%$), por lo cual, se procedió a descartar los cinco (5) sensores de mayor precio, quedando 5 referencias sensores, estas son: Plantower PMS5003, PMS3003 y PMS 7003, Sensirion SPS30 y Panasonic SN-GCJA5.

La guía propuesta por la EPA [21], indica que esta entidad no certifica sensores de bajo costo. Con el fin de contar con procedimientos adecuados, siguiendo lineamientos normativos y disposiciones que garanticen que los datos de vigilancia sean de calidad y fiables, en la Unión Europea, existe el MCERTS, The Monitoring Certification Scheme (Sistema de Certificación de Monitoreo), siendo este, el organismo encargado de expedir certificaciones que sean aceptable y formalmente reconocido internacionalmente [74].

En los productos certificados por el MCERTS, en la sección de instrumentación para el agua, emisiones de chimenea, aire ambiente y software, se encuentra el ítem de Performance standard for indicative ambient particulate monitors (IAPM) "Norma

de rendimiento para monitores indicativos de partículas ambientales”, en el cual, se pueden consultar los equipos que se encuentran certificado para realizar mediciones indicativas de las partículas en el aire. El Sensirion SPS30, que se encuentra dentro de los 5 seleccionados anteriormente, cuenta con la certificación del MCERTS CSA MC200350/03 [73], para la medición de PM2.5 en un rango entre 0 a 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que lo convierte, en la mejor referencia para llevar a cabo el objetivo de la medición.

Con el fin de contar con valores de PM2.5 de otra referencia de sensores, se procedió a determinar una segunda opción, esto, con el propósito de que, en una segunda etapa, se evalué el rendimiento de los mismos.

De las ultimas 4 referencias restantes, tres (3) son de un mismo fabricante (Plantower) y dos de estas (PMS5003 y PMS7003) han sido usadas en países como Colombia, India, Corea del Sur, USA, Perú y Malasia. Por lo cual, son altamente utilizadas en fines investigativos. El último criterio de selección, se basó en la disponibilidad a nivel territorial, en donde, de acuerdo a los recursos e información, el sensor de mayor facilidad fue el PMS7003.

Conclusiones

La selección de los sensores de bajo costo, es una parte fundamental, para cumplir con los objetivos propuestos en la medición de contaminantes de la calidad del aire, por ello se debe tener en cuenta, el contaminante a medir y demás criterios, que, en algunos casos, no son tan claros como para decantarse en que sensor, es el que tiene las mejores características.

Comparar las especificaciones técnicas, de los sensores de bajo costo disponibles en la zona de estudio, que utilicen el mismo principio de medición (dispersión de la luz) de las estaciones del SVCA, es esencial, puesto que, las variables climatológicas como la temperatura y humedad relativa influyen en la medición de la concentración de material particulado.

En el mercado, existen muchas referencias de sensores de bajo costo para la medición de PM2.5. Realizar una búsqueda bibliográfica efectiva puede ayudar, sin embargo, es una tarea difícil, elegir que referencia utilizar. Para ello, en este trabajo, se priorizaron los sensores que, cuenten con la mayor cantidad de especificaciones técnicas, rango de operación de temperatura y humedad, mayor precisión, menor precio, certificaciones de medición y accesibilidad de compra.

Los sensores identificados y seleccionados, para la medición de PM2.5 en la ciudad de Cúcuta, que cumplen con los criterios descritos en la metodología establecida para la presente investigación, fueron Sensirion SPS30 y Plantower PMS7003.

Referencias

- [1] E. Onyeabor, "International Environmental Governance: Legal and Institutional Dimensions," in *Environmental Law: International and Regional African Perspectives on Law and Management*, Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland, 2024. doi: 10.1007/978-3-031-68956-7.
- [2] E. Boldo, *La contaminación del aire*. Barcelona, España: Reverté, 2016.
- [3] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), "Contaminación atmosférica," 2024. [Online]. Available: <https://www.ideam.gov.co/atencion-y-servicios-a-la-ciudadania/glosario/contaminacion-atmosferica>
- [4] R. A. Montone, R. Rinaldi, A. Bonanni, A. Severino, D. Pedicino, F. Crea, and G. Liuzzo, "Impact of air pollution on ischemic heart disease: Evidence, mechanisms, and clinical perspectives," *Atherosclerosis*, vol. 366, pp. 22–31, 2023, doi: 10.1016/j.atherosclerosis.2023.01.013.
- [5] B. Ostro, Y. Awe, and E. Sánchez-Triana, *When the Dust Settles: A Review of the Health Implications of the Dust Component of Air Pollution*, Washington, DC, USA: World Bank, Rep. no. 163070, 2021.
- [6] G. Thurston, Y. Awe, B. Ostro, and E. Sánchez-Triana, *Are All Air Pollution Particles Equal? How Constituents and Sources of Fine Air Pollution Particles (PM_{2.5}) Affect Health*, Washington, DC, USA: World Bank, Rep. no. 36269, 2021.
- [7] Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME), *Global Burden of Disease 2021: Summary Report*, Seattle, WA, USA: IHME, 2024.
- [8] Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES), *Política para el mejoramiento de la calidad del aire*, Documento CONPES 3943, Bogotá, Colombia, Jul. 31, 2018.
- [9] F. Chen, X. Zhang, and Z. Chen, "Air pollution and mental health: Evidence from China Health and Nutrition Survey," *Journal of Asian Economics*, vol. 86, Art. no. 101611, 2023, doi: 10.1016/j.asieco.2023.101611.
- [10] W. Ni, X. Hu, Y. Ju, and Q. Wang, "Air pollution and indoor work efficiency: Evidence from professional basketball players in China," *Journal of Cleaner Production*, vol. 399, Art. no. 136644, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136644.
- [11] G. Huang, Y. Jiang, W. Zhou, S. T. A. Pickett, and B. Fisher, "The impact of air pollution on behavior changes and outdoor recreation in Chinese cities," *Landscape and Urban*

Planning, vol. 234, Art. no. 104727, 2023, doi: 10.1016/j.landurbplan.2023.104727.

- [12] A. Herrera, C. Echeverri, G. Maya, and J. Ordóñez, "Patologías respiratorias en niños preescolares y su relación con la concentración de contaminantes en el aire en la ciudad de Medellín (Colombia)," *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 10, no. 19, pp. 21–31, 2011.
- [13] J. Sánchez, J. Urrego, J. Zakzuk, A. Bornacelly, I. Castro, and L. Caraballo, "Niveles de contaminantes en el aire de Cartagena, Colombia," *Revista de la Universidad Industrial de Santander Salud*, vol. 45, no. 3, pp. 35–44, 2013.
- [14] J. A. Soto-Moreno and F. Ballester-Díez, "Contaminación del aire de interiores en hogares en situación de pobreza extrema en Colombia," *Revista de Salud Pública*, vol. 15, no. 1, pp. 80–89, 2013.
- [15] J. E. Pérez-Cárdenas, "La calidad del aire en Colombia: Un problema de salud pública, un problema de todos," *Biosalud*, vol. 16, no. 2, pp. 5–6, 2017, doi: 10.17151/biosa.2017.16.2.1.
- [16] N. E. Arias-Ortiz, G. Icaza-Noguera, and P. Ruiz-Rudolph, "Thyroid cancer incidence in women and proximity to industrial air pollution sources: A spatial analysis in a middle size city in Colombia," *Atmospheric Pollution Research*, vol. 9, pp. 464–475, 2018, doi: 10.1016/j.apr.2017.11.003.
- [17] E. K. Medina Palacios, "La contaminación del aire, un problema de todos," *Revista de la Facultad de Medicina*, vol. 67, no. 2, pp. 189–191, 2019, doi: 10.15446/revfacmed.v67n2.82160.
- [18] P. Badida, A. Krishnamurthy, and J. Jayaprakash, "Meta-analysis of health effects of ambient air pollution exposure in low- and middle-income countries," *Environmental Research*, vol. 216, Art. no. 114604, 2023, doi: 10.1016/j.envres.2022.114604.
- [19] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2023*, Bogotá, Colombia: IDEAM, 2024. [Online]. Available: <https://storymaps.arcgis.com/stories/8d565731dfb1413eb679f9bd904de1c5>
- [20] Hill Consulting SAS, *Rediseño del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire de Cúcuta-Región*, Bogotá, Colombia: Hill Consulting SAS, 2022. [Online]. Available: https://corponor.gov.co/web/wp-content/uploads/2022/05/Rediseno_Sistema-Vigilancia-Calidad-del-Aire.pdf
- [21] United States Environmental Protection Agency, *The Enhanced Air Sensor Guidebook*, Washington, DC, USA, EPA/600/R-22/213, 2022.

- [22] L. X. Roncancio Valbuena, "Evaluación del desempeño de sensores de bajo costo como complemento para el monitoreo de la calidad del aire de Bogotá y como herramienta para la determinación del grado de exposición de una población caso de estudio," M.S. thesis, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, 2019.
- [23] V. M. Conesa Fernández, Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental, 3rd ed. Madrid, España: Mundi-Prensa, 2010.
- [24] J. C. Tójar, Investigación cualitativa: Comprender y actuar. Madrid, España: Ediciones La Muralla, 2006.
- [25] J. Baena Hamburger and M. Campo Morales, "Evaluación de las concentraciones internas y externas de material particulado PM2.5 en dos instituciones educativas de la ciudad de Barranquilla, Atlántico," B.S. thesis, Programa de Ingeniería Ambiental, Corporación Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia, 2020.
- [26] S. D. Caro, E. Y. A. Montero, A. del S. A. Consuegra, and A. S. Montero, "Evaluación del desempeño de un sensor de bajo costo para medir la calidad del aire," in Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería, Bogotá, Colombia, 2021, doi: 10.26507/ponencia.1999.
- [27] F. Escobar-Díaz, C. Buitrago, L. Quiñones, F. Grajales, and T. Mejía, "Evaluación de microsensores de material particulado para construir la red colaborativa de sensores de bajo costo de Bogotá," in Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad de Aire y Salud Pública (CASAP), Bogotá, Colombia, 2021, pp. 1–5, doi: 10.1109/CASAP54985.2021.9703397.
- [28] A. C. Maldonado Maya and N. F. Rojas Monroy, "Propuesta de bajo costo para el monitoreo de material particulado PM2.5 y PM10 en tiempo real en la Universidad El Bosque, Bogotá," B.S. thesis, Facultad de Ingeniería, Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia, 2019.
- [29] L. M. Gamba Gallego, "Calibración y validación de dos equipos de bajo costo para la medición de material particulado a partir de los modelos de regresión lineal simple y múltiple," B.S. thesis, Facultad de Ingeniería, Universidad El Bosque, 2022.
- [30] A. F. Castrillón Gutiérrez, "Modelos para la validación del empleo de sensores de bajo costo en la medición de la calidad del aire," M.S. thesis, Escuela de Ingenierías, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 2024.
- [31] J. J. V. Moreno, "Nuevos métodos de monitoreo de material particulado para el estudio de la calidad del aire," in VII Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública (CASAP), Barranquilla, Colombia, 2019.

- [32] M. C. Lozano Rivera, "Monitoreo de la calidad del aire en el sur de la ciudad de Cali empleando un sensor a bajo costo," B.S. thesis, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia, 2021.
- [33] C. D. Hoyos, L. Herrera-Mejía, N. Roldán-Henao, and A. Isaza, "Efectos de los fuegos artificiales sobre la concentración de material particulado en un valle angosto: el caso del área metropolitana de Medellín," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 192, Art. no. 6, 2020, doi: 10.1007/s10661-019-7838-9.
- [34] D. Díaz Veloza and J. F. Ríos López, "Caracterización y evaluación de exactitud para establecer la factibilidad del uso de sensores de bajo costo de PM2.5 y PM10 en el monitoreo de la calidad del aire en smart cities," B.S. thesis, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, 2024.
- [35] C. A. Bonilla-Granados, A. Y. Sánchez-Delgado, Y. M. Rubio-Gómez, and M. Cortéz-Huerta, "Niveles de concentración por PM2.5 mediante sensores de bajo costo. Caso de estudio: Pamplona, Colombia," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 22, no. 3, pp. 29–38, 2023, doi: 10.18273/revuin.v22n3-2023003.
- [36] N. Hernández Siachoque, "Diseño e implementación de un sistema IoT para monitorear calidad del aire," B.S. thesis, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes, 2021.
- [37] Y. D. León Salas, "Aplicabilidad del uso de sensores electroquímicos de bajo costo como alternativa en la medición de la calidad del aire: caso PM2.5," B.S. thesis, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, 2021.
- [38] D. Kim, D. Shin, and J. Hwang, "Calibration of low-cost sensors for measurement of indoor particulate matter concentrations via laboratory/field evaluation," *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 23, no. 5, pp. 1–11, 2023, doi: 10.4209/aaqr.230097.
- [39] S. Kim, H. Go, E. Bang, et al., "Field performance evaluation of low-cost PM2.5 sensors for enhancing spatial resolution of PM2.5 monitoring: a case study in the smart city of Sejong, Korea," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 197, no. 118, pp. 1–14, 2025, doi: 10.1007/s10661-024-13601-2.
- [40] A. Božilov, V. Tasić, N. Živković, et al., "Performance assessment of NOVA SDS011 low-cost PM sensor in various microenvironments," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 194, no. 595, pp. 1–15, 2022, doi: 10.1007/s10661-022-10290-7.
- [41] H. Y. Liu, P. Schneider, R. Haugen, and M. Vogt, "Performance assessment of a low-cost PM2.5 sensor for a near four-month period in Oslo, Norway," *Atmosphere*, vol. 10, no. 2, pp. 1–19, 2019, doi: 10.3390/atmos10020041.

- [42] V. R. Dharaiya, V. Malyan, V. Kumar, et al., "Evaluating the performance of low-cost PM sensors over multiple COALESCE network sites," *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 23, no. 6, Art. no. 220390, 2023, doi: 10.4209/aaqr.220390.
- [43] S. Srishti, P. Agrawal, P. Kulkarni, et al., "Multiple PM low-cost sensors, multiple seasons' data, and multiple calibration models," *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 23, no. 6, Art. no. 220428, 2023, doi: 10.4209/aaqr.220428.
- [44] Y. Romero, R. M. A. Velásquez, and J. Noel, "Development of a multiple regression model to calibrate a low-cost sensor considering reference measurements and meteorological parameters," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 192, no. 8, Art. no. 498, 2020, doi: 10.1007/s10661-020-08440-w.
- [45] M. Tagle, F. Rojas, F. Reyes, et al., "Field performance of a low-cost sensor in the monitoring of particulate matter in Santiago, Chile," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 192, no. 3, Art. no. 171, 2020, doi: 10.1007/s10661-020-8118-4.
- [46] X. Liu, Q. Zhao, S. Zhu, et al., "An experimental application of laser-scattering sensor to estimate the traffic-induced PM_{2.5} in Beijing," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 192, no. 7, Art. no. 450, 2020, doi: 10.1007/s10661-020-08398-9.
- [47] M. U. Rabuan, M. S. M. Nadzir, S. Z. A. Sham, S. B. I. W. S. Bahri, J. Borah, S. Majumdar, T. M. T. Lei, S. H. M. Ali, M. I. A. Wahab, and N. H. M. Yunus, "Evaluations of low-cost air quality sensors for particulate matter (PM_{2.5}) under indoor and outdoor conditions," *Sensors and Materials*, vol. 35, no. 8, pp. 2881–2895, 2023.
- [48] O. Stampfer, C. Zuidema, R. W. Allen, et al., "Practical considerations for using low-cost sensors to assess wildfire smoke exposure in school and childcare settings," *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2024, doi: 10.1038/s41370-024-00677-8.
- [49] C. J. Rathbone, D. Bousiotis, O. G. Rose, et al., "Using low-cost sensors to assess common air pollution sources across multiple residences," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1803, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-85985-1.
- [50] E. Anastasiou, M. J. R. Vilcassim, J. Adragna, et al., "Feasibility of low-cost particle sensor types in long-term indoor air pollution health studies after repeated calibration, 2019–2021," *Scientific Reports*, vol. 12, Art. no. 14571, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-18200-0.
- [51] Plantower, "PMS5003—Laser PM_{2.5} Sensor," Plantower Technology, [Online]. Available: https://www.plantower.com/en/products_33/74.html
- [52] Temtop, "Temtop M2000 2nd Generation Air Quality Monitor for PM_{2.5}, PM₁₀

particles, CO₂, HCHO, temperature, humidity," Temtop, [Online]. Available: <https://temtopus.com/products/temtop-m2000-2nd-generation-air-quality-monitor-for-pm2-5-pm10-particles-co2-hcho-temperature-humidity-settable-audio-alarm-data-export-recording-curve-easy-calibration?variant=40587983421488>

[53] Honeywell, "HPM Series Particulate Matter Sensor," Technical Datasheet, Honeywell International Inc., 2022. [Online]. Available: <https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/sps/siot/en-us/products/sensors/particulate-matter-sensors-hpm-series/documents/sps-siot-particulate-hpm-series-datasheet-32322550-ciid-165855.pdf>

[54] Plantower Technology, "PMS3003—Laser PM2.5 Sensor," Plantower Technology, [Online]. Available: https://www.plantower.com/en/products_33/73.html

[55] Shinyei Technology Co., Ltd., "PPD42NJ – Particulate Matter Sensor," Technical Datasheet, Shinyei Technology Co., Ltd., 2013. [Online]. Available: <https://www.shinyei.co.jp/stc/eng/products/optical/ppd42nj.html>

[56] Nova Fitness Co., Ltd., "SDS011 – High Precision Laser PM2.5 Sensor," Technical Datasheet, Nova Fitness Co., Ltd., 2013. [Online]. Available: <https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/X200/SDS011-DATASHEET.pdf>

[57] DFRobot, "Air Quality Monitor (PM2.5, Formaldehyde, Temperature & Humidity Sensor) – SEN0233," Technical Datasheet, DFRobot, 2017. [Online]. Available: https://mm.digikey.com/Volume0/opasdata/d220001/medias/docus/863/SEN0233_Web.pdf

[58] Clarity Movement Co., "Clarity Node-S: PM & NO₂ Air Quality Sensor," Clarity Movement, [Online]. Available: <https://www.clarity.io/products/clarity-node-s>

[59] GVZ Components, "PPD60PV-T2 – Particle Sensor Datasheet," Technical Datasheet, GVZ Components, [Online]. Available: <https://gvzcomp.it/component/djcatalog2/?format=raw&task=download&fid=463#.pdf>

[60] DFRobot, "HK-A5 Laser PM2.5/PM10 Sensor Datasheet," Technical Datasheet, DFRobot, [Online]. Available: <https://dfimg.dfrobot.com/nobody/wiki/1211380111ac0284979e33578da23a37.pdf>

[61] Plantower Technology, "PMSA003 – Laser PM2.5 Sensor," Plantower Technology, [Online]. Available: https://www.plantower.com/en/products_33/77.html

[62] Electronilab, "Sensor Material Particulado / Calidad de Aire – SPS30," Electronilab, [Online]. Available: <https://electronilab.co/tienda/sensor-material-particulado-calidad-de-aire-sps30>

- [63] Vistronica, "Sensor Óptico de Polvo GP2Y1010AU0F," Vistronica, [Online]. Available: <https://www.vistronica.com/sensores/proximidad-y-distancia/sensor-optico-de-polvo-gp2y1010au0f-detail.html>
- [64] Plantower Technology Co., Ltd., "PMS7003 Laser PM2.5 Sensor," Plantower Technology, 2025. [Online]. Available: https://www.plantower.com/en/products_33/76.html
- [65] Mouser Electronics, "Laser Type PM Sensor SN-GCJA5," 2021. [Online]. Available: https://www.mouser.com/catalog/specsheets/panasonic_10152024_SN_GCJA5.pdf
- [66] Cubic Sensor and Instrument Co., Ltd., "Cubic PM2105L Laser Particle Sensor Module Specification," 2022. [Online]. Available: https://en.gassensor.com.cn/Product_files/Specifications/Cubic-PM2105L-Laser-Particle-Sensor-Module-Specification.pdf
- [67] Prana Air, "Prana Air PAS-OUT-1 Outdoor PM Sensor Datasheet," 2022. [Online]. Available: <https://www.pranaair.com/wp-content/uploads/2022/11/prana-air-pas-out-1-outdoor-pm-sensor-datasheet.pdf>
- [68] Sensirion AG, "Sensirion Datasheet SEN5x," 2022. [Online]. Available: https://cdn.sparkfun.com/assets/5/b/f/2/8/Sensirion_Datasheet_SEN5x.pdf
- [69] Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd., "ZH03 Series Laser Dust Sensor Module Manual," 2016. [Online]. Available: <https://www.tme.eu/Document/396da8ad44f80d0b88777119c642bb01/zh03-series.pdf>
- [70] Alphasense Ltd., "OPC-N3 Particle Monitor – For Use in High Pollution Urban Environments," 2018. [Online]. Available: https://ametekcdn.azureedge.net/mediafiles/project/oneweb/oneweb/alphasense/products/datasheets/alphasense_opc-n3_datasheet_en_1.pdf
- [71] Davis Instruments, "Manual del Usuario – Sensor de Calidad del Aire AirLink 7210," 2020. [Online]. Available: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0339/7965/files/DAVI-7210_Manual_Espanol.pdf?v=17253852335
- [72] TSI Incorporated, "BlueSky™ Air Quality Monitor Models 8143 and 8145," 2023. [Online]. Available: https://tsi.com/getmedia/e68b17de-52a1-4c49-a180-56c3cc4556cb/BlueSky-Air-Quality-Monitor_US_5002491_RevD_Web?ext=.pdf
- [73] CSA Group, "Product Conformity Certificate," CSA Group, Toronto, Canada, CSA MC200350/03, 2019.
- [74] S. Newstead, "MCERTS: Development of a UK-based Monitoring Certification Scheme," Environment Agency, Bristol, UK, R&D Technical Report P6-T1/01, 1997.