

Diseño de un sistema para el monitoreo hiperlocal con baja latencia para la caracterización del aire.

Design of a system for hyperlocal monitoring with low latency for air characterization.

Uriel Alejandro Hernández Sánchez ^a, Sergio Vázquez Rosas ^b, Alma Edith Cervantes Cruz ^a,
Oswaldo Martínez Victorino ^a, Jesús Yair Martínez Landa ^a, Emmanuel García Solís ^a

Abstract:

Air pollution from particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀) is a critical public health issue, especially in urban and agricultural regions where sources such as transportation and biomass burning increase population exposure. This work aims to develop and evaluate a hyperlocal, low-cost, low-latency monitoring system capable of characterizing air quality in real time. The methodology adopted the Design Thinking approach, and the prototype integrated a microcontroller, PMS5003 optical sensor to detect PM_{2.5} and PM₁₀, along with temperature and humidity sensors (DHT11). The enclosure was optimized to improve environmental resistance and portability. The system was evaluated between April and July 2025, generating records at one-minute intervals and a total of 2,160 measurements, which were processed using statistical analysis. The results show high initial variability in PM_{2.5} (20–80 µg/m³) and PM₁₀ (15–85 µg/m³), with multiple exceedances of the regulatory limit of 60 µg/m³. A direct correlation was identified between concentration peaks and the sugarcane burning season, evidencing a recurring pattern of anthropogenic pollution. It is concluded that the proposed system constitutes a viable alternative for community air quality monitoring, allowing the generation of high spatial and temporal resolution data.

Keywords:

Low cost, Air quality, Hyperlocal monitoring, PM_{2.5}, PM₁₀

Resumen:

La contaminación atmosférica por material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) es un problema crítico de salud pública, especialmente en regiones urbanas y agrícolas donde fuentes como el transporte y la quema de biomasa aumentan la exposición poblacional. Este trabajo tiene como objetivo desarrollar y evaluar un sistema de monitoreo hiperlocal, de bajo costo y baja latencia, capaz de caracterizar en tiempo real la calidad del aire. La metodología adoptó el enfoque de *Design Thinking*, el prototipo integró un microcontrolador, sensor óptico PMS5003 para detectar PM_{2.5} y PM₁₀, junto con sensores de temperatura y humedad (DHT11). El encapsulado se optimizó para mejorar la resistencia ambiental y la portabilidad. El sistema se evaluó en los meses de abril y julio de 2025, generando registros a intervalos de un minuto y un total de 2160 mediciones, procesadas mediante análisis estadístico. Los resultados muestran una alta variabilidad inicial en PM_{2.5} (20–80 µg/m³) y PM₁₀ (15–85 µg/m³), con múltiples excedencias respecto al límite normativo de 60 µg/m³. Se identificó una correlación directa entre los picos de concentración y la temporada de quema de caña, lo cual evidencia un patrón recurrente de contaminación de origen antropogénico. Se concluye que el sistema propuesto constituye una alternativa viable para el monitoreo comunitario de la calidad del aire, permitiendo la generación de datos de alta resolución espacial y temporal.

^b Autor de Correspondencia, Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz | Procesos industriales | Veracruz | México, <https://orcid.org/0000-0002-3259-382X>, Email: sergio.vazquez@utcv.edu.mx

^a Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz | Procesos industriales | Veracruz | México, <https://orcid.org/000-0003-1488-3601>, Email: alejandro.hernandez@utcv.edu.mx; <https://orcid.org/0009-0003-0108-1287>, Email: 20223G101266@utcv.edu.mx; <https://orcid.org/0009-0002-3762-6683>, Email: 20223G101001@utcv.edu.mx; <https://orcid.org/0009-0003-4985-2925>, Email: 20223G201012@utcv.edu.mx; <https://orcid.org/0009-0003-6802-8552>, Email: 20223G201022@utcv.edu.mx

Palabras Clave:

Bajo costo, Calidad del aire, Monitoreo hiperlocal, $PM_{2.5}$, PM_{10}

Introducción

La calidad del aire es uno de los factores ambientales más relevantes para la salud pública y el bienestar social, especialmente en zonas urbanas densamente pobladas [1]. Entre los múltiples contaminantes presentes en la atmósfera, el material particulado (PM), por sus siglas en inglés ha sido identificado como uno de los más peligrosos debido a su capacidad de ingresar al sistema respiratorio y afectar directamente la salud humana [2]. El material particulado se compone de una mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire, que varían en tamaño, origen y composición química. Las fracciones más comúnmente monitoreadas son PM_{10} (partículas con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros) y $PM_{2.5}$ (menores o iguales a 2.5 micrómetros), debido a su capacidad para penetrar profundamente en los pulmones e incluso llegar al torrente sanguíneo [3], [4].

Las principales fuentes de PM en áreas urbanas incluyen emisiones vehiculares, procesos industriales, construcción, quema de residuos y actividades domésticas como el uso de combustibles sólidos [5]. Diversos estudios han demostrado que la exposición prolongada a estos contaminantes está relacionada con enfermedades respiratorias crónicas, ataques cardíacos, cáncer de pulmón, y un incremento en la mortalidad prematura [6], [7]. De hecho, según la OMS [8], la contaminación del aire representa uno de los mayores riesgos ambientales para la salud humana a nivel mundial, siendo responsable de millones de muertes cada año. En este contexto, el monitoreo constante y confiable de la calidad del aire se vuelve una necesidad urgente [9]. Sin embargo, muchas ciudades, especialmente en países en desarrollo, carecen de sistemas de monitoreo adecuados debido al alto costo de los equipos convencionales, la limitada cobertura espacial y la falta de acceso a datos en tiempo real. Esta carencia de información impide la implementación de políticas ambientales eficaces y limita la participación ciudadana en la vigilancia ambiental [10], [11].

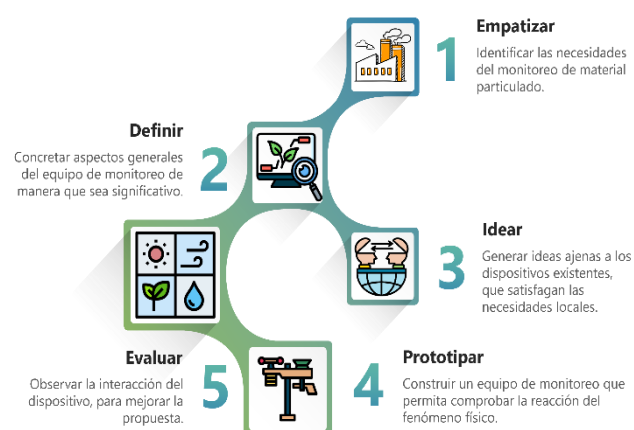
Los sistemas de monitoreo emplean sensores electrónicos avanzados, que ofrecen una alternativa económica gracias a los avances en microelectrónica. Estos sensores pueden transmitir información en tiempo real en zonas urbanas y rurales mediante comunicación inalámbrica. Es posible desarrollar sistemas de bajo costo para caracterizar la calidad del aire, utilizando sensores

basados en la dispersión de la luz, que interceptan un haz luminoso, generalmente de un láser o un LED [12]. Los sensores ópticos se dividen en dos tipos: nefelómetros, que miden la luz dispersada por un conjunto de partículas, y contadores ópticos de partículas, que detectan partículas individuales para determinar su tamaño y cantidad [13].

Este proyecto demuestra la viabilidad de desarrollar una estación de monitoreo funcional, precisa y de bajo costo, utilizando herramientas de diseño accesibles como EasyEDA, sensores especializados y conectividad IoT. Además de generar datos relevantes, esta estación puede fomentar la concientización comunitaria y respaldar la toma de decisiones informadas para mejorar la calidad del aire y reducir los riesgos asociados a la contaminación.

Metodología

En el presente trabajo se desarrolló un dispositivo para evaluar la calidad del aire mediante la metodología Design Thinking. Design Thinking es un enfoque centrado en el usuario que promueve la innovación tecnológica mediante un proceso iterativo de cinco etapas: empatía, definición, ideación, prototipado y evaluación, en la figura 1 se detallan las etapas. Esta metodología combina los requisitos técnicos para la medición ambiental con las necesidades prácticas de bajo costo, portabilidad y facilidad de uso.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Metodología aplicada

La primera etapa es la identificación de necesidades locales del monitoreo de material particulado, en la que se identificaron 7 estaciones fijas y 1 estación móvil de

monitoreo de partículas finas en el estado de Veracruz en 2024, las cuales se encuentran ubicadas en promedio a una distancia de 198 kilómetros una de la otra, por lo que la cobertura no llega a la suficiencia. La segunda etapa, son las acciones dedicadas a concretar aspectos generales del equipo de manera que sea significativo para la sociedad. En esta etapa se definió el controlador, captador, ciclo de muestreo y procedimiento de recolección de datos. La tercera etapa es generar ideas ajenas a los dispositivos existentes, que satisfagan las necesidades locales de almacenamiento de datos, sincronización de registros e instalación en exteriores. En la etapa cuatro se construyó un equipo de monitoreo que permite cuantificar la concentración de material particulado con muestreo activado por horario, almacenamiento en memoria microSD, encapsulado en una carcasa con forma de cúpula y gotero para reducir el deterioro por calor y lluvia. En la etapa final se observó la interacción del dispositivo creado, con las variables climatológicas de la zona centro de Veracruz para obtener un aprendizaje que nos permita mejorar la propuesta.

Desarrollo

El primer paso para el desarrollo de la investigación es el diagnóstico de la infraestructura existentes en el estado. Se detectaron siete estaciones fijas y una estación móvil distribuidas a lo largo de 71,824 km², en la tabla 1 se muestran las distancias entre cada una de las estaciones de monitoreo instaladas en el territorio veracruzano, Las distancias fueron estimadas aplicando el método del gran círculo a partir de las coordenadas de la estación de monitoreo. En cada estación se miden parámetros de PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, NO, NO₂, NO_x, SO₂, CO y variables meteorológicas; temperatura, humedad, viento, precipitación y radiación. En consecuencia, se evidencia la insuficiencia en la cobertura del sistema de monitoreo de la calidad del aire de baja latencia en el estado de Veracruz.

Tabla 1. Estaciones fijas instaladas

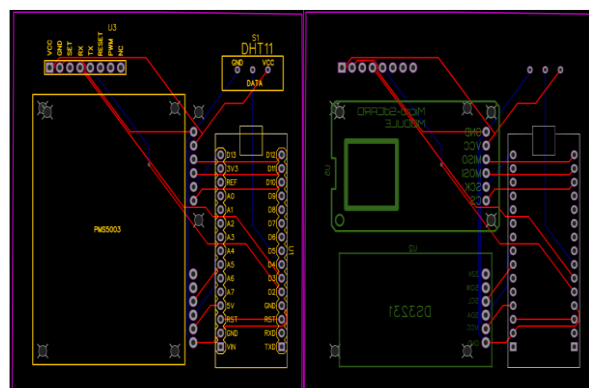
Ciudad	1	2	3	4	5	6	7
Coatza-coalcos	0	21	413	88	440	215	305
Minatitlan	21	0	416	87	445	215	304
Poza Rica	413	416	0	329	46	201	122
San Andrés Tuxtla	88	87	329	0	360	128	217
Tuxpan	440	445	46	360	0	235	164
Veracruz	215	215	201	128	235	0	90
Xalapa	305	304	122	217	164	90	0

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, a partir de las necesidades identificadas, se definieron los criterios de diseño del prototipo. Estos incluyeron la selección de un microcontrolador como unidad central de procesamiento, la elección del sensor de material particulado, la definición del ciclo de muestreo y la estandarización del procedimiento de recolección de datos.

Se utiliza un microcontrolador Arduino Nano, para la sincronización de los componentes del sistema. Esta tarjeta de aplicación tiene ventajas como tamaño reducido y remplazo económico. El sensor óptico PMS5003 mide la concentración de material particulado suspendido en el aire, con una tolerancia de 1.0 µg/m³ a 2.5 µg/m³, en un rango efectivo de 0µgcm⁻³ a 500 µgcm⁻³. La temperatura y humedad son captadas por un sensor DHT11 en un rango de medición de temperatura de 0°C a 50 °C y 20% a 90% de humedad relativa. Su tolerancia es de ±2 °C para la temperatura y ±5% para la humedad relativa. Los datos se registran mediante la activación de un módulo de reloj en tiempo real 3231 y se almacenan en un módulo de memoria microSD. El suministro de voltaje se realiza a través de un cargador de 5V a 2A. Se utilizan el protocolo de comunicación serial para la comunicación del sensor de material particulado, I²C para el reloj en tiempo real, SPI para para el módulo de almacenamiento.

Para el diseño del sistema embebido se empleó el software libre EasyEDA para desarrollar una placa de conexiones, destinada a unir los diversos componentes del proyecto. En la figura 2 se muestra el diagrama electrónico del sistema.

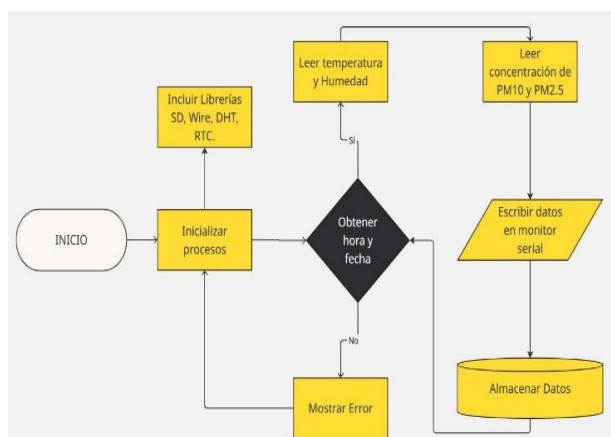


Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Diagrama electrónico

Para que el sistema pueda procesar las señales generadas por los sensores PMS5003, DHT11, anemómetro y velocímetro analógicos, se desarrolló un diagrama de flujo el cual se muestra en la figura 3 y sirve para analizar el comportamiento de la programación en el prototipo. La estación de monitoreo contiene un programa que se configuró mediante la utilización de librerías para

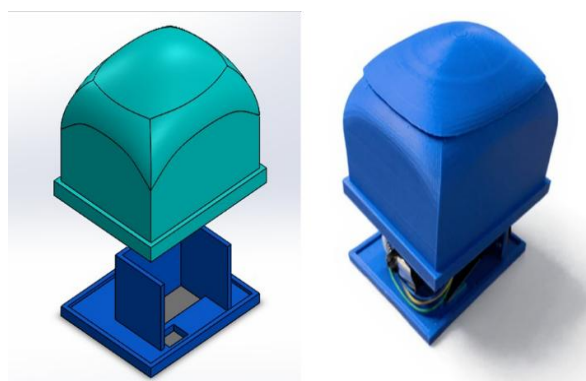
los sensores digitales y algoritmos de acondicionamiento para los sensores analógicos. El inicio de los procesos de lectura está condicionado a el funcionamiento del reloj en tiempo real. Cuando el reloj registra el inicio de una hora (intervalo de medición), se inicia la lectura de las variables, posteriormente se calculan las magnitudes en los sensores analógicos. Cuando las magnitudes se han acondicionado, se escriben en el puerto serial y finalmente se almacenan en una memoria SD.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo

Se diseñó un encapsulado en una carcasa plástica el cual se muestra en la Figura 4, la parte superior se dispuso con forma de bóveda esférica para que la lluvia escurra hacia el suelo. En la parte inferior la orilla sobresale 3mm para fungir como gotero. En la base inferior se colocaron orificios para la captación de aire, alrededor de los sensores se extruyó una pared de 3mm, que permite fijar los módulos dentro de la cúpula. Se procuraron dimensiones conservadas, largo 98mm, ancho 82mm y altura 9mm.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Encapsulado

El desarrollo de la estación de monitoreo hiperlocal con baja latencia para la caracterización del aire se consideraron materiales de bajo costo y que brindaran un alto nivel de precisión al momento de realizar la captación de datos. Los costos del prototipo se presentan en la tabla 2, los costos unitarios de los componentes de la estación de monitoreo hacen a \$1,200. Los precios en el mercado de una estación de monitoreo oscilan entre los \$45,000 y \$70,000[14]. Sin embargo, dichos precios no incluyen la adecuación de los espacios ni la instalación. Por lo tanto, el prototipo puede funcionar como una opción económica para la evaluación de la calidad del aire en cualquier zona, además, de ser portable y ampliable, representa una opción fiable en comparación con los sistemas actuales.

Tabla 2. Costo de los componentes del sistema

Categoría	Descripción	Costo total MXN
Materiales	PMS 5003	\$450.00
	Microcontrolador	\$120.00
	MicroSD (8GB)	\$120.00
	Reloj DS3231	\$100.00
	Sensor DHT11	\$50.00
	Jumpers	\$80.00
Insumos	Filamento para impresión 3D	\$300.00
Total		\$1,200.00

Fuente: Elaboración propia.

Resultados y discusión

Al terminar la etapa de desarrollo se procedió a realizar breves pruebas de funcionamiento; programación, componentes electrónicos y exposición a condiciones ambientales. En la figura 5 se muestra el monitor serial, en donde se puede comprobar la baja latencia de los datos a 9600 baudios, además permitió validar depuración del programa y validar que exista comunicación entre sensores y microcontrolador.

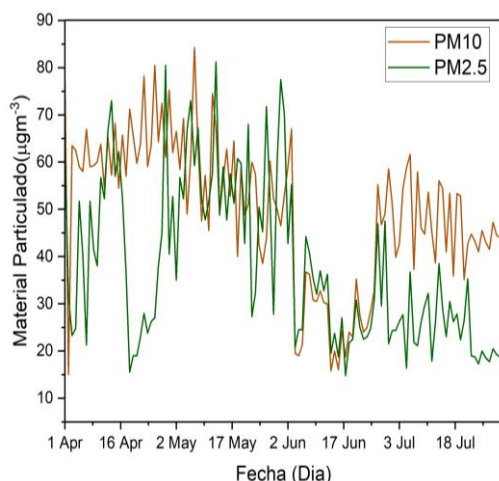


Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Monitor Serial

Conclusiones

El dispositivo de medición de la calidad del aire propuesto se ha desarrollado para detectar la calidad del aire en tiempo real del $PM_{2.5}$ y PM_{10} en exteriores, se realizaron mediciones desde abril hasta julio de 2025, con una frecuencia de registro de datos por minuto. Para el análisis se recopilaban 2160 minutos de datos que al promediarse se obtienen 90 datos promedios al día. Posteriormente se procesaron los datos en un software estadístico en donde se graficó el comportamiento de los datos. En la figura 6 se muestran las concentraciones de partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} en los meses de abril a agosto con alta variabilidad inicial para $PM_{2.5}$ 20-80 $\mu g/m^3$ y 15-85 $\mu g/m^3$ en las partículas PM_{10} , múltiples excedencias en $PM_{2.5}$ del límite de 60 $\mu g/m^3$ [15], y una tendencia descendente hacia agosto con estabilización en $\sim 20 \mu g/m^3$.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Diagrama de flujo del algoritmo

La identificación de la quema de caña como fuente principal de material particulado fino ($PM_{2.5}$) y material respirable (PM_{10}) modifica sustancialmente la interpretación de los datos y evidencia un problema de salud pública sistemático y predecible. Los valores máximos de 70-80 $\mu g/m^3$ registrados durante abril y mayo constituyen exposiciones peligrosas que requieren intervención urgente. La correlación temporal observada indica que esta crisis sanitaria de origen antropogénico podría evitarse mediante la implementación de cambios en las prácticas agrícolas y en las políticas públicas. La evidencia indica que la población experimenta exposiciones anuales recurrentes a niveles de contaminación que superan significativamente las recomendaciones internacionales, lo que genera consecuencias graves y acumulativas para la salud respiratoria, cardiovascular y oncológica de la comunidad.

Actualmente, existe una tendencia mundial a incrementar la recopilación de datos sobre la calidad del aire utilizando métodos adicionales a las estaciones de monitoreo de referencia. Diversos proyectos de investigación han evaluado la viabilidad de recopilar datos de calidad del aire mediante plataformas de sensores de bajo coste. Los estudios recientes indican que algunos sensores comerciales de bajo coste, como los de partículas en suspensión PM_{10} y $PM_{2.5}$, ya proporcionan información general sobre la calidad del aire, permitiendo clasificarla como buena, moderada o muy contaminada [16], [17]. Esta información resulta adecuada para aplicaciones orientadas a la sensibilización o participación comunitaria en el monitoreo de la calidad del aire local, dado que estas aplicaciones no requieren el mismo nivel de precisión que el monitoreo científico o regulatorio.

Se concluye que el sistema propuesto constituye una alternativa viable para el monitoreo comunitario de la calidad del aire, permitiendo la generación de datos de alta resolución espacial y temporal [18]. Asimismo, la evidencia obtenida confirma la necesidad de implementar políticas públicas orientadas a la mitigación de emisiones agrícolas y urbanas, dado que la población está expuesta de manera sistemática a niveles de contaminación que exceden los estándares internacionales de la OMS [19], [20].

El encapsulado del dispositivo demostró que la fabricación aditiva permite la adaptación a diferentes entornos urbanos, lo cual permite identificar zonas críticas, establecer patrones temporales de contaminación y evaluar el impacto de políticas ambientales. Desde el punto de vista social, el proyecto abre la posibilidad de empoderar a la población mediante el acceso a datos ambientales locales, promoviendo la transparencia y la participación ciudadana en la gestión ambiental. En términos tecnológicos, se comprobó que es posible integrar un sistema escalable que no depende de conexión a internet para su funcionamiento, lo que amplía su utilidad en zonas con baja conectividad. No obstante, se reconoce que futuras versiones del prototipo deben contemplar mejoras en la protección de componentes frente a condiciones climáticas adversas, mayor autonomía energética y la posibilidad de transmisión inalámbrica de datos para un análisis en tiempo real.

Referencias

- [1] M. Romero, F. Diego, and M. Álvarez, “La contaminación del aire: Su repercusión como problema de salud,” *Rev Cubana Hig Epidemiol*, vol. 44, no. 2, 2006.
- [2] D. Gomez and J. Vassallo, “SENSORES DE MATERIAL PARTICULADO EN SUSPENSIÓN DE BAJO COSTO:

24 –30 de octubre de 2025

- INTEGRACIÓN AL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE,” *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica*, 2023, doi: 10.22201/iingen.0718378xe.2023.16.3.86568.
- [3] Hernández-Sánchez Uriel Alejandro, Vázquez-Rosas Sergio, Caballero-López Emma Isabel, and Flores-Sánchez Verónica, “Desing of a two-stage air monitoring and filtration system for implementation in eclosed spaces,” *Journal of Research and Development*, vol. 23, no. 19, pp. 29–36, Jun. 2023, doi: 10.35429/JRD.2023.23.9.29.36.
- [4] Ma. D. Castañeda *et al.*, “Caracterización físicoquímica de material particulado del Popocatepetl, trayecto Atlixco-Puebla, y su impacto en la salud y el ambiente,” *Acta Univ*, vol. 32, 2022, doi: 10.15174/au.2022.3489.
- [5] W. J. Guan, X. Y. Zheng, K. F. Chung, and N. S. Zhong, “Impact of air pollution on the burden of chronic respiratory diseases in China: time for urgent action,” 2016. doi: 10.1016/S0140-6736(16)31597-5.
- [6] J. Bañeras *et al.*, “Environment and cardiovascular health: causes, consequences and opportunities in prevention and treatment,” *Revista Española de Cardiología (English Edition)*, vol. 75, no. 12, 2022, doi: 10.1016/j.rec.2022.05.030.
- [7] S. E. Diaz, C. Silva, R. J. Mogollón, and C. E. Orihuela, “Costo económico de la mortalidad por cáncer de pulmón asociado al material particulado en el área de Lima Metropolitana,” *Natura@economía*, vol. 6, no. 1, 2021, doi: 10.21704/ne.v6i1.1729.
- [8] Organización Mundial de la Salud, “Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire Resumen ejecutivo,” 2021. Accessed: Aug. 11, 2025. [Online]. Available: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/346062/9789240035461-spa.pdf>
- [9] R. E. Wyzga and F. W. Lipfert, “Air pollution and human health: what is the evidence for harmful effects of sulfate ion?,” in *Proceedings of the Air & Waste Management Association's Annual Meeting & Exhibition*, 1998.
- [10] G. Liu *et al.*, “A review of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation,” 2017. doi: 10.1016/j.scs.2017.04.011.
- [11] D. L. Franke, D. S. Ensor, J. T. Hanley, and L. E. Sparks, “Environmental technology verification program for indoor air products: implementing a testing program for general ventilation air filters,” in *Proceedings of the Air & Waste Management Association's Annual Meeting & Exhibition*, 1998.
- [12] J. Ulloa Ninahumán, D. M. Alvarez-Tolentino, A. Peña Rojas, and L. Suarez-Salas, “Sensores de bajo costo en la caracterización de partículas finas (PM2.5) de una ciudad altoandina,” *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, vol. 24, no. 3, 2022, doi: 10.18271/ria.2022.468.
- [13] A. Scagliotti and G. Jorge, “Caracterización de sensor de material particulado de bajo costo,” *Revista Tecnología y Ciencia*, no. 42, 2021, doi: 10.33414/rtyc.42.96-111.2021.
- [14] G. García Navarrete and K. G. Rico Soto, “SENSORES DE BAJO COSTO PARA EL MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE,” *EPISTEMUS*, vol. 13, no. 27, 2020, doi: 10.36790/epistemus.v13i27.108.
- [15] Secretaría de Salud, “NOM-025-SSA1-2021,” *Diario oficial de la federación*, 2021.
- [16] N. Castell *et al.*, “Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?,” *Environ Int*, vol. 99, 2017, doi: 10.1016/j.envint.2016.12.007.
- [17] G. C. Spyropoulos, P. T. Nastos, and K. P. Moustiris, “Performance of aether low-cost sensor device for air pollution measurements in urban environments. Accuracy evaluation applying the air quality index (aqi),” *Atmosphere (Basel)*, vol. 12, no. 10, 2021, doi: 10.3390/atmos12101246.
- [18] L. Spinelle, M. Aleixandre, and M. Gerboles, *Protocol of evaluation and calibration of low-cost gas sensors for the monitoring of air pollution*. 2013.
- [19] INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO, “INFORME NACIONAL DE LA CALIDAD DEL AIRE 2021,” 2024. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/inecc>
- [20] Organización Mundial de la Salud, “Guías para la Calidad del Aire, OMS GUÍAS PARA LA CALIDAD DEL AIRE Organización Mundial de la Salud,” 2004.