

POTENCIAL DE UN SISTEMA DE BAJO COSTO PARA MEDIR LA CALIDAD AMBIENTAL INTERIOR EN CLIMAS EXTREMOS LATINOAMERICANOS HACIA LA EQUIDAD ENERGÉTICA

Recibido 07/08/2024
Aceptado 02/12/2024

POTENTIAL OF A LOW-COST SYSTEM FOR MEASURING INDOOR ENVIRONMENTAL QUALITY IN LATIN AMERICAN EXTREME CLIMATES TOWARDS ENERGY EQUITY

POTENCIAL DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA MEDIR A QUALIDADE AMBIENTAL INTERIOR EM CLIMAS EXTREMOS DA AMÉRICA LATINA VISANDO A EQUIDADE ENERGÉTICA

Claudia Eréndira Vázquez-Torres

Doctora en Arquitectura
Posdoctorante de la Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Modelado y Optimización de Procesos Energéticos y Ambientales
Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México
<https://orcid.org/0000-0002-5388-0780>
claudia.vazquez@correo.uady.mx (Autor de Correspondencia)

Renán Gabriel Quijano-Cetina

Doctor en Ingeniería
Profesor Investigador, Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México
<https://orcid.org/0000-0001-9515-9249>
renan.quijano@correo.uady.mx

Israel Sánchez-Domínguez

Doctor en Ingeniería
Técnico Académico Titular B TC, Unidad Académica del IIMAS en Yucatán
Universidad Nacional Autónoma de México, Mérida, México
<https://orcid.org/0000-0002-7040-9552>
israel.sanchez@iimas.unam.mx

Bassam Ali

Doctor en Ingeniería
Profesor Investigador, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Modelado y Optimización de Procesos Energéticos y Ambientales
Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México
<https://orcid.org/0000-0001-7526-6952>
baali@correo.uady.mx



RESUMEN

La salud pública presenta retos multidisciplinares que implican una combinación entre el bienestar físico, mental y social. Dos limitaciones para cuantificar los contaminantes en interiores (gases, compuestos químicos y partículas en suspensión) son el elevado coste comercial y la complejidad de los sistemas de medición disponibles. En este escenario, se utilizó un enfoque experimental para desarrollar un sistema con sensores de bajo coste para medir variables que influyen en la salud humana y ambiental. Los procesos de calibración, validación y ajuste técnico se realizaron en una localidad de clima extremo en el sur de México, bajo estándares nacionales e internacionales. Los resultados principales mostraron la viabilidad del uso de herramientas de bajo coste para medir contaminantes en países en vías de desarrollo. El 57 % de los datos de H₂S mostraron un rendimiento superior a 150 ppm, lo que se considera perjudicial para la salud humana. Por otro lado, el proceso de desarrollo del sistema de medición en la localidad de estudio demostró la importancia de disponer de datos para medir los niveles de contaminación ambiental según los hábitos y costumbres de cada región. Los sensores y sistemas de acceso abierto se utilizaron para beneficiar directamente a investigadores con recursos limitados y a los sectores público y privado interesados en medir variables medioambientales y de confort para promover el acceso universal al conocimiento.

Palabras clave

sistema de medición ambiental, sensores de bajo costo, calidad ambiental interior, medición de contaminantes.

ABSTRACT

Public health has multidisciplinary challenges involving a combination of physical, mental, and social welfare. Two limitations to quantifying indoor pollutants (gases, chemical compounds, and suspended particles) are the high cost and the complexity of available measurement systems. Under this scenario, an experimental approach was used to develop a low-cost system to measure variables that affect human and environmental health. Calibration, validation, and technical adjustment processes were conducted in an extreme-climate location in southern Mexico, following domestic and international standards. The key results showed the feasibility of using low-cost tools to measure pollutants in developing countries. 57% of the data for H₂S had a result above 150 ppm, which is considered harmful to human health. On the other hand, developing the measurement system in the studied locality showed the importance of having data to measure environmental pollution levels according to each region's habits and customs. Sensors and open access systems were used as these can directly benefit resource-constrained researchers and the public and private sectors interested in measuring environmental and comfort variables to promote universal access to knowledge.

Keywords

environmental measurement system, low-cost sensors, indoor environmental quality, pollutant measurement.

RESUMO

A saúde pública apresenta desafios multidisciplinares que envolvem uma combinação de bem-estar físico, mental e social. Duas limitações para a quantificação de poluentes internos (gases, compostos químicos e partículas em suspensão) são o alto custo e a complexidade dos sistemas de medição disponíveis. Neste cenário, uma abordagem experimental foi utilizada para desenvolver um sistema de baixo custo para medir variáveis que afetam a saúde humana e ambiental. Os processos de calibração, validação e ajuste técnico foram realizados em um local de clima extremo no sul do México, seguindo padrões nacionais e internacionais. Os principais resultados mostraram a viabilidade do uso de ferramentas de baixo custo para medir poluentes em países em desenvolvimento. 57% dos dados relativos ao H₂S tiveram um resultado acima de 150 ppm, o que é considerado prejudicial à saúde humana. Por outro lado, o desenvolvimento do sistema de medição na localidade estudada mostrou a importância de contar com dados para medir os níveis de poluição ambiental de acordo com os hábitos e costumes de cada região. Foram utilizados sensores e sistemas de acesso aberto, pois podem beneficiar diretamente pesquisadores com recursos limitados e os setores público e privado interessados em medir variáveis ambientais e de conforto para promover o acesso universal ao conhecimento.

Palavras-chave:

sistema de medição ambiental, sensores de baixo custo, qualidade ambiental interna, medição de poluentes

INTRODUCCIÓN

En América Latina, las personas pasan cantidades considerables de tiempo en interiores, lo que hace que la calidad ambiental interior (IEQ, en inglés) sea vital para la salud y la productividad (Nilandita et al., 2019). Muchas de ellas experimentan una mala calidad del aire interior, lo que se asocia con diversos problemas de salud, como el síndrome del edificio enfermo y un rendimiento cognitivo reducido en entornos educativos. (Khalil & Kamoona, 2022), y se ha visto que los factores ambientales contribuyen a entre el 25% y el 33% de estos problemas de salud en todo el mundo (Instituto Nacional de Salud Pública, 2022). Además, se ha visto que la exposición al dióxido de azufre (SO₂) puede dañar las vías respiratorias de los asmáticos (Nurhisana & Hasyim, 2022). En este sentido, Mentese et al. (2020) identificaron una correlación entre contaminantes interiores y variables de confort con síntomas respiratorios, donde la persistencia de estos contaminantes interiores está influenciada por las condiciones climáticas y las características del edificio. (Enyoh et al., 2020). En consecuencia, las estrategias de mitigación dependen de los contaminantes específicos, los métodos de construcción y las políticas energéticas vigentes. La investigación ha resaltado la necesidad de tener sistemas de monitoreo efectivos, lo que indica que el aire interior a menudo puede estar más contaminado que el aire exterior, enfatizando la necesidad de soluciones sólidas para abordar estos riesgos (Kim & Sohanchyk, 2022).

El potencial de los sistemas de bajo costo (LCS, en inglés) para medir la IEQ en interiores en climas extremos en América Latina es un problema apremiante. A medida que la urbanización continúa aumentando en América Latina, la calidad del aire interior se ha convertido en una preocupación importante, con implicaciones para la salud pública y la eficiencia energética. La interacción entre la calidad del aire interior (IAQ, en inglés) y la eficiencia energética es compleja, y lograr una IAQ óptima a menudo entra en conflicto con las medidas de ahorro de energía. (Dabanlis et al., 2023). Esto es particularmente relevante en climas extremos donde las estrategias de ventilación deben equilibrarse cuidadosamente para evitar exacerbar los niveles de contaminación interior (Tran et al., 2020). Los principales contaminantes del medio ambiente se dividen en gases (CO, CO₂), compuestos químicos (CH₂O, NO₂), y material particulado (MP). Al reaccionar con óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos orgánicos volátiles también pueden afectar la salud del edificio y de sus usuarios a corto y largo plazo (Jung et al., 2021). Mientras tanto, el SO₂ y los NO_x son responsables de la lluvia ácida y la contaminación del aire en las zonas urbanas. Por otro lado, NO₂ en combinación con el MP₁₀ aumenta la morbilidad en pacientes con enfermedades crónicas cardíacas y de las vías respiratorias altas (Secretaría de Salud, 2019). Finalmente, está el dióxido de carbono (CO₂), un gas incoloro, inodoro e insípido de la combustión completa

del carbono y la respiración biológica (Administración de Seguridad y Salud Ocupacional [OSHA], 2015). En resumen, el potencial de un LCS para medir la IEQ en climas extremos en América Latina no es solo una cuestión de salud pública, sino también un paso crítico hacia el logro de la equidad energética.

Jung et al. (2021) descubrieron que el costo es una limitación para medir los contaminantes de interiores, especialmente en países en desarrollo con bajos recursos de investigación. Aunque se han desarrollado sistemas para medir el MP y las concentraciones de gases utilizando placas de desarrollo (Arduino, Raspberry Pi, etc.) (Kalia & Ansari, 2020), se ha demostrado que la exposición a la contaminación es mayor cuando están presentes factores como la pobreza y la segregación (Burbank et al., 2023). Las condiciones de salud tienen limitaciones adicionales, dada la falta de información sobre la presencia de contaminantes en el ambiente interior y exterior, el cambio climático y otros problemas. García et al. (2013) estudiaron los niveles de contaminación en Guadalajara, México, y encontraron concentraciones más altas de SO₂ después de la temporada de lluvias. Los diversos climas de México, que van desde áridos hasta tropicales, afectan significativamente la IEQ y la salud pública. Por ende, la implementación de sistemas de medición puede empoderar a las comunidades, especialmente en áreas de bajos ingresos, para mejorar proactivamente sus condiciones de vida, promoviendo así la equidad energética y la salud pública (Koengkan et al., 2020).

La situación económica en México refuerza la necesidad de soluciones de bajo costo, ya que muchos hogares enfrentan limitaciones financieras. Así, el desarrollo de sistemas asequibles promovería una adopción generalizada, permitiendo a las comunidades monitorear y mejorar su IEQ sin costos significativos (Nugroho et al., 2016). Esta perspectiva es crucial para la equidad energética, ya que los hogares de bajos ingresos a menudo soportan mayores gastos energéticos y peores condiciones de vida, lo que agrava los problemas de salud relacionados con una IEQ inadecuada. (Balza et al., 2024). El LCS también podría mejorar la comprensión de la conexión entre los factores ambientales interiores y los resultados de salud, ayudando a identificar fuentes de contaminación e informar las intervenciones de salud pública, beneficiando en última instancia a las poblaciones vulnerables (Ginebreda & Barceló, 2022). Sin embargo, en los países latinoamericanos, los autores no pudieron encontrar un LCS que integre la medición de gases, compuestos químicos, material particulado y variables de confort térmico en un mismo sistema. Por esta razón, es importante generar nuevas alternativas que cumplan con los requisitos nacionales.

El objetivo principal fue evaluar un sistema integral de monitoreo de bajo costo, utilizando tecnología actual, y validar su desempeño técnico en un proyecto de vivienda social en condiciones climáticas extremas en México,

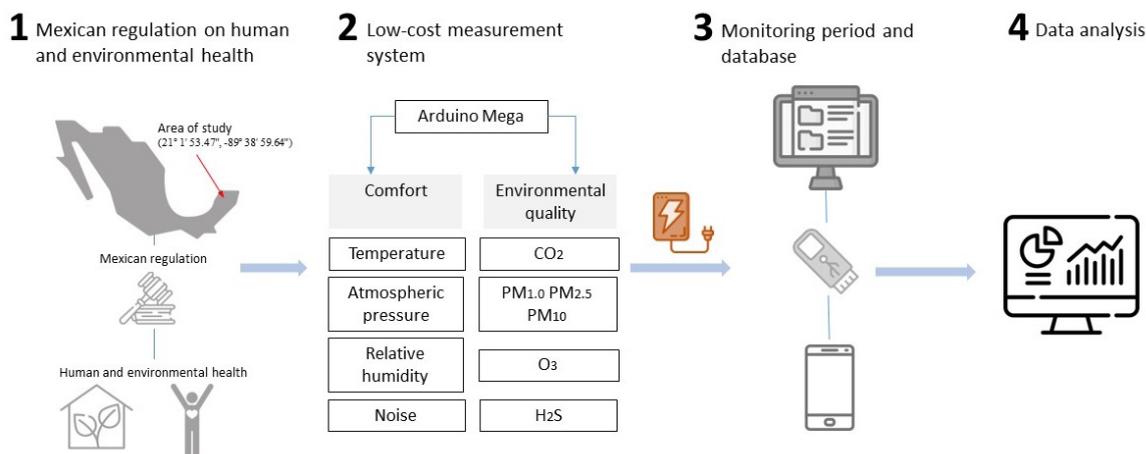


Figura 1. Desarrollo metodológico para el sistema de medición. Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 1. Recomendaciones regulatorias para los principales contaminantes ambientales. Fuente: Elaboración de los autores.

Contaminante	Estándar mexicano	OMS (Organización Mundial de la Salud, 2021)	NAAQS / EPA (Agencia de Protección Ambiental, 2022)
CO	26 ppm (1 hora) (Secretaría de Salud, 2021b)	4 mg/m ³ 4 h)	35 ppm/h*
NO ₂	0,106 ppm (1 hora) (Secretaría de Salud, 2022a)	25 µg/m ³ (24 h)	0,05 ppm (1 año)
SO ₂	0,11 ppm (24 hora) (Secretaría de Salud, 2019)	40 µg/m ³ (24 h)	0,14 ppm (24 h)
MP	MP2,5 45 µg/m ³ (24 horas)	MP2,5 15 µg/m ³ (24 horas)	MP2,5 35 µg/m ³ (24 horas)
	MP10 75 µg/m ³ (24 horas) (Secretaría de Salud, 2022b)	MP10 45 µg/m ³ (24 horas)	MP10 150 µg/m ³ (24 horas)
O ₃	0,09 ppm (1 h) (Secretaría de Salud, 2021a)	60 µg/m ³ temporada alta	0,07 ppm (8 horas)
Pb	0,5 µg/m ³ (1 año) (Secretaría de Salud, 2021c)	-	0,15 µg/m ³ **

* No debe excederse esta concentración una vez al año

** promedio de 3 meses

como es el caso de Mérida, Yucatán, México. Este estudio servirá de guía para el control ambiental en estos espacios con pobreza energética y vulnerabilidad. Las mediciones obtenidas fueron evaluadas bajo los criterios de las normas mexicanas. En resumen, desarrollar un LCS para medir la IEQ en México es crucial no solo desde el punto de vista económico, sino también para la salud pública, la equidad energética y la sostenibilidad.

METODOLOGÍA

Se empleó un método experimental con las siguientes fases (Figura 1):

1. Revisión de las regulaciones vigentes de salud ambiental para edificios (nacionales e internacionales).
2. Colocación de sensores de bajo costo para las variables de IEQ en un recipiente con orificios de 2 pulgadas en todos los lados para permitir el flujo de aire.

3. Periodo de monitoreo y creación de una base de datos. La ubicación es un desarrollo urbano representativo del sur de México (Figura 1). El sistema de medición se colocó en el hall de entrada, punto clave para el intercambio de condiciones climáticas internas y externas. El período de monitoreo consideró el tiempo que le toma a todos los sensores tener una lectura válida. La frecuencia de muestreo fue de 20 minutos, y las mediciones se registraron del 22-09-2023 al 22-10-2023.
4. Análisis de los resultados.

REGULACIONES DE SALUD AMBIENTAL PARA EDIFICIOS

La Tabla 1 presenta estándares nacionales e internacionales que establecen límites y recomendaciones para contaminantes interiores. La Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2019 (Secretaría de Salud, 2019) sobre la salud ambiental establece un máximo de 0,075 ppm



Figura 2. Diagrama de sensores utilizados en el LCS. Fuente: Elaboración de los autores.

por hora en un promedio aritmético de 3 años para SO_2 , o 0,04 ppm diarias como máximo durante tres años consecutivos. La Norma Oficial Mexicana (Secretaría de Salud, 2022b) establece valores permisibles para MP_{10} y $MP_{2,5}$. El O_3 puede causar una reducción considerable en los rendimientos de los cultivos agrícolas. (Secretaría de Salud, 2021a). Las Pautas de Calidad del Aire (Organización Mundial de la Salud, 2021) se basan en una evaluación global y regional de las enfermedades causadas por la contaminación del aire. Estos niveles no son obligatorios, pero se consideran una referencia para la IEQ. La Tabla 1 resume las recomendaciones de concentración de contaminantes de las normas mexicanas e internacionales.

Los niveles de CO_2 indican la calidad del aire porque un exceso de este compuesto químico puede convertirse en un gas asfijante. ASHRAE (2024) sugiere que los niveles de CO_2 interior no deben superar las 1000 ppm (ASHRAE, 2024; Gangwar et al., 2024). Mientras tanto, la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional establece un límite de 5000 ppm en 8 horas y 2 ppm cada 15 minutos para el formaldehído (OSHA, 2015). En México, se han establecido límites máximos de concentración para los siguientes contaminantes en el aire ambiente: ozono, monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, plomo, material particulado total y material particulado menor a de 10 y 2,5 micrómetros (Secretaría de Salud, 2021a).

DESARROLLO DE SISTEMAS DE BAJO COSTO

El desarrollo del prototipo consideró las etapas que se describen a continuación.

- Selección del sistema. La selección y adquisición se basan en análisis regionales personalizados y en la disponibilidad de mercado para medir variables de IEQ

como gases, componentes químicos, MP y niveles de ruido.

- Calibración.
- Ajustes y validación.
- Análisis de resultados.

La Figura 2 muestra los sensores y los componentes del sistema de medición. El LCS redujo el costo de los equipos de medición comerciales para registrar las mismas variables ambientales en aproximadamente un 85%, lo que resultó en un costo total de USD \$350.

CALIBRACIÓN

La calibración consistió en configurar el sistema de medición para una casa en el sur de México, coordenadas (21° 1' 53.47", -89° 38' 59.64"). La ubicación experimenta una temperatura media anual de 33,6 °C (Sistema Meteorológico Nacional, 2020). Tiene una humedad relativa anual típica del 73% y una irradiación solar anual promedio de 233,5 W/m² (Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos, 2023). Las características térmicas extremas de la localidad determinaron el interés por este sitio. Se utilizó equipo de monitoreo comercial con certificados de calibración para validar las mediciones de los sensores del LCS. En esta sección se presenta la calibración de la variable de humedad relativa como ejemplo. El procedimiento descrito fue muy similar y, en muchos casos, fue el mismo que se utilizó para todas las variables medidas por el LCS. Primero, el sensor BME280 de bajo costo, capaz de proporcionar mediciones de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica, se conectó a la placa de desarrollo Arduino Mega de código abierto y se configuró para tomar lecturas de humedad relativa cada 10 segundos. El promedio de estas lecturas se almacenó cada 5 minutos. La frecuencia de muestreo se seleccionó para coincidir con la configuración del sistema de adquisición de datos HOBO U12-012, utilizado

Tabla 2. LCS (BME280) e instrumento de referencia (HOBO U12-012). Fuente: Elaboración de los autores.

Sensor	Marca	Rango de medición	Precisión	Resolución
BME280	BOSCH	0 – 100 %	±3%	0,008 %
HOBO U12-012	Inicio	5 – 95 %	±2,5%	0,05 %

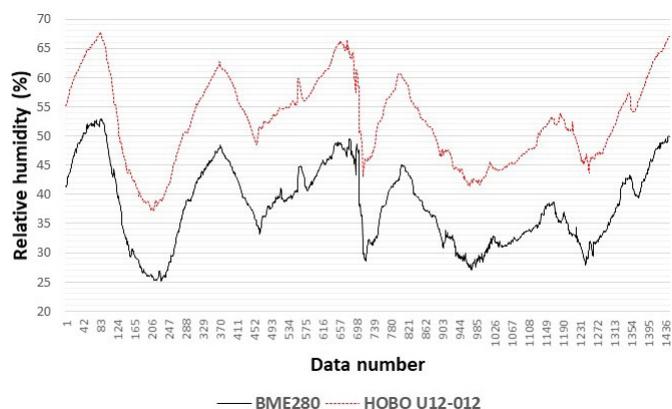


Figura 3. Mediciones de humedad relativa según el LCS y el instrumento de referencia. Fuente: Elaboración de los autores.

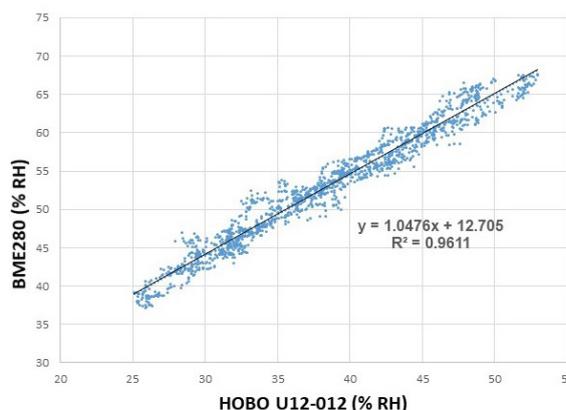


Figura 4. Gráfica de regresión lineal de mínimos cuadrados del LCS y la referencia. Fuente: Elaboración de los autores.

como instrumento de referencia para la calibración. Las principales características del LCS y del instrumento de referencia se muestran en la Tabla 2.

El proceso de calibración se realizó mediante el método de "Referencia calibrada" (Nicholas J. V. y White D. R., 2001). Este método consiste en comparar las mediciones del dispositivo que se está probando (DTU) con las mediciones de un instrumento calibrado, que debe estar certificado, y su calibración debe ser trazable a estándares nacionales e internacionales. Así, ambos instrumentos se colocan en una habitación en igualdad de condiciones y se dejan medir simultáneamente. Una vez finalizado el periodo de medición, que en este caso fue de algo más de cinco días, se recogieron los datos almacenados en la memoria de cada dispositivo y se analizaron en una hoja estadística. 1445 pares de datos muestreados se representaron en relación con el tiempo para ver si se adquirieron correctamente (consulte la Figura 3).

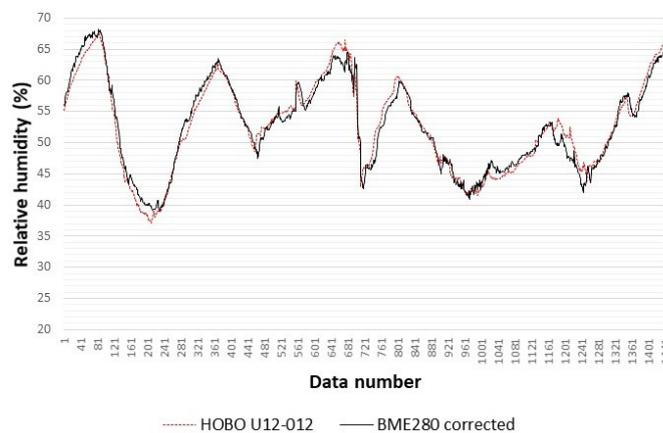


Figura 5. Comparación entre BME280 y HOBO U12-012. Fuente: Elaboración de los autores.

$$y = 1.0476x + 12.705$$

La Fig. 3 muestra que las mediciones de DTU están consistentemente por debajo de las de los instrumentos de referencia, lo que representa una compensación aproximada de -12,7 (% RH). Los datos se ajustaron en un gráfico de dispersión para regresión lineal de mínimos cuadrados. Se obtuvo una ecuación de ajuste utilizando esta regresión lineal que minimizó la sensibilidad (pendiente) y compensó los errores (ver Figura 4).

AJUSTES Y VALIDACIÓN

La ecuación de corrección se obtuvo a partir de la calibración descrita en la sección 2.3.:

Donde y es la humedad relativa (calibrada) en porcentaje y x es la medición de humedad relativa reportada por el sensor BME280. El último término de la ecuación (1) es la compensación de las mediciones del sensor de bajo costo. La ecuación (1) se aplicó a los datos del LCS BME280 para reducir el error relacionado con las mediciones del sensor comercial HOBO U12-012. Los datos corregidos, junto con los datos del sensor de referencia, se pueden ver en el gráfico de la Figura 5. A partir de este gráfico, las mediciones calibradas coinciden con el comportamiento y la magnitud del instrumento de referencia.

Al finalizar las pruebas funcionales, la calibración y la validación, se compartió el código de los sensores para promover el acceso universal al conocimiento y proporcionar retroalimentación continua para mejorar el sistema a través del siguiente enlace: <https://shorturl.at/Nzn1g>

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron 2232 resultados para cada variable medida entre el 22 de septiembre y el 22 de octubre, 2023. Las figuras 6 y 7 presentan los promedios horarios durante el período de monitoreo. Las líneas rojas punteadas representan el límite superior del modelo de confort (CM, en inglés) para la humedad relativa, la temperatura del aire y los límites reglamentarios para contaminantes (O₃, material particulado, CO₂, H₂S, y decibelios). La Figura 6a presenta el comportamiento de la temperatura con el CM adaptativo del estándar ASHRAE 55, que satisface al 80% de los usuarios (Quah, 2021). Durante el período de medición no hubo necesidades de calefacción, por lo que no fue necesario representar el límite inferior del CM. Esto fue similar para la humedad relativa, cuyo comportamiento se presenta en la Figura 6b con el límite superior del CM (entre 30% y 50%). El 85% del tiempo de monitoreo presentó necesidades de enfriamiento bajo un CM adaptativo para satisfacer al 80% de los usuarios, y el 74% de los datos se observaron por encima del CM para humedad relativa. La Figura 6c presenta los resultados para el nivel de ruido. La NOM-081-SEMARNAT-1994 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2024) establece límites de ruido de 55 dB.

La Figura 7a no muestra el límite reglamentario de la NOM-020-SSA1-2021 (Secretaría de Salud, 2021a) porque es de 0,09 ppm por hora, y no hubo valores superiores a este durante el período de monitoreo. La línea roja en la Figura 7b representa el límite de la OMS para MP_{2.5}. No hubo valores por encima de los límites recomendados por la normativa mexicana (45 y 75 micras para MP_{2.5} y MP₁₀, respectivamente). Un 3,6% del MP_{2.5} se observó por encima del límite reglamentario de la OMS. Es importante tener en cuenta que el MP_{1,0} no tiene límite de exposición reglamentario. El límite reglamentario de 500 ppm para el CO₂ en la Figura 7c se estableció para espacios al aire libre, lo cual es representativo de este estudio porque no existen regulaciones para calificar los espacios interiores. (ASHRAE, 2024).

La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional [OSHA] (2024) afirma que 100 ppm H₂S durante más de 1 hora podría generar irritación; entre 100 ppm y 150 ppm produciría el riesgo de fatiga o parálisis olfativa y aumentaría el riesgo al aumentar las horas de exposición a este gas. En el período de monitoreo, valores superiores a 150 ppm podrían poner en riesgo la salud humana (Figura 7d). El caso de estudio permitió diseñar un sistema de monitoreo que redujo en un

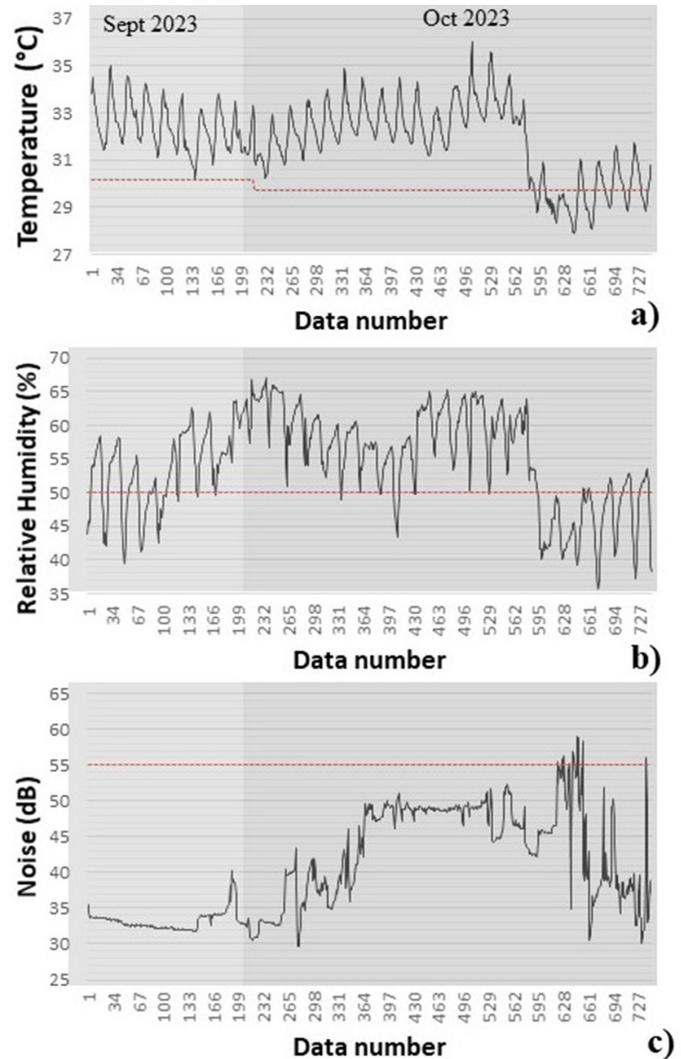


Figura 6. Resultados del período de monitoreo de variables de confort. Fuente: Elaboración de los autores.

85% el costo de los sensores comerciales para medir variables de calidad ambiental y confort. Afroz et al. (2023) enfatizaron la importancia de calibrar y validar sensores de bajo costo. Los autores documentaron la posible influencia de la humedad relativa en los sensores que miden MP_{2,5} cuando la HR está por encima del 75% debido al exceso de agua ambiental. Por otro lado, Cowell et al. (2022) monitorearon material particulado, temperatura y humedad relativa en un entorno residencial utilizando sensores por menos de USD \$126. Estos autores coincidieron en la influencia que podría tener el exceso de humedad en la precisión de los sensores. Mientras tanto, Frederickson et al. (2023) midieron el NO₂, O₃, y MP_{2,5} y utilizaron un modelo de regresión lineal para calibrar sensores de bajo costo. En este estudio, la HR estaba por debajo de los límites detectados como dañinos para el LCS. Tang y Pfrang (2023) usaron un método de regresión lineal como método de calibración para sensores de

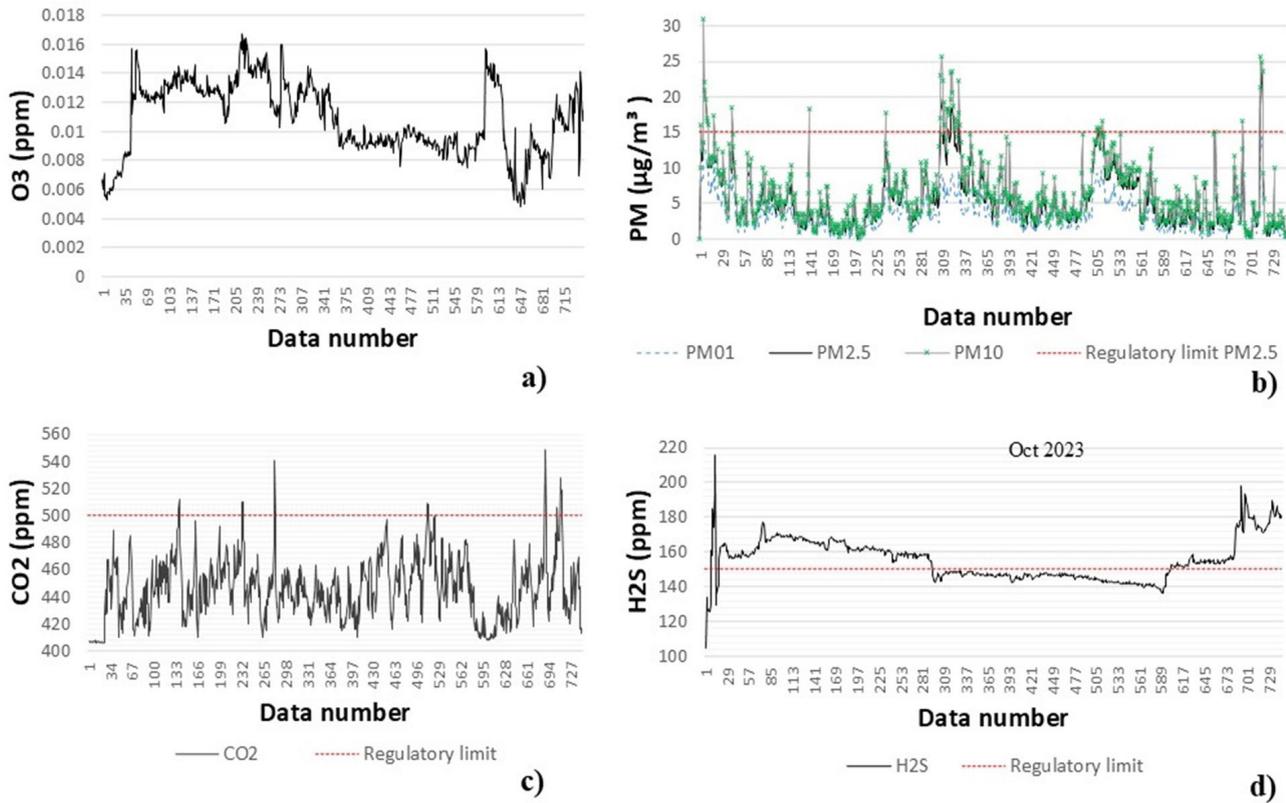


Figura 7. Resultados del periodo de monitoreo de variables IEQ (contaminantes). Fuente: Elaboración de los autores.

bajo costo para medir material particulado suspendido, con una precisión general del 70,7%. Estos autores, en este caso, recomendaron calibraciones periódicas y comparar el LCS con instrumentos de alta precisión siempre que fuera posible, criterios que coincidían con las características de este estudio.

Ortiz et al. (2022) diseñaron un sistema experimental para medir la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del aire de México. Compararon sus datos con los datos numéricos y encontraron una diferencia máxima de casi medio grado Celsius. Estos hallazgos muestran el interés en generar instrumentación adecuada para abordar el cambio climático en América Latina. Aunque el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire de México genera información en tiempo real a través de estaciones de monitoreo continuo (Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales, 2024), hay localidades en el sur con una sola estación y lagunas en la información de los últimos años. Los resultados representan un desafío a largo plazo para corroborar el funcionamiento óptimo de los sensores en su desempeño y como sistema integral. Con este fin, se debe llevar a cabo periódicamente un proceso de calibración para detectar posibles errores con prontitud.

Como área de oportunidad, extender el período de monitoreo a un año y comparar los resultados con las

bases de datos de las estaciones de monitoreo como referencia es necesario para garantizar el funcionamiento óptimo del LCS. En la siguiente etapa, se propone que los LCS se ubiquen en otros sectores y ubicaciones geográficas para ampliar el rango de influencia y la base de datos disponible. Además, el rendimiento del LCS está limitado por la precisión del instrumento de referencia utilizado durante la calibración. Finalmente, los datos históricos medidos con instrumentación confiable representan una mayor certeza sobre la presencia de contaminantes en el sector residencial en México. Los resultados ponen en perspectiva dos posibles rutas para localidades en América Latina. La primera está dirigida a los grupos de interés, quienes podrían generar estrategias efectivas para mejorar la calidad de vida de los usuarios ante el cambio climático repentino. La segunda se refiere a la educación ambiental necesaria en los países latinoamericanos, con eventos de difusión y extensión respaldados por datos precisos para informar a la población y generar conciencia hacia la adaptación informada al cambio climático.

CONCLUSIONES

Este estudio desarrolló un LCS para medir variables de calidad ambiental en edificios y validar y calibrar los

sensores en un sitio en el sur de México. Los resultados demostraron un ahorro del 85% en comparación con los sistemas de medición comerciales estándar, lo que permitió el acceso universal a la instrumentación y, en consecuencia, al conocimiento sobre la reducción de la contaminación interior de los hogares.

La implementación del LCS propuesto puede ser particularmente beneficiosa para países en vías de desarrollo como México. Las mediciones realizadas durante un mes revelaron que las características térmicas de la localidad de estudio se alinean con las de un clima extremo, destacando la necesidad de enfriamiento, incluso en un mes que no es el más cálido. Esto resalta la importancia de monitorear periódicamente los espacios residenciales para garantizar el cumplimiento de las regulaciones mexicanas, que aún requieren actualizaciones para abordar los contaminantes que carecen de límites regulatorios específicos y representan un riesgo para la salud pública.

Los resultados del mes de medición, entre septiembre y octubre de 2023, indicaron que se superaron los límites reglamentarios para varios contaminantes, lo que refuerza la necesidad de un monitoreo continuo. El LCS desarrollado en este estudio se presenta como una herramienta potencial para abordar los desafíos del cambio climático con un enfoque en la equidad social, al proporcionar datos que pueden guiar estrategias para reducir las emisiones de fuentes contaminantes dentro de los hogares. Este enfoque no solo contribuye a mejorar la IEQ, sino que también promueve la equidad energética en México, asegurando que todas las comunidades tengan acceso a los recursos necesarios para un entorno de vida más saludable. Sin embargo, la precisión del LCS desarrollado puede mejorarse si se dispone de un instrumento de referencia calibrado con un mayor nivel de precisión.

CONTRIBUCIONES DEL AUTOR – CREDIT

Conceptualización, R.G.Q.C., C.E.V.T.; Curación de datos, R.G.Q.C., C.E.V.T.; Análisis Formal, R.G.Q.C., C.E.V.T.; Adquisición de fondos, no aplicable; Investigación, C.E.V.T.; Metodología, C.E.V.T., R.G.Q.C.; Gestión de proyectos, I.S.D., A.B.; Recursos, R.G.Q.C., C.E.V.T., I.S.D., A.B.; Software, R.G.Q.C.; Supervisión, I.S.D., A.B.; Validación, RGQC; Visualización, R.G.Q.C., C.E.V.T.; Redacción-borrador original, C.E.V.T.; Redacción-revisión y edición, R.G.Q.C.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece con gratitud a CONAHCYT por una beca postdoctoral a CVU 181807.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afroz, R., Guo, X., Cheng, C. W., Delorme, A., Duruisseau-Kuntz, R. y Zhao, R. (2023). Investigation of indoor air quality in university residences using low-cost sensors. *Environmental Science: Atmospheres*, 3(2), 347–362. <https://doi.org/10.1039/d2ea00149g>
- ASHRAE. (6 de marzo, 2024). *Indoor Air Quality Guide*. Indoor Air Quality Guide. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/indoor-air-quality-guide>
- Balza, L., Castro Vargas, S., Gómez Parra, N., Jimenez Mori, R. A., Manzano, O., y Serebrisky, T. (2024). *Does Income Growth in Latin America and the Caribbean Drive Disproportionate Energy Consumption?* IDB <https://doi.org/10.18235/0012883>
- Burbank, A. J., Hernandez, M. L., Jefferson, A., Perry, T. T., Phipatanakul, W., Poole, J., y Matsui, E. C. (2023). Environmental justice and allergic disease: A Work Group Report of the AAAAI Environmental Exposure and Respiratory Health Committee and the Diversity, Equity and Inclusion Committee. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 151(3), 656–670. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2022.11.025>
- Cowell, N., Chapman, L., Bloss, W., Srivastava, D., Bartington, S., y Singh, A. (2022). Particulate matter in a lockdown home: evaluation, calibration, results and health risk from an IoT enabled low-cost sensor network for residential air quality monitoring. *Environmental Science: Atmospheres*, 3(1), 65–84. <https://doi.org/10.1039/d2ea00124a>
- Dabanlis, G., Loupa, G., Tsalidis, G. A., Kostenidou, E., y Rapsomanikis, S. (2023). The Interplay between Air Quality and Energy Efficiency in Museums, a Review. *Applied Sciences*, 13(9), 5535. <https://doi.org/10.3390/app13095535>
- Environmental Protection Agency. (2022). *Criteria Air Pollutants*. Tabla NAAQS. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>
- Enyoh, C. E., Verla, A. W., Qingyue, W., Ohiagu, F. O., Chowdhury, A. H., Enyoh, E. C., Chowdhury, T., Verla, E. N., y Chinwendu, U. P. (2020). An overview of emerging pollutants in air: Method of analysis and potential public health concern from human environmental exposure. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 28, e00107. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2020.e00107>
- Frederickson, L. B., Russell, H. S., Fessa, D., Khan, J., Schmidt, J. A., Johnson, M. S., y Hertel, O. (2023). Hyperlocal air pollution in an urban environment - measured with low-cost sensors. *Urban Climate*, 52, 101684. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101684>
- García, M. Ramírez, H., Ulloa, H., García, O., Meulenert, A., y Alcalá, J. (2013). Concentración de contaminantes SO₂, NO₂ y correlación con H₂SO₄ y NO₃ durante la temporada de lluvias en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 29(2), 81–88.
- Gangwar, M., Jamal, Y., Usmani, M., Wu, C.-Y., y Jutla, A. S. (2024). Carbon dioxide as an indicator of bioaerosol activity and human health in K-12 school systems: a scoping review of current knowledge. *Environmental Research: Health*, 2(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/2752-5309/ad1c41>
- Ginebreda, A., y Barceló, D. (2022). Data-based interpretation of emerging contaminants occurrence in rivers using a simple advection-reaction model. *Water Emerging Contaminants & Nanoplastics*, 1(3), 12. <https://doi.org/10.20517/wecn.2022.07>
- Jung, C. R., Nishihama, Y., Nakayama, S. F., Tamura, K., Isobe, T., Michikawa, T., Iwai-Shimada, M., Kobayashi, Y., Sekiyama, M., Taniguchi, Y., y Yamazaki, S. (2021). Indoor air quality of 5,000 households and its determinants. Part B: Volatile organic compounds and inorganic gaseous pollutants in the Japan Environment and Children's study. *Environmental Research*, 197, 111135. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111135>

- Kalia, P., y Ansari, M. A. (2020). IOT based air quality and particulate matter concentration monitoring system. *Materials Today: Proceedings*, 32(3), 468–475. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.179>
- Khalil, N. A., y Kamoona, G. M. I. (2022). The Effect of Indoor Air Quality in University Classrooms on the Immunity of Its Occupants. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 17(8), 2453–2461. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.170813>
- Kim, S., y Sohanchyk, G. (2022). Exploring Children's Engagement in Monitoring Indoor Air Quality: Longitudinal Study. *JMIR Formative Research*, 6(1), e32404. <https://doi.org/10.2196/32404>
- Koengkan, M., Poveda, Y. E., y Fuinhas, J. A. (2020). Globalisation as a motor of renewable energy development in Latin America countries. *GeoJournal*, 85(6), 1591–1602. <https://doi.org/10.1007/s10708-019-10042-0>
- Mentese, S., Mirici, N. A., Elbir, T., Palaz, E., Mumcuoğlu, D. T., Cotuker, O., Bakar, C., Oymak, S., y Otkun, M. T. (2020). A long-term multi-parametric monitoring study: Indoor air quality (IAQ) and the sources of the pollutants, prevalence of sick building syndrome (SBS) symptoms, and respiratory health indicators. *Atmospheric Pollution Research*, 11(12), 2270–2281. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.07.016>
- Ministry of Environment and Natural Resources. (4 de abril, 2024). *National Air Quality Information System*. Monitoring Network SDS01. <https://sinaica.inecc.gob.mx/>
- National Institute of Public Health. (2022). *Environment and Health*. <https://www.insp.mx/>
- Nicholas J. V., y White D. R. (2001). Calibration. En *Traceable Temperatures* (pp. 159–201). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/0470846151.ch5>
- Nilandita, W., Munfarida, I., Ratodi, M., Ratri Nurmaningsih, D., y Suprayogi, D. (2019). The Indoor Air Quality in Laboratory Buildings. A Case Study in Integrated Laboratory of UIN Sunan Ampel Surabaya. *KnE Social Sciences*. 3(21), 873-882. <https://doi.org/10.18502/kss.v3i21.5018>
- Nugroho, A. P., Okayasu, T., Horimoto, M., Arita, D., Hoshi, T., Kurosaki, H., Yasuba, K., Inoue, E., Hirai, Y., Mitsuoka, M., y Sutiarsio, L. (2016). Development of a Field Environmental Monitoring Node with Over the Air Update Function. *Agricultural Information Research*, 25(3), 86–95. <https://doi.org/10.3173/air.25.86>
- Nurhisana, S., y Hasyim, H. (2022). Environmental health risk assessment of sulfur dioxide (SO₂) at workers around in combined cycle power plant (CCPP). *Heliyon*, 8(5), e09388. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09388>
- Occupational Safety and Health Administration. (6 de marzo, 2024). *Hydrogen Sulfide*. OSHA. <https://www.osha.gov/hydrogen-sulfide>
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2015). *Indoor air quality in commercial and institutional buildings*. 1–32. <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/3430indoor-air-quality-sm.pdf>
- Ortiz Salvador, E. G., Ricoy Zárate, E. G., Carreto Hernández, L. G., Sotelo Rodríguez, P., Moya Acosta, S. L., y Campos Amezcua, R. (2022). *Numerical and Experimental Study of Cross Ventilation in a Room of a House in the State of Morelos, EasyChair Preprint*, 9209. <https://easychair.org/publications/preprint/slwnP>
- Quah, S. (Ed). (2021). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *International Encyclopedia of Public Health* (Segunda edición, Vol. 2, Número 1, pp. 56-57). [https://doi.org/10.1016/0140-7007\(79\)90114-2](https://doi.org/10.1016/0140-7007(79)90114-2)
- Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos. (2023). *Observatorio Atmosférico Mérida*. <https://www.ruoa.unam.mx/index.php?page=estaciones&id=8>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (7 de marzo, 2024). *NOM-081-SEMARNAT-1994*. Límites Máximos Permisibles de Emisión de Ruido de Las Fuentes Fijas y Su Método de Medición. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD02/081.pdf>
- Secretaría de Salud. (2019). *NOM-022-SSA1-2019 Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5568395&fecha=20/08/2019#gsc.tab=0
- Secretaría de Salud. (2021a). *NOM-020-SSA1-2021 Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al ozono*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633956&fecha=28/10/2021#gsc.tab=0
- Secretaría de Salud. (2021b). *NOM-021-SSA1-2021 Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al monóxido de carbono*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634084&fecha=29/10/2021#gsc.tab=0
- Secretaría de Salud. (2021c). *NOM-026-SSA1-2021 Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al plomo*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634085&fecha=29/10/2021#gsc.tab=0
- Secretaría de Salud. (2022a). *NOM-023-SSA1-2021 Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de nitrógeno*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633854&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0
- Secretaría de Salud. (2022b). *NOM-025-SSA1-2014 Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014#gsc.tab=0
- Sistema Meteorológico Nacional. (2020). *Climatic conditions*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>
- Tang, R., y Pfrang, C. (2023). Indoor particulate matter (PM) from cooking in UK students' studio flats and associated intervention strategies: evaluation of cooking methods, PM concentrations and personal exposures using low-cost sensors. *Environmental Science: Atmospheres*, 3(3), 537–551. <https://doi.org/10.1039/d2ea00171c>
- Tran, V. Van, Park, D., y Lee, Y.-C. (2020). Indoor Air Pollution, Related Human Diseases, and Recent Trends in the Control and Improvement of Indoor Air Quality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2927. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082927>
- Organización Mundial de la Salud. (2021). *Global Air Quality Guidelines 2021*. 1–16. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1>