

Monitoreo de la Calidad del Aire en Contextos Urbanos: Retos y Soluciones Tecnológicas para un Futuro más Limpio

Maríel Abigail Cruz Nájera ^{1,*}, Estela Guzmán Etienne ², Manuel Agustín Martínez Lam ², Juana Elizabeth Medina Álvarez ¹, Guadalupe Esmeralda Rivera García ²

¹ Universidad Politécnica de Altamira, Altamira, Tamaulipas, México.

² Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Pánuco, Pánuco, Veracruz, México.

* Autor de correspondencia: maríel.cruz@upalt.edu.mx, (+52) 833-460-00-11

Artículo de divulgación científica

Recibido: 6 de agosto de 2026

Aceptado: 6 de septiembre de 2026

Publicado: 20 de septiembre de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.738>

Resumen: La contaminación atmosférica constituye uno de los principales riesgos ambientales para la salud pública y afecta con mayor intensidad a la población infantil, las personas adultas mayores y quienes presentan enfermedades preexistentes. Este artículo analiza los retos del monitoreo de la calidad del aire en contextos urbanos, con énfasis en zonas caracterizadas por crecimiento acelerado, actividad industrial y cobertura limitada de estaciones de referencia. Mediante una revisión narrativa de literatura científica y documentos oficiales, se examinan los efectos del material particulado, la contribución de la ecologización urbana, la situación del monitoreo en México y el potencial de sensores de bajo costo, internet de las cosas, plataformas web, imágenes satelitales e inteligencia artificial. Los estudios revisados muestran que estas tecnologías permiten ampliar la cobertura espacial y temporal, generar información cercana a las comunidades y apoyar el análisis predictivo; sin embargo, sus datos requieren calibración, control de calidad y comparación con equipos de referencia. En el contexto de Altamira, Tamaulipas, se plantea el monitor de calidad del aire MB01-ICA como una propuesta tecnológica local de carácter indicativo y educativo, orientada a fortalecer la información ambiental y la participación social. Se concluye que la combinación de infraestructura verde, monitoreo accesible y gobernanza de datos puede contribuir a una vigilancia ambiental más equitativa, siempre que se evite sustituir las estaciones regulatorias por dispositivos no validados.

Palabras clave: calidad del aire, material particulado, sensores de bajo costo, internet de las cosas, inteligencia artificial, monitoreo urbano

Introducción

La contaminación del aire es un problema ambiental y sanitario asociado a la emisión de partículas y gases procedentes del transporte, la industria, la generación de energía, la combustión doméstica y ciertos fenómenos naturales. La intensificación de las actividades industriales y del transporte ha incrementado la concentración de contaminantes sólidos, líquidos y gaseosos en el aire, haciendo indispensable monitorear el comportamiento y la presencia de estas sustancias en la atmósfera (Maldonado & Aguirre, 2024).

La exposición a estos contaminantes incrementa el riesgo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares; sus efectos se distribuyen de forma desigual entre grupos sociales y territorios (World Health Organization, 2021). En particular, la exposición prolongada al material particulado fino de tipo PM2.5 relacionadas con una carga considerable de mortalidad prematura a escala mundial (Burnett *et al.*, 2018).

La vigilancia ambiental tradicional se apoya en estaciones de referencia de alta precisión, las cuales son instalaciones equipadas con monitores certificados previamente calibrados y que han acreditado normas para generar información oficial de monitoreo de calidad de aire. Aunque estas instalaciones son indispensables para fines regulatorios, su costo de adquisición, operación y mantenimiento limita la densidad espacial de las redes. Los avances tecnológicos, como la Inteligencia artificial, internet de las cosas y los sensores de bajo costo han surgido como alternativas complementarias capaz de ampliar la cobertura y describir variaciones locales, pero su desempeño depende de la calibración, la ubicación, las condiciones meteorológicas y el control de calidad de los datos (Kumar *et al.*, 2015).

En este contexto, el objetivo del artículo es analizar los principales retos asociados con la ecologización urbana y el monitoreo atmosférico, así como examinar soluciones tecnológicas basadas en sensores asequibles, conectividad, plataformas digitales y el uso de inteligencia artificial, una tecnología que se ha implementado para el monitoreo ambiental por su característica de imitación de análisis y aprendizaje similar al de los humanos, lo que ha hecho posible

el análisis de patrón de comportamiento de datos de calidad de aire. También se discute la pertinencia de desarrollar capacidades tecnológicas y proyectos estudiantiles locales para ciudades y zonas con actividad industrial.

Este documento adopta un enfoque de revisión narrativa y análisis documental descriptivo y divulgativo. Se integraron publicaciones arbitradas y documentos institucionales relacionados con: efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud, infraestructura verde y vulnerabilidad urbana, redes de monitoreo y sensores de bajo costo los que se distinguen por ser compactos, accesibles económicamente y que además son de tipo IoT (Internet of Things o Internet de las cosas) que permiten generar información ambiental en tiempo real mediante la conexión de una red local de acuerdo con las condiciones de emisión y monitoreo en México. Esta revisión tiene un alcance descriptivo y crítico.

Desarrollo

Contaminación atmosférica y efectos sobre la salud

Cada país maneja una serie de normas para la generación y concentración límite permitida de sustancias y gases contaminantes en el aire, a los que se les conoce como contaminantes criterio, entre los que se encuentran el material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} , nombradas de esa manera por su tamaño de diámetro en micras, estas partículas están compuestas principalmente de diversos materiales sólidos y gotas líquidas, el dióxido de nitrógeno (NO_2), el dióxido de azufre (SO_2), el monóxido de carbono (CO) y el ozono troposférico (O_3). El tamaño aerodinámico de las partículas determina su capacidad de penetración en el sistema respiratorio. En la Figura 1 se observa que las partículas finas pueden alcanzar regiones profundas del pulmón y contribuir a efectos sistémicos, especialmente cuando la exposición es sostenida (World Health Organization, 2021).

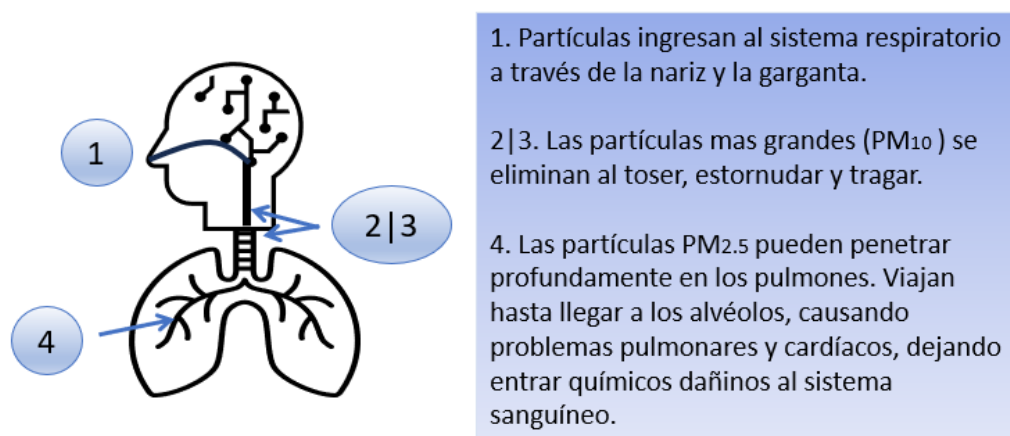


Figura 1. Consecuencias de partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el sistema respiratorio.

Nota. Adaptado de “El riesgo para la salud de las partículas en suspensión”, por Meditip, 2020. La imagen se utiliza únicamente con fines ilustrativos; el sustento científico del texto se basa en World Health Organization (2021) y Burnett *et al.* (2018). Licencia: Todos los derechos reservados (All Rights Reserved).

El Objetivo de Desarrollo Sostenible 11 plantea reducir el impacto ambiental negativo de las ciudades y considera, entre sus indicadores, los niveles medios anuales de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en áreas urbanas (United Nations, s. f.). Esta orientación reconoce que la disponibilidad de datos confiables es necesaria para evaluar políticas de prevención, alertar a la población y priorizar intervenciones en zonas de mayor exposición.

La tendencia internacional es reducir la exposición y la mortalidad atribuible a contaminantes atmosféricos. (European Environment Agency, 2025) reportó que Francia había reducido aproximadamente un 47 % la mortalidad atribuible al $PM_{2.5}$ respecto de 2005 y recordó que el objetivo europeo para 2030 es alcanzar una disminución de 55 %. Estas cifras muestran avances, pero también evidencian la necesidad de sostener políticas de reducción de emisiones y sistemas de vigilancia capaces de identificar desigualdades territoriales.

Ecologización urbana, equidad y participación social

La infraestructura verde puede contribuir a la adaptación climática, el bienestar, la reducción de la huella de carbono y la construcción de entornos urbanos más habitables. No obstante, sus beneficios dependen de la planificación territorial, la continuidad del mantenimiento y la distribución equitativa de los espacios verdes. Las poblaciones vulnerables suelen estar más expuestas a los efectos del cambio climático y a déficits de infraestructura ambiental, por lo que la ecologización urbana, debe incorporar criterios de justicia espacial y acceso público (Aslanoglu *et al.*, 2025).

Desde una perspectiva de gestión, los proyectos requieren coordinación entre autoridades, especialistas, instituciones educativas y comunidades. La implementación de proyectos de monitoreo de calidad del aire no es una actividad exclusivamente técnica, debido a que los dispositivos de monitoreo son empleados para sustentar científicamente el éxito de la implementación de proyectos de infraestructura verde, al monitorear la calidad de aire en zonas donde se haya implementado infraestructura verde, se puede determinar si la flora empleada es la adecuada y que zonas requieren mayor implementación de proyectos de ecologización urbana, además el mantener datos de registro histórico de monitoreo de gases contaminantes en el aire permite que el gobierno emplee estos datos como base para desarrollar normas de salud ambiental.

La equidad de participación social y gubernamental representan algunos de los principales retos para la implementación de ecologización urbana, como se muestra en la Figura 2. La participación social no debe limitarse a la consulta; puede aportar conocimiento sobre fuentes locales de contaminación, zonas de tránsito, actividades temporales y lugares de exposición que no siempre aparecen en bases de datos convencionales, de esta manera la comunidad puede participar con expertos para diseñar estrategias ecológicas. La incorporación de conocimiento comunitario ha mostrado utilidad para mejorar algunos modelos espaciales de contaminación y para interpretar episodios de corta duración (Gardner-Frolick, 2025).



Figura 2. Síntesis de retos y soluciones para la ecologización urbana.

Nota. Adaptado de "Urban greening for climate resilient and sustainable cities: grand challenges and opportunities", por Kumar *et al.* (2025), *Frontiers in Sustainable Cities*, 7, 1595280, Figura 1. <https://doi.org/10.3389/frsc.2025.1595280>. Licencia CC BY.

Monitoreo de la calidad del aire en México

El Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019 sistematizó información de ciudades y zonas metropolitanas mexicanas y mostró una cobertura territorial desigual. El mapa incluido en ese informe como se muestra en la Figura 3, identifica 83 ciudades y zonas metropolitanas con alguna capacidad de monitoreo para el año de referencia 2018, además de entidades con equipos sin diagnóstico actualizado y estados sin infraestructura de monitoreo atmosférico (Instituto

Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2020). Esta heterogeneidad limita la comparación regional y reduce la disponibilidad de información en zonas que también presentan actividad industrial relevante.

Altamira y la zona sur de Tamaulipas constituyen un caso relevante por su carácter portuario, petroquímico e industrial. Antonio Durán *et al.* (2025) documento emisiones atmosféricas asociadas con las actividades marítimas del puerto y señalaron la coexistencia de diversas fuentes, entre ellas embarcaciones, vehículos terrestres, industria química, generación eléctrica y otros procesos industriales. En este tipo de entorno, una red de monitoreo con mayor resolución espacial puede apoyar la identificación de patrones locales; sin embargo, la interpretación de los datos debe considerar la ubicación de los sensores, la meteorología y la contribución simultánea de múltiples fuentes.

Ciudades y zonas metropolitanas con monitoreo de calidad del aire en México (2018).

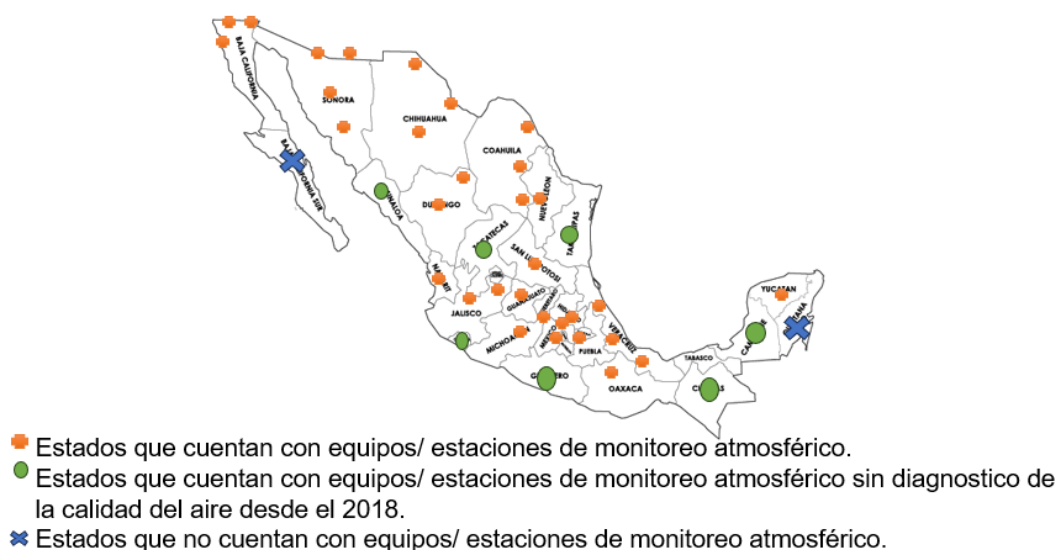


Figura 3. Ciudades y zonas metropolitanas con monitoreo de calidad del aire incluidas en el Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019.

Nota. Adaptado de "Figura RE.2 Ciudades y zonas metropolitanas con monitoreo de calidad del aire en México (2019)", del informe Nacional de la Calidad del Aire 2019, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC] (2020). Derechos de autor/ obra institucional del Gobierno de México-INECC. Sin licencia Creative Commons explícita.

Soluciones tecnológicas para ampliar la vigilancia ambiental

La convergencia de microelectrónica, internet de las cosas (IoT), computación en la nube, plataformas web, imágenes satelitales e inteligencia artificial permite construir sistemas de monitoreo más flexibles. En una arquitectura típica, los sensores registran variables ambientales, un microcontrolador procesa y transmite los datos, una base de datos conserva las observaciones y una interfaz digital facilita la consulta de los datos, conformando en conjunto un sistema de monitoreo. Estos sistemas pueden utilizarse con fines educativos, comunitarios, exploratorios y de apoyo a la investigación, siempre que se documente su incertidumbre y se evite presentar mediciones indicativas como equivalentes a datos regulatorios.

Como se muestra en la Tabla 1, algunos estudios recientes se han enfocado en diferentes variables y contaminantes (Ali, 2022) propuso un marco IoT para ciudades inteligentes capaz de integrar mediciones de humedad, emisiones de carbono, temperatura, humo, sonido y partículas. (Rowley & Karakuş, 2023) combinaron datos de estaciones terrestres con información satelital para estimar Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Ozono (O₃) y Material Particulado (PM₁₀) mediante un modelo de inteligencia artificial multimodal. Estos enfoques muestran que la ampliación de cobertura no depende únicamente de instalar más sensores, sino también de integrar fuentes de datos heterogéneas y métodos analíticos apropiados.

En Canadá, (Gardner-Frolick *et al.*, 2025) desplegaron una red comunitaria de bajo costo para medir Monóxido y Dióxido de Nitrógeno (NO, NO₂) y Material Particulado (PM_{2.5}) en Vancouver. El estudio complementó el análisis temporal y espacial con encuestas, reportes de olores y mapeo participativo, lo que permitió identificar fuentes informales o transitorias. En México, (Rodríguez-Trejo *et al.*, 2025) desarrollaron la Estación de Monitoreo Geoambiental, capaz de medir partículas y otras variables ambientales, transmitir datos y visualizarlos en una plataforma web. Por su parte, (Mubeen *et al.*, 2025) emplearon modelos de inteligencia artificial para evaluar y pronosticar la calidad del aire en cuatro regiones de China.

Tabla 1. Estudios relacionados con tecnologías de monitoreo y análisis de la calidad del aire

Estudio	Año	Variables o contaminantes
Ali A.	2022	Humedad, Dióxido de Carbono (CO ₂), temperatura, humo, sonido y Material Particulado (PM).
Rowley y Karakuş	2023	Dióxido de Nitrógeno (NO ₂), Ozono (O ₃) y Material Particulado (PM ₁₀).
Gardner-Frolick <i>et al.</i>	2025	Monóxido de Nitrógeno (NO), Dióxido de Nitrógeno (NO ₂) y Material Particulado (PM _{2.5}).
Mubeen <i>et al.</i>	2025	Material Particulado (PM _{2.5}), Dióxido de azufre (SO ₂), Dióxido de Nitrógeno (NO ₂), NH ₃ , carbono negro, también conocido como hollín y Ozono (O ₃).
Rodríguez-Trejo <i>et al.</i>	2026	Material Particulado (PM _{1.0} , PM _{2.5} , PM ₁₀), temperatura, humedad, presión, ruido y campo magnético.

Nota. Elaboración propia con base en Ali (2022), Rowley y Karakuş (2023), Gardner-Frolick *et al.* (2025), Mubeen *et al.* (2025) y Rodríguez-Trejo *et al.* (2026). Las variables y enfoques no son directamente comparables porque los estudios difieren en objetivos, escalas, sensores, periodos y procedimientos de validación.

Propuesta proyecto estudiantil MB01-ICA para el contexto de Altamira

A partir de estos retos identificados, se han desarrollado proyectos estudiantiles como MB01-ICA que se concibe como una propuesta local de monitoreo indicativo para Altamira, Tamaulipas. Su propósito es integrar electrónica ambiental usando sensores electroquímicos de la serie tipo MQ, un sensor de humedad y temperatura y un sensor de dispersión laser de tipo plantower, para la adquisición de los siguientes parámetros: humedad, temperatura, partículas PM_{1.0}, 2.5, 10, Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂), Amoníaco (NH₃), Alcohol, Sulfuro (S₂), Benceno (C₆H₆) y Óxido de nitrógeno (NO_x), además este monitor esta conectado a la nube para generar datos en tiempo real, los cuales pueden ser descargados mediante un URL en un archivo de tipo .CSV o consultados mediante una página web para facilitar la consulta de esta información de manera equitativa a la sociedad lo que permite fortalecer la cultura ambiental. La pertinencia del proyecto radica en acercar la medición a espacios donde una estación de referencia no ofrece suficiente resolución microterritorial y no se tienen oportunidades de aprendizaje sobre sensores, bases de datos y visualización de información ambiental.

No obstante, el desarrollo de un dispositivo de bajo costo como el propuesto debe acompañarse de una calibración de sensores de acuerdo con las condiciones del contexto donde se implemente, un estudio de repetibilidad, un cotejo de las lecturas con un equipo de referencia, documentación de límites de detección, evaluación de la influencia de temperatura y humedad en la concentración de gases contaminantes e implementación de un protocolo de validación, en donde se desarrolle una estimación de error mediante pruebas estadísticas antes de utilizar los datos generados para emitir recomendaciones sanitarias o sustentar decisiones regulatorias. En consecuencia, MB01-ICA debe presentarse inicialmente como herramienta educativa, exploratoria y complementaria, que permite a los estudiantes adquirir conocimientos de desarrollo de sistemas embebidos desarrollados para su implementación en entornos urbanos y no como sustituto de una estación certificada, debido a que es un proyecto que se encuentra en una fase de desarrollo con un prototipo inicial. (Kumar *et al.*, 2015) (Rodríguez-Trejo, 2025)

Conclusiones

El monitoreo de la calidad del aire es indispensable para comprender la exposición de la población, identificar zonas críticas y evaluar políticas de prevención. Las estaciones regulatorias siguen siendo la referencia para garantizar

precisión y comparabilidad, pero su limitada densidad espacial justifica explorar redes complementarias de sensores de bajo costo. La evidencia revisada muestra que estas redes pueden ampliar la cobertura, aportar información a escala comunitaria e integrarse con modelos espaciales, imágenes satelitales e inteligencia artificial.

La tecnología, por sí sola, no resuelve los problemas de contaminación atmosférica. Su utilidad depende de la calibración, la gobernanza de los datos, la transparencia metodológica, la continuidad operativa y la capacidad de convertir la información en acciones. Asimismo, la ecologización urbana y la participación comunitaria deben incorporarse como componentes de una estrategia integral, con prioridad para territorios y grupos expuestos a mayores riesgos.

En algunos estados de México, particularmente en el sur de Tamaulipas, la coexistencia de actividad portuaria, industrial y vehicular refuerza la necesidad de contar con información local. El desarrollo de MB01-ICA puede contribuir a la formación tecnológica y a la sensibilización ambiental, siempre que sus resultados se comuniquen con prudencia y se establezca un proceso formal de validación. La principal aportación del proyecto no debe medirse únicamente por la fabricación de un dispositivo, sino por su capacidad para producir datos trazables, comprensibles y útiles para la comunidad.

Bibliografía

- Ali, A. (2022). A framework for air pollution monitoring in smart cities by using IoT and smart sensors. *Informatica*, 46(5). <https://doi.org/10.31449/inf.v46i5.4003>
- Antonio Durán, R. E., Sosa Echeverría, R., Fuentes García, G., César Valdez, E., Cortez-Huerta, M., & Kahl, J. D. W. (2025). Atmospheric emissions from maritime activities in Altamira, Gulf of Mexico. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22, 11859–11876. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06352-1>
- Aslanoglu, R., Kazak, J. K., Szewrański, S., Świąder, M., Arciniegas, G., Chrobak, G., Jakóbiak, A., & Turhan, E. (2025). Ten questions concerning the role of urban greenery in shaping the future of urban areas. *Building and Environment*, 267(Part A), 112154. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112154>
- Burnett, R., Chen, H., Szyszkowicz, M., Fann, N., Hubbell, B., Pope, C. A., III, Apte, J. S., Brauer, M., Cohen, A., Weichenthal, S., Coggins, J., Di, Q., Brunekreef, B., Frostad, J., Lim, S. S., Kan, H., Walker, K. D., Thurston, G. D., Hayes, R. B., ... Spadaro, J. V. (2018). Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(38), 9592–9597. <https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115>
- European Environment Agency. (2025). *Health impacts of air pollution: France*. <https://www.eea.europa.eu/en/europe-environment-2025/countries/france/health-impacts-of-air-pollution>
- Gardner-Frolick, R., Jain, S., Martinussen, N., Chambliss, S., Jackson, D., Zimmerman, N., & Giang, A. (2025). Incorporating community knowledge into analysis of air quality monitoring network data. *GeoHealth*, 9(7), e2025GH001378. <https://doi.org/10.1029/2025GH001378>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2020). *Informe nacional de la calidad del aire 2019, México*. Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2019.pdf>
- Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., Bell, M., Norford, L., & Britter, R. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment International*, 75, 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019>
- Kumar, P., Sahani, J., Corada Perez, K., Ahlawat, A., Andrade, M. F., Athanassiadou, M., Cao, S.-J., Collins, L., Dey, S., Di Sabatino, S., Halios, C. H., Harris, F., Horton, C., Inostroza, L., Jones, L., Rodding Kjeldsen, T., McCallan, B., McNabola, A., Kumar Mishra, R., ... Yao, R. (2025). Urban greening for climate resilient and sustainable cities: Grand challenges and opportunities. *Frontiers in Sustainable Cities*, 7, 1595280. <https://doi.org/10.3389/frsc.2025.1595280>
- Maldonado, E., & Aguirre, P. (2024). *Calidad de aire y sostenibilidad: Revisión de la contaminación atmosférica por PM2.5 en ciudades de América Latina y Europa* (Working Paper Series Puentes Interdisciplinarios, Serie 2, No. 06). Centro Interdisciplinario de Estudios Latinoamericanos. <https://doi.org/10.48565/bonndoc-222>
- Meditip. (2020, 23 de abril). *El riesgo para la salud de las partículas en suspensión*. <https://www.meditip.lat/salud-de-la-a-z/enfermedades-respiratorias/riesgo-para-la-salud-de-las-particulas-en-suspension/>
- Mubeen, M., He, S., Rahman, M. S., Wang, L., Zhang, X., Ahmed, B., He, Z., & Han, Y. (2025). Smart prediction and optimization of air quality index with artificial intelligence. *Journal of Environmental Sciences*, 158, 761–775. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2025.02.041>
- Rodríguez-Trejo, A., Ibarra-Ortega, H. E., Böhnelt, H., & Escalante-González, J. (2026). Estación de monitoreo geoambiental (EMGA): Dispositivo de monitoreo ambiental en tiempo real con sensores de bajo costo para entornos urbanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 41, 55355. <https://doi.org/10.20937/RICA.55355>
- Rowley, A., & Karakuş, O. (2023). Predicting air quality via multimodal AI and satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 293, 113609. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113609>
- United Nations. (s. f.). *Ciudades*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>