

Tipo de artículo: Artículo de revisión

Revisión de estudios sobre redes de sensores para el monitoreo de CO₂

Review of studies on sensor networks for CO₂ monitoring

Kenia Elizabeth Sabando Bravo^{1*}  <https://orcid.org/0000-0002-2086-2519>

Marlon Renne Navia Mendoza²  <https://orcid.org/0000-0001-9775-3778>

Jorge Luis Zambrano-Martinez³  <https://orcid.org/0000-0002-5339-7860>

¹ Instituto de Posgrado, Universidad Técnica de Manabí. ksabando9624@utm.edu.ec

² Facultad de Ciencias Informáticas, Universidad Técnica de Manabí. marlon.navia@utm.edu.ec

³ Facultad de Ciencias Informáticas, Universidad Técnica de Manabí. jorge.zambrano01@utm.edu.ec

* Kenia Elizabeth Sabando Bravo: ksabando9624@utm.edu.ec

Resumen

Actualmente en los centros urbanos, aumentan las cantidades de gases contaminantes, que ocasionan el crecimiento del calentamiento global. Uno de los principales gases causantes del efecto invernadero es el dióxido de carbono (CO₂). Por esta razón, su monitoreo y control es un tema muy estudiado alrededor del mundo, debido a los diversos problemas en el ecosistema. Una de las formas de monitorear los niveles de CO₂ en el ambiente, es a través del uso de dispositivos con sensores especializados y comunicados inalámbricamente mediante una red de sensores. El presente trabajo investigativo presenta una revisión bibliográfica de estudios referentes a redes de sensores para el monitoreo de CO₂. El objetivo de este artículo es identificar cuáles son los sensores y la tecnología de comunicación más utilizada para la monitorización de este gas contaminante. La metodología que se utilizó en este artículo es de revisión bibliográfica, la cual permitió la indagación de información de una manera eficaz para realizar un análisis crítico de la misma. Se han considerado para el análisis, artículos científicos, trabajos de titulación y estudios realizados sobre este tema. En los resultados obtenidos se concluyen que el protocolo inalámbrico más utilizado es el Zigbee, debido a su reducido consumo de energía en la implementación; y el sensor más utilizado es el MQ-135, el cual es el indicado para detectar gases nocivos en un rango máximo de 10-1000 ppm (partes por millón).

Palabras clave: CO₂; monitoreo; sensor CO₂; WSN; redes

Abstract

Currently, in metropolitan areas, the amounts of polluting gases are increasing, which causes the growth of global warming. One of the leading gases causing the greenhouse effect is carbon dioxide (CO₂). For this reason, its monitoring and control is a highly studied topic worldwide due to the various problems in the ecosystem. One of the ways to monitor CO₂ levels in the environment is through devices with specialised sensors and wireless communication through a sensor network. This research paper presents a bibliographic review of studies on sensor networks for CO₂ monitoring. The objective of this article is to identify which are the sensors and the most used communication technology for the monitoring of this polluting gas. The methodology used in this article is a bibliographic review, which effectively allows the investigation of information to perform a critical analysis. Scientific articles, doctoral thesis, and other research on this subject have been considered for analysis. The results concluded that the most widely used wireless protocol is Zigbee due to its reduced energy consumption in implementation. The MQ-135 sensor is the most used, which is indicated to detect harmful gases in a maximum range of 10-1000 ppm (parts per million).

Keywords: CO₂; monitoring; CO₂ sensor; WSN; networks



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

Recibido: 04/01/2023
Aceptado: 22/03/2023
En línea: 01/04/2023

Introducción

En los últimos años, el aumento de la contaminación ambiental es el principal causante del calentamiento global. Según el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), se están observando varios cambios climáticos en la Tierra, en donde se observa el aumento de los niveles del mar.

Esto se debe a varios factores que se generan en distintas formas de contaminación, y entre las principales está la emisión del dióxido de carbono (CO₂). La emisión excesiva de este gas en la atmósfera se debe a la quema de combustibles fósiles, que son utilizados para fines industriales, energéticos y de transporte; también los productos minerales como el cemento y de la función de fotosíntesis de los vegetales.

Según el informe realizado por el IPCC, indica que el CO₂ es el principal causante del cambio climático, conjuntamente con otros gases nocivos, como el monóxido de carbono, los hidrocarburos, el óxido nitroso, entre otros. Además, se indica que las emisiones del CO₂ procedentes de las actividades diarias de las personas, provocando que la temperatura del planeta se haya incrementado 1,1 °C y se estima que la temperatura sobrepase 1,5 °C en los próximos 20 años. Estudios realizados por el grupo de trabajo del IPCC indican que en los próximos años habrá olas de calor, variaciones climáticas peligrosas en las estaciones, cambiando el equilibrio sensible de varios entornos. Las proyecciones realizadas por el Grupo de trabajo del IPCC indican que en los próximos años aumentarán los cambios climáticos en todas las regiones, lo cual causará olas de calor, se acortarán las estaciones frías y se alargarán las estaciones cálidas. (Secretaría del IPCC, 2021)

Por esta razón, existen varios estudios en donde se busca reducir y controlar la cantidad del CO₂ en el ambiente a través del uso de herramientas tecnológicas, llegando a ser más precisas con la finalidad de realizar una monitorización de este contaminante en el entorno. Siendo así, que algunas investigaciones utilizan dispositivos con sensores conectados a una red, los cuales permiten que a través de nodos desplegados en un área, recolectar datos sobre la emisión del CO₂, y luego enviarlos a un nodo central con el objetivo de procesarlos y brindar un mayor conocimiento específico sobre el comportamiento del CO₂.

En este artículo se tiene como objetivo realizar una revisión bibliográfica sobre las tecnologías e investigaciones realizadas para el monitoreo del CO₂ comunicados a través de redes de sensores. En la siguiente sección se describe



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

cómo se realizó el estudio. Luego se presentan los resultados obtenidos de la revisión bibliográfica, y por último las conclusiones.

Materiales y métodos

Esta investigación es de tipo documental, debido a que se aplicó la revisión bibliográfica a diferentes trabajos científicos que encajen con la temática de red de sensores para la monitorización del CO₂. La búsqueda se realizó a las publicaciones indexadas en revistas, trabajos de titulación, tesis de posgrado, entre otros, desde el año 2017 hasta finales del 2022; los cuales fueron encontradas en repositorios universitarios y bibliotecas digitales como MDPI, IEEEExplore, Science Direct, Scielo, BASE, Springer Link, Dialnet y ACM.

Para encontrar de manera más eficaz las investigaciones relacionadas sobre la temática, se utilizó dos cadenas de búsqueda que se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1.- Resultados de cadenas de búsqueda.

CADENA DE BÚSQUEDA	MDPI	IEEE EXPLORE	SCIENCE DIRECT	SCIELO	BASE	SPRINGER LINK	DIALNET	ACM
"CO2" AND "city" AND ("monitoring" OR "monitor") AND "sensor networks"	7	7	19	1	6	27	1	41
"CO2 monitoring system AND sensor network"	43	33	1	0	1	1	0	1

Como se observa en la Tabla 1, las dos cadenas de búsqueda están en el idioma anglosajón, por el motivo que la mayoría de las investigaciones son realizadas en este idioma, dando así los resultados obtenidos en los diferentes repositorios bibliográficos. Con estas cadenas de búsqueda, se logró encontrar de manera precisa investigaciones relacionados a las tecnologías que se han utilizado para la monitorización del CO₂ a nivel mundial. Posteriormente, se realizó la revisión documental respectiva para llegar a analizar la información necesaria. Y, por último, se presentó una conclusión de cuál es la tecnología más efectiva para la monitorización del CO₂ en diferentes escenarios estudiados.

Entre todos los resultados obtenidos, se realizó la exclusión de muchos estudios de acuerdo con los siguientes criterios:

- Investigaciones que no tienen acceso gratuito para su lectura completa y descarga.
- Estudios publicados que no estén en inglés o español.
- Archivos dañados o corruptos que no se podía acceder.



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)**

Luego de la depuración de investigaciones de acuerdo con los criterios de exclusión, en donde se tenían 189 resultados de búsqueda, se redujo a 26 referencias útiles para esta investigación.

La categorización se realizó de acuerdo con las soluciones tecnológicas encontradas en la investigación, en donde se evidencia que en su mayoría se diseña e implementa las redes de sensores para el monitoreo del CO₂, pero que también se desarrollan prototipos de nodos sensores para la experimentación, con la finalidad de conocer qué tecnología se puede utilizar.

Los trabajos científicos revisados se los llegaron a categorizar de acuerdo con la Tabla 2.

Tabla 2.- Categorización de estudios investigados

CATEGORIZACIÓN DE ESTUDIOS
1. Diseño e implementación de red de sensores para el monitoreo del CO ₂ .
2. Prototipos de nodos o sensores para monitorear el CO ₂

En la Tabla 2, la primera categorización hace referencia a la inclusión de estudios que involucran el diseño e implementación de redes de sensores a través de una evaluación del diseño desarrollado en diferentes espacios. Y la última categorización, se centran en estudios que fueron realizados con prototipos de nodos o sensores que permitan el monitoreo de CO₂ más eficiente mediante diferentes tecnologías.

Resultados y discusión

Después de realizar la búsqueda de documentos científicos y evaluarlos, se encontraron 26 estudios que fueron realizados desde el 2017 hasta el 2022, en donde se analizó de acuerdo con la cantidad de resultados obtenidos sobre la monitorización del CO₂ en diferentes escenarios, que va en aumento debido al número de resultados encontrados.

A continuación, en la Figura 1 se muestran los resultados obtenidos de la cantidad de publicaciones realizadas anualmente con los criterios de exclusión enumerados en la Tabla 2.



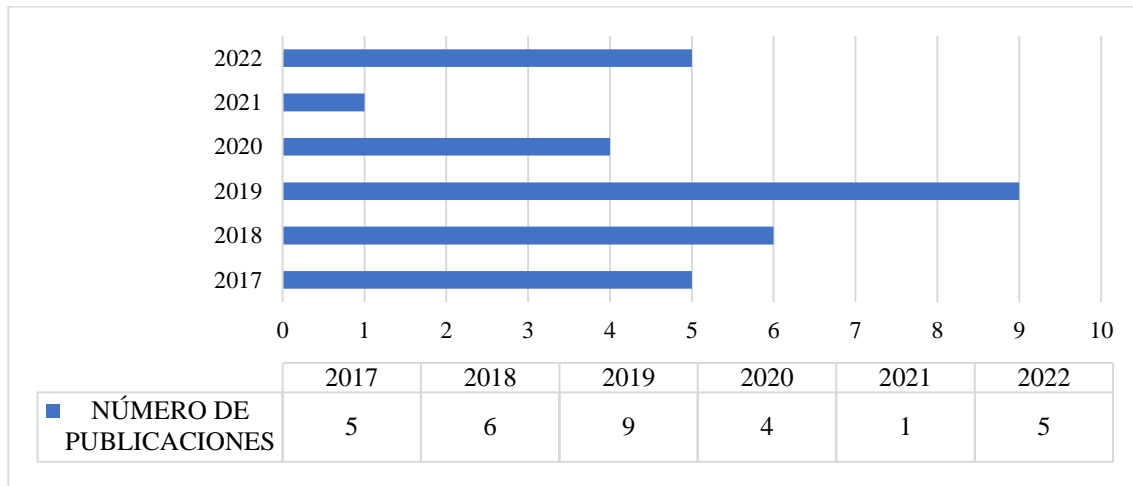


Figura 1. Cantidad de publicaciones por año sobre redes de sensores para el monitoreo de CO₂.

Como se puede observar en la Figura 1, en el año 2019 se realizaron más investigaciones enfocadas al estudio de la monitorización del contaminante atmosférico, mientras que, en el 2021, fue el año de menor aporte científico. Esto último debido a las restricciones por la pandemia mundial a causa del COVID-19.

A continuación, se muestra la cantidad de estudios agrupados de acuerdo con la clasificación establecida en la Tabla 2, que están relacionadas a las investigaciones sobre el tema de red de sensores para el monitoreo de CO₂. En la Figura 2 se observa la cantidad de estudios encontrados desde el año 2019 hasta el 2022.

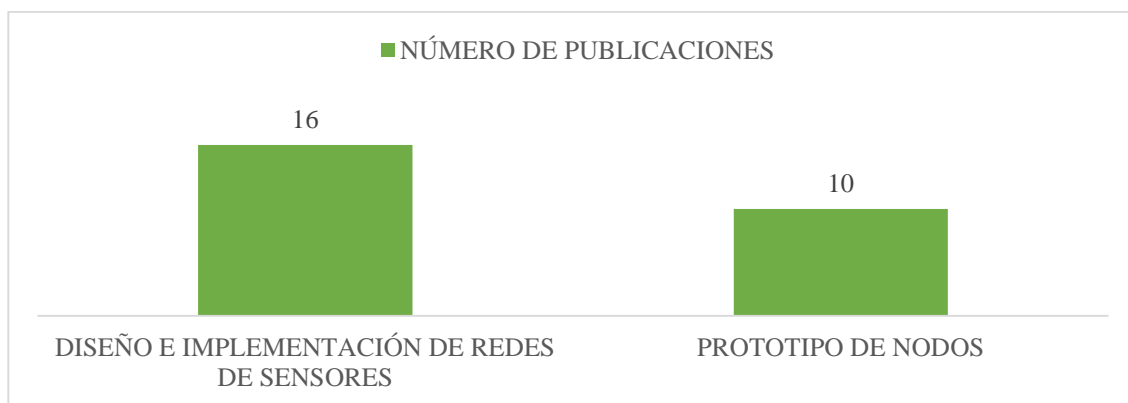


Figura 2. Cantidad de número de publicaciones de acuerdo con la clasificación de la Tabla 2.

En la Figura 2 se observa que los estudios de diseño e implementación son de los temas más realizados, los cuales aportan para dar solución en las investigaciones sobre el calentamiento global por el efecto invernadero. Mientras que



los estudios de prototipos de nodos o sensores que permiten el monitoreo de CO₂, en este caso de estudio, son los menos investigados durante el rango de años establecido.

A continuación, se muestra los trabajos referenciados mediante las distintas categorizaciones:

Diseño e implementación de red de sensores para el monitoreo del CO₂.

El enfoque de estos trabajos fue el de diseñar e implementar redes de sensores con la finalidad de monitorear niveles del CO₂, en donde se encontraron 16 trabajos utilizando tecnologías similares para el cumplimiento del objetivo, a continuación, se describen estos estudios.

En Ecuador en la ciudad de Cuenca se realizó la implementación de una red de sensores en donde se utilizó el sensor MG-811 para la detección del dióxido de carbono en el ambiente, para esta investigación se utilizaron varios nodos en distintos puntos de la localidad en donde se recolectó los datos y se logró obtener varios análisis y conclusiones, entre ellas que en horas pico del día es donde más se emite este gas, debido a la alta cantidad de vehículos que circulan para distintas actividades. (Granda et al., 2017) También en la ciudad de Loja se desarrolló una red de sensores para su implementación con la finalidad de monitorear la emisión de CO₂ y los niveles de ruido que se generan en algunos puntos de la ciudad, debido a que estos dos factores son considerados como medios que ocasionan estrés y enfermedades varias en las personas durante su vida cotidiana. Para la realización de esta red se escogió la topología malla, y el sensor CCS811 para la detección del gas. Se eligieron puntos estratégicos para la implementación de cada nodo sensor y nodo coordinador concluyendo que, de lunes a sábado, existe un alto nivel de CO₂ en los sitios más concurrentes de la ciudad mientras que los días domingo debido a la poca afluencia de personas, el nivel de ruido y CO₂ disminuyó considerablemente. (Ordóñez Mendieta et al., 2020)

Otro estudio implementado en una ciudad con el objetivo de monitorear la calidad del aire fue realizado en Juliaca de Perú, en donde se desarrolló una red de sensores para la medición de varios gases, en donde para la detección del CO₂, se utilizó el MQ-135 el cual permitió obtener los valores necesarios para el análisis respectivo, teniendo como resultados que las altas concentraciones de CO₂ se deben al tráfico y al manejo inadecuado de materiales orgánicos en la localidad. (Montoya & Chilo, 2019) Se desarrolló un sistema de monitorización del CO₂ para hogares inteligentes que controlen la calidad del aire interior. Se utilizó computación en la nube e Internet de las cosas, en donde se integró un nodo compuesto por el sensor de CO₂ MQ-135, un módulo Wi-Fi Esp8266, como almacenamiento en la nube Firebase y Android Carbon Insight para la muestra de datos. Se logró recopilar datos de 2880 puntos durante 10 días, en donde se concluyó mediante las pruebas que el sistema desarrollado generó con éxito los datos en tiempo real de CO₂. (Ming et



al., 2019) También en la ciudad de Makassar en Indonesia en donde se tiene como finalidad convertir la localidad en una ciudad inteligente, se diseñó e implementó una red utilizando la infraestructura pública que tiene la localidad y así utilizando dos nodos sensores que utilizan el MQ-9 para el CO₂ y un sensor de puerta de enlace para de esta forma realizar la monitorización del gas en la ciudad. Se concluyó con esta investigación que utilizando red de sensores se logrará que la ciudad se vuelva tecnológicamente inteligente y que en el futuro mediante algoritmos de inteligencia artificial se logre identificar problemas importantes para las tomas de decisiones. (Lisangan & Sumarta, 2018) Se desarrolló un sistema modular para el control de calidad del aire interior, este sistema permite la detección de hasta 6 gases, está implementado con varios sensores entre ellos uno para el CO₂, en el cual se utilizó el Sensor NDIR INE20-CO2P-NCVSP, este sistema se utiliza para recopilar datos del interior en varios lugares de Doha la capital de Qatar. (Benammar et al., 2018)

En Filipinas debido a que el transporte público emite el CO₂ en una gran escala por sus motores en bajas condiciones, se realizó la instalación de un sistema de monitoreo mediante redes de sensores móviles conectados a los escapes de los buses en donde se recopiló varios datos de la emisión de este gas en diferentes condiciones, como: evaluación del CO₂ en función a la velocidad, en la aceleración basado en la pendiente y la velocidad de la carretera y la correlación de potencia específica del vehículo y emisión de CO₂, según la pendiente en carretera. Se utilizó el sensor NDIR COZIR-WR-GC-0006 para la detección de CO₂, y se concluyó que existe una mayor emisión del gas en el aire cuando los buses se movilizan en cuestas arriba o se encuentran detenidos. (Palconit & Nunez, 2017) Se propuso la implementación de una red de sensores en España para el monitoreo ambiental de ciudades inteligentes en donde se pueda conocer los niveles de contaminación de CO₂ y de esa manera tomar las medidas necesarias para su disminución. Utilizaron el sensor MQ-135 de bajo costo y con el alcance necesario para la detección del gas, con lo cual se obtuvo como resultado que la red implementada es útil para la detección rápida de niveles de CO₂. (Sendra et al., 2019)

También la implementación de este tipo de redes son de mucha utilidad para el área de desastres naturales, como lo son los incendios en ciudades o en bosques, por este motivo se desarrolló una red con la finalidad de detectar incendios forestales a través de varios sensores, entre ellos el MG-811 para la detección de CO₂ y de esta forma identificar catástrofes en la zona, mediante 3 nodos sensores que cuando el nivel de gas aumenta y pasa los límites establecidos, la alarma se activa con un pitido y un indicador diodo emisor de luz (LED), logrando de esta forma dar aviso en tiempo real de que existe una actividad de incendio, lo cual permitirá avisar de forma rápida para la asistencia inmediata. (Granda Cantuña et al., 2017) Se propuso, además, una red de sensores inalámbricos (WSN) con nodos sensores basados en LoRaWAN, la cual fue implementada en el Campus de la Universidad de Quintana Roo en Chetumal, en México, en donde la finalidad fue el monitoreo de datos de ozono y dióxido de carbono en tiempo real. Se utilizó el sensor de



MQ-135 para la detección del CO₂ y se obtuvo como resultado que la red implementada con celdas de combustibles microbiana vegetales (PMFC) es una buena opción para este tipo de investigaciones. (Ayala-Ruiz et al., 2019) Entre otras de las investigaciones sobre la condición ambiental, se implementó una WSN en donde se utilizaron sensores de humedad, temperatura y CO₂. Para la detección del dióxido de carbono se utilizó el sensor MQ2 el cual tiene como características una buena sensibilidad y es de bajo costo. Además, se desarrolló un sitio web para mostrar los resultados en tiempo real y mediante redes sociales. (Hudhajanto et al., 2018) Se desarrolló un sistema de monitoreo y evaluación de la calidad de aire el cual fue aplicado en una mina de carbón subterránea activa, el cual fue basado en internet de las cosas (IoT), utilizando varios sensores detectores de gases, entre ellos el MQ-811 para el CO₂, en donde se concluyó que entre los gases más influyentes dentro de la mina era el CH₄, SO₂, CO y H₂S. (Jo & Khan, 2018)

En el área educativa también se han realizado los estudios respectivos por la importancia de poseer ambientes adecuados para los estudiantes y docentes, por lo que en un campus universitario se implementó una red de sensores para el monitoreo de CO₂, debido a los altos niveles que se produce en ciertas zonas del campus y que afectan en la salud de los estudiantes. El sensor de CO₂ utilizado fue el TGS4161, para lo cual los nodos fueron ubicados estratégicamente en puntos donde más se genera este tipo de gas, como lo es en las vías que tienen badenes para la disminución de velocidad vehicular. Se concluyó que se debe buscar otra alternativa para la reducción de velocidad de los vehículos debido a que se generaba más CO₂ cuando el vehículo cambiaba su velocidad para pasar por este objeto. (Lara-Cueva et al., 2019) También entre otra de las investigaciones, se implementó una red de sensores para monitorear la calidad del aire interior de un campus de estudio, en donde se utilizó el sensor MQ-135 para la detección en el ambiente de este gas. La red fue compuesta por 3 nodos sensores y se obtuvo como resultado que en la sala del comedor se detectó el más alto nivel de CO₂, luego las aulas y por último la biblioteca. (Hapsari et al., 2019)

En zonas de invernaderos también se ha utilizado en la actualidad nodos de sensores mediante internet de las cosas (IoT) que permiten monitorear la calidad del aire, lo cual es importante para el crecimiento agrícola. Por lo cual se ha realizado el experimento con prototipos de nodos que permiten captar diferentes tipos de gases, entre ellos el CO₂ mediante el sensor MQ-2. Este sistema que se propuso ayuda a los agricultores para el control de las plantas. (Rokade et al., 2022) También se han realizado estudios de medición de la calidad de aire en edificios públicos y privados con la finalidad del cuidado de las personas que lo habitan en determinadas situaciones y horarios, por esa razón se realizó un sistema que permita monitorear la calidad del ambiente interior (IEQ) en donde se utilizó sensores, entre ellos el CCS811 para la detección del CO₂ en el ambiente. Se trabajó con tres capas, en la cual en la capa borde los nodos sensores adquieren los parámetros, en la capa niebla se encuentra los concentradores los cuales recopilan los datos de varios nodos y en la capa nube se conectan los nodos con servicios de la nube para el análisis de los datos. En conclusión,



el sistema de monitorización es rentable, debido a las diferentes pruebas realizadas en diferentes escenarios. Se logró obtener como resultado que las condiciones de trabajo si estaban adecuadas. (Oproescu et al., 2022)

En la Tabla 3 se listan las publicaciones encontradas en esta categoría.

Tabla 3. Resumen de los estudios de investigaciones sobre el diseño e implementación de red de sensores para el monitoreo del CO₂.

Referencia	Temas de Investigación
(Granda et al., 2017)	Designing a wireless sensor network for vehicular traffic and CO ₂ pollution monitoring in an urban area.
(Ordóñez Mendieta et al., 2020)	Diseño de una WSN para el monitoreo de CO ₂ en el aire y niveles de ruido en la ciudad de Loja.
(Montoya & Chilo, 2019)	RealTime Wireless Monitoring System of CO ₂ and CH ₄ in Juliaca-Perú.
(Ming et al., 2019)	Real-Time Carbon Dioxide Monitoring Based on IoT & Cloud Technologies.
(Lisangan & Sumarta, 2018)	Proposed Prototype and Simulation of Wireless Smart City: Wireless Sensor Network for Congestion and Flood Detection in Makassar.
(Benammar et al., 2018)	A Modular IoT Platform for Real-Time Indoor Air Quality Monitoring.
(Palconit & Nunez, 2017)	CO ₂ emission monitoring and evaluation of public utility vehicles based on road grade and driving patterns: An Internet of Things application.
. (Sendra et al., 2019)	Collaborative LoRa-Based Sensor Network for Pollution Monitoring in Smart Cities.
(Granda Cantuña et al., 2017)	Design and implementation of a Wireless Sensor Network to detect forest fires.
(Ayala-Ruiz et al., 2019)	A Self-Powered PMFC-Based Wireless Sensor Node for Smart City Applications.
(Hudhajanto et al., 2018)	Real-Time Monitoring for Environmental Through Wireless Sensor Network Technology.
(Jo & Khan, 2018)	An Internet of Things System for Underground Mine Air Quality Pollutant Prediction Based on Azure Machine Learning.
(Lara-Cueva et al., 2019)	Air Quality Monitoring System Within Campus by Using Wireless Sensor Networks.
(Hapsari et al., 2019)	Real Time Indoor Air Quality Monitoring System Based on IoT using MQTT and Wireless Sensor Network.
(Rokade et al., 2022)	Intelligent Data Analytics Framework for Precision Farming Using IoT and Regressor Machine Learning Algorithms.
(Oproescu et al., 2022)	Scalable IoT Architecture for Monitoring IEQ Conditions in Public and Private Buildings.



Prototipos de nodos o sensores para monitorear el CO₂

Estos trabajos tuvieron como propósito el desarrollar prototipos de nodos o sensores para realizar el monitoreo del dióxido de carbono, en donde se obtuvo como resultado 10 estudios, a continuación, se detallan los mismos.

Se realizó un prototipo de nodo sensor para la detección de CO₂ a bajo costo, con la finalidad de realizar la implementación con una red de sensores en trabajos futuros. Para este prototipo se utilizó el sensor MG-811 el cual sirvió para el monitoreo del gas en dos ciudades; se obtuvieron resultados positivos sin embargo se concluye que el rango del sensor no fue suficiente para la detección de concentración del gas por lo que es recomendable utilizar otro que sea de mayor alcance. (Guanochanga et al., 2018) Se realizó investigación mediante Big Data en donde se analizó los datos del monitoreo de la calidad del aire en una red de sensores, y se demostró que el aumento de las actividades industriales en un espacio reducido tiene un impacto alto en niveles de CO₂. El nodo de sensor que se utilizó fue el MQ-135 y la unidad incluía componentes en la placa para recopilar simultáneamente medidas de CO₂, humedad relativa y la temperatura. (Molka-Danielsen et al., 2017)

Utilizando tecnología LoRaWAN debido al bajo consumo de energía se realizó una investigación para el monitoreo de la calidad de aire, mediante la construcción de nodos, en donde se utilizaron varios sensores, entre ellos uno para la detección del CO₂, el MQ-135 debido a sus características favorables y de bajo costo. Se logró concluir que este sistema sugerido es preciso y funcional para el objetivo del monitoreo. (Raghuveera et al., 2021) También se propuso un sistema para analizar la calidad del aire mediante sensores de humedad, de temperatura y el de gas CO₂, el cual se utilizó el modelo MQ-135. El experimento se realizó en dos lugares diferentes, el punto uno en la Puerta Principal del instituto y el punto dos en la zona de juegos, en donde se analizó que en el punto uno se presenta más alto el nivel de dióxido de carbono, principalmente en la noche. Este estudio finaliza recomendando el diseño, debido al tamaño compacto, al bajo costo y a la estabilidad que tiene, además de que permite el acceso a los datos en tiempo real y observarlos mediante una plataforma. (Moharana et al., 2020)

En India se desarrolló un prototipo de redes neuronales recurrentes para el monitoreo de la calidad de aire, en donde una de las mediciones realizadas fue los niveles de CO₂ mediante el sensor MQ-135 que es de bajo costo y útil para la detección de este gas. La investigación se realizó en dos ciudades, una metropolitana y un pueblo pequeño, en donde se obtuvo que el sistema planteado no era factible para grandes ciudades por lo que se necesitaría sistemas más complejos. (Belavadi et al., 2020) Además, se desarrolló un prototipo de nodos para la detección de varios gases en donde la finalidad fue valorar la calidad del aire en la capital Nueva Delhi de República de la India, en donde se utilizó para monitorear el CO₂ el sensor MQ-135 debido a que contaba con las características necesarias para la investigación. Se



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional**
(CC BY 4.0)

concluyó que el modelo de regresión lineal utilizado es favorable para la predicción de la calidad del aire en días posteriores, aunque se debe considerar que puede afectar la precisión del modelo los cambios en el clima, la densidad del tráfico, entre otros factores. (Kumar et al., 2020)

Los lugares cerrados también son espacios de importante monitoreo de la calidad del aire, por lo que se han realizado algunos estudios para el desarrollo de prototipos de sensores, en donde la importancia de la calidad del aire en el interior ha sido un tema muy estudiado debido a las consecuencias que traen en la salud del ser humano la emisión de algunos gases, como es el caso especial del dióxido de carbono. Se desarrolló un sistema llamado iAirCO₂ el cual se realizó como prototipo para la recolección de datos ambientales, además de un software web y una aplicación móvil para la consulta de los datos, la cual también permite notificar mediante un mensaje de alerta en caso de que los niveles de CO₂ sean superiores a los configurados; esto es de mucha ayuda para llevar registros de un espacio. Como trabajo futuro se pretende mejorar el software y hardware para adaptar el sistema en escuelas, en industrias y en hospitales, lo cual sería de mucho beneficio para mejorar el entorno de vida. (Marques et al., 2019) Se desarrolló una red de sensores para el monitoreo de la calidad del aire en un lugar cerrado, en donde se utilizó como sensor el MQ-135 debido a sus características y bajo costo. Se logró concluir que los niveles de CO₂ se encontraban dentro de los límites aceptables, por lo tanto, los trabajadores no fueron perjudicados por el alto nivel de emisión del gas. (Molka-Danielsen et al., 2018)

Debido a la necesidad de garantizar las condiciones adecuadas en un hospital para sus pacientes y personal es importante la medición de la calidad del aire en el lugar. Es por esta razón, que se ha realizado una investigación para que sea empleada en varios hospitales de Chile, en donde mediante un nodo sensor se detecta la temperatura, humedad y dióxido de carbono que se emite en el área. El sensor para la detección de CO₂ que se utilizó fue el MG-811, debido a las características requeridas y al bajo coste, el cual permite poder implementar en futuro este prototipo en varias entidades de salud. (Durán et al., 2022)

El CO₂ es un gas que mediante su contaminación también ocasiona estrés en las plantas, lo cual es un tema de importante investigación y con relevancia en la agricultura. Por esta razón, se desarrolló una WSN como solución eficaz para el monitoreo de este gas en las plantas, en donde se utilizó el sensor CCS811 para la detección de niveles del dióxido de carbono. Se realizaron las pruebas para la detección del estrés en dos escenarios, durante el transporte de las plantas y cuando están en su macetero, en donde sus condiciones son distintas a las plantas que están cultivadas en suelo natural y expuestas a distintos factores atmosféricos. (Catini et al., 2019)

En la Tabla 4 se resumen los trabajos analizados sobre el desarrollo de prototipos para monitorizar CO₂.



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

Tabla 4. Resumen de los estudios de investigaciones sobre Prototipos de nodos o sensores para monitorear el CO₂

Referencia	Temas de Investigación
(Guanochanga et al., 2018)	Towards a Real-Time Air Pollution Monitoring Systems Implemented using Wireless Sensor Networks: Preliminary Results.
(Molka-Danielsen et al., 2017)	Big Data Analytics for Air Quality Monitoring at a Logistics Shipping Base via Autonomous Wireless Sensor Network Technologies.
(Raghuveera et al., 2021)	An IoT Enabled Air Quality Monitoring System Using LoRa and LPWAN.
(Moharana et al., 2020)	Development of an IoT-based Real-Time Air Quality Monitoring Device.
(Belavadi et al., 2020)	Air Quality Forecasting using LSTM RNN and Wireless Sensor Networks.
(Kumar et al., 2020)	Time Series Data Prediction using IoT and Machine Learning Technique.
(Marques et al., 2019)	Indoor Air Quality Assessment Using a CO ₂ Monitoring System Based on Internet of Things.
(Molka-Danielsen et al., 2018)	Large Scale Integration of Wireless Sensor Network Technologies for Air Quality Monitoring at a Logistics Shipping Base.
(Durán et al., 2022)	Monitoring of Thermal Comfort and Air Quality for Sustainable Energy Management inside Hospitals Based on Online Analytical Processing and the Internet of Things.
(Catini et al., 2019)	Development of a Sensor Node for Remote Monitoring of Plants.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede visualizar en la Figura 3, los diferentes tipos de sensores utilizados en los estudios de la Tabla 3 y Tabla 4, en donde se observa que existen 9 sensores de distintas marcas y con diferentes características, los cuales fueron escogidos de acuerdo con lo que se ha necesitado en las investigaciones. El sensor MQ-135, que cuenta con atributos como: su pequeño tamaño, voltaje de operación de 5V, la estabilidad fiable, la instalación práctica y sobre todo su bajo valor. Este sensor es el más utilizado con un 42% entre los estudios investigados, en comparación con los otros sensores, en donde el MG-811 ocupa el segundo lugar con 19% de utilización, debido a que el costo del mismo es más elevado, lo cual es una de las singularidades más tomadas en cuenta por parte de los investigadores para el desarrollo e implementación de más nodos para referente a la monitorización del CO₂. Los demás sensores fueron utilizados generalmente para el monitoreo de calidad de aire interior en varios sitios como campus universitarios y edificios. En la Figura 4, se observa los resultados sobre la tecnología de comunicación más utilizada en las distintas investigaciones, la cual fue el protocolo Zigbee con un 44% de utilización debido a su reducido consumo de energía, lo cual es una ventaja para la creación de dispositivos alimentados con batería. Además, el tamaño reducido y la topología de red tipo Mesh, permite una buena cobertura en zonas lejanas. En cambio, el



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)**

protocolo LoRaWAN ocupa el 25% de uso en los estudios investigados debido a su topología de red en estrella, la cual fue menos utilizada para el monitoreo de CO₂ en varios espacios.

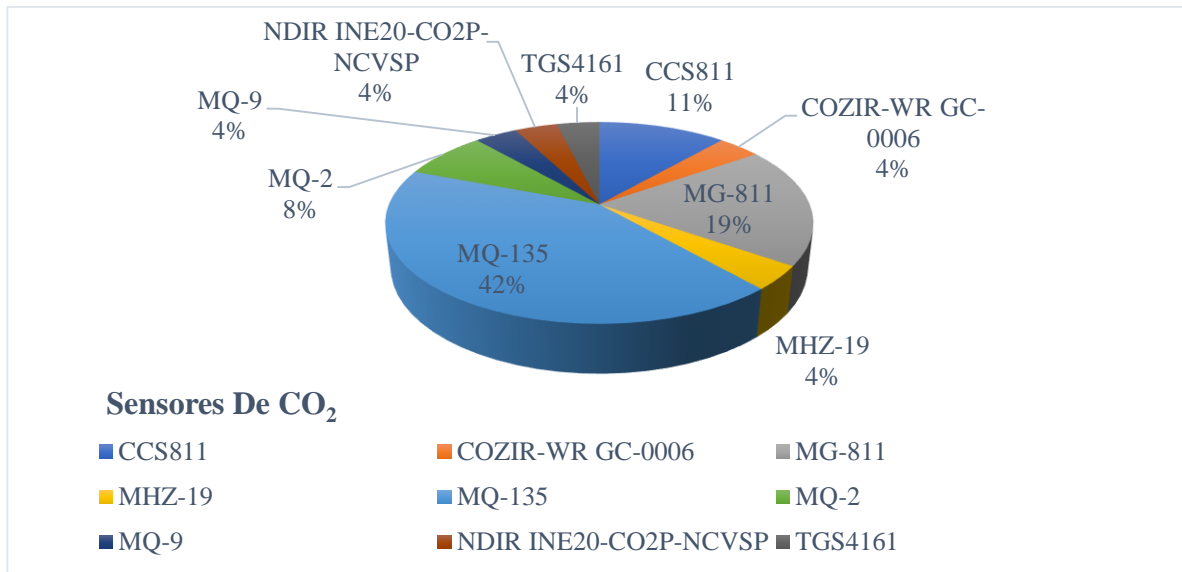


Figura 3. Porcentaje de tipo de sensores utilizados en los estudios de la Tabla 3 y Tabla 4.

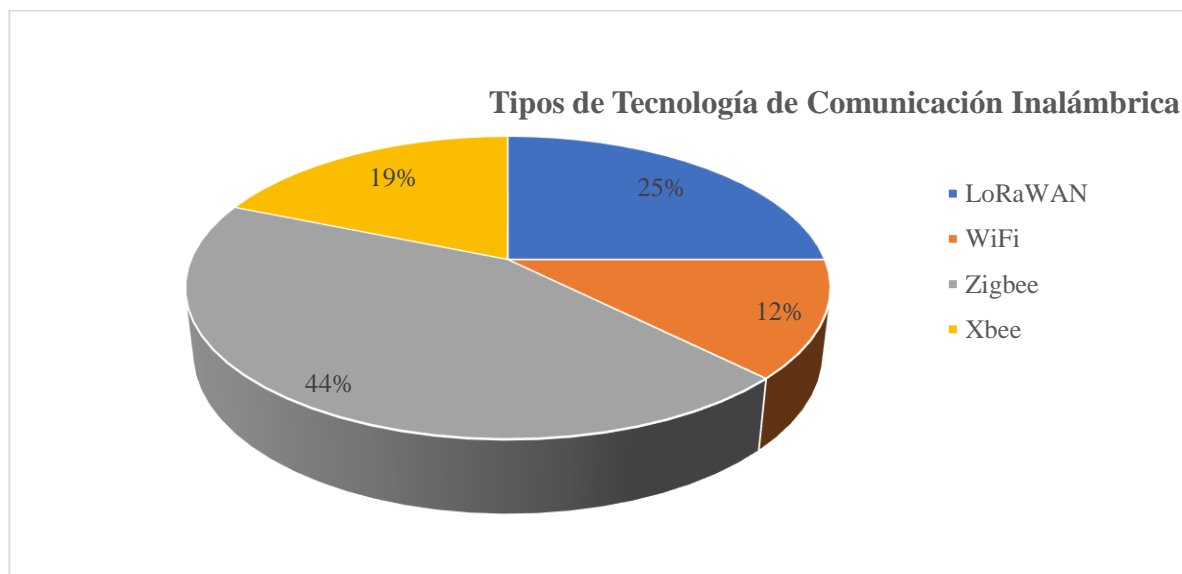


Figura 4. Porcentaje de tipo de tecnología de comunicación en los estudios de la Tabla 3 y Tabla 4.



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)**

Conclusiones

Los estudios sobre redes de sensores para el monitoreo de CO₂ han sido estudiados constantemente con el pasar de los años, debido a que es una de las soluciones óptimas para mantener un control en la calidad del aire en los diferentes escenarios. Además, una valiosa ventaja es el bajo costo de los dispositivos para que investigadores o pequeñas empresas puedan implementarlas y monitorizar específicamente los problemas ambientales, con la finalidad de colaborar con la prevención del efecto invernadero en el mundo.

Se logra concluir que entre los sensores utilizados en las investigaciones para la detección del CO₂, el más utilizado fue el MQ-135 debido a las varias ventajas que posee, lo cual permite desarrollar nodos sensores de un costo accesible, reducido tamaño y bajo consumo energético que pueden ser implementados en cualquier zona y así monitorear los niveles de ppm del dióxido de carbono emitidos por contaminantes. Además, el protocolo de comunicación más implementado es el Zigbee, debido al bajo consumo de energía y bajo costo que permite la implementación de varios nodos en algunas de las investigaciones.

Este artículo colabora en el crecimiento de las investigaciones tecnológicas con resultados importantes que permite una mejor toma de decisiones basada en la exploración de información bibliográfica, la cual puede ser utilizada para guía de futuros trabajos.

Conflictos de intereses

No existe conflicto de intereses.

Contribución de los autores

1. Conceptualización: Kenia Elizabeth Sabando Bravo.
2. Curación de datos: Kenia Elizabeth Sabando Bravo.
3. Análisis formal: Kenia Elizabeth Sabando Bravo.
4. Investigación: Kenia Elizabeth Sabando Bravo.
5. Metodología: Kenia Elizabeth Sabando Bravo, Marlon Renne Navia Mendoza, Jorge Luis Zambrano-Martínez
6. Administración del proyecto: Kenia Elizabeth Sabando Bravo, Marlon Renne Navia Mendoza, Jorge Luis Zambrano-Martínez
7. Supervisión: Kenia Elizabeth Sabando Bravo, Marlon Renne Navia Mendoza, Jorge Luis Zambrano-Martínez



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

8. Redacción – borrador original: Kenia Elizabeth Sabando Bravo, Marlon Renne Navia Mendoza, Jorge Luis Zambrano-Martínez
9. Redacción – revisión y edición: Kenia Elizabeth Sabando Bravo, Marlon Renne Navia Mendoza, Jorge Luis Zambrano-Martínez

Referencia

- Ayala-Ruiz, D., Castillo Atoche, A., Ruiz-Ibarra, E., Osorio De La Rosa, E., & Vázquez Castillo, J. (2019). A self-powered PMFC-based wireless sensor node for smart city applications. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8986302>
- Belavadi, S. v., Rajagopal, S., Ranjani, R., & Mohan, R. (2020). Air Quality Forecasting using LSTM RNN and Wireless Sensor Networks. *Procedia Computer Science*, 170, 241–248. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2020.03.036>
- Benammar, M., Abdaoui, A., Ahmad, S. H. M., Touati, F., & Kadri, A. (2018). A Modular IoT Platform for Real-Time Indoor Air Quality Monitoring. *Sensors* 2018, Vol. 18, Page 581, 18(2), 581. <https://doi.org/10.3390/S18020581>
- Catini, A., Papale, L., Capuano, R., Pasqualetti, V., di Giuseppe, D., Brizzolara, S., Tonutti, P., & di Natale, C. (2019). Development of a Sensor Node for Remote Monitoring of Plants. *Sensors* 2019, Vol. 19, Page 4865, 19(22), 4865. <https://doi.org/10.3390/S19224865>
- Durán, C. O. ; ; Espinosa, E. ; Jerez, A. ; Palominos, F. ; Hinojosa, M. ; Carrasco, R., Garcés, H. O., Durán, C., Espinosa, E., Jerez, A., Palominos, F., Hinojosa, M., & Carrasco, R. (2022). Monitoring of Thermal Comfort and Air Quality for Sustainable Energy Management inside Hospitals Based on Online Analytical Processing and the Internet of Things. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2022, Vol. 19, Page 12207, 19(19), 12207. <https://doi.org/10.3390/IJERPH191912207>
- Granda, B. A. B., Belduma Belduma, L. A., Gonzalez, E. J. C., & Sarango, A. F. S. (2017). Designing a wireless sensor network for vehicular traffic and CO₂ pollution monitoring in an urban area. *2017 IEEE 9th Latin-American Conference on Communications, LATINCOM 2017, 2017-January*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/LATINCOM.2017.8240168>
- Granda Cantuña, J., Bastidas, D., Solórzano, S., & Clairand, J. M. (2017). Design and implementation of a Wireless Sensor Network to detect forest fires. *2017 4th International Conference on EDemocracy and EGovernment, ICEDEG 2017*, 15–21. <https://doi.org/10.1109/ICEDEG.2017.7962508>
- Guanochanga, B., Cachipuendo, R., Fuertes, W., Benitez, D. S., Toulkeridis, T., Torres, J., Villacis, C., Tapia, F., & Meneses, F. (2018). Towards a real-time air pollution monitoring systems implemented using wireless



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)**

- sensor networks: Preliminary results. *2018 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing, COLCOM 2018 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/COLCOMCON.2018.8466721>
- Hapsari, A. A., Hajamydeen, A. I., Vresdian, D. J., Manfaluthy, M., Prameswono, L., & Yusuf, E. (2019). Real Time Indoor Air Quality Monitoring System Based on IoT using MQTT and Wireless Sensor Network. *ICETAS 2019 - 2019 6th IEEE International Conference on Engineering, Technologies and Applied Sciences*. <https://doi.org/10.1109/ICETAS48360.2019.9117518>
- Hudhajanto, R. P., Fahmi, N., Prayitno, E., & Rosmida. (2018). Real-Time Monitoring for Environmental Through Wireless Sensor Network Technology. *Proceedings of the 2018 International Conference on Applied Engineering, ICAE 2018*. <https://doi.org/10.1109/INCAE.2018.8579377>
- Jo, B. W., & Khan, R. M. A. (2018). An Internet of Things System for Underground Mine Air Quality Pollutant Prediction Based on Azure Machine Learning. *Sensors 2018, Vol. 18, Page 930, 18(4)*, 930. <https://doi.org/10.3390/S18040930>
- Kumar, R., Kumar, P., & Kumar, Y. (2020). Time Series Data Prediction using IoT and Machine Learning Technique. *Procedia Computer Science, 167*, 373–381. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2020.03.240>
- Lara-Cueva, R. A., Meneses, P. B., Marquez, M. D., Gordillo, R. X., & Benitez, D. S. (2019). Air quality monitoring system within campus by using wireless sensor networks. *Iberian Conference on Information Systems and Technologies, CISTI, 2019-June*. <https://doi.org/10.23919/CISTI.2019.8760834>
- Lisangan, E. A., & Sumarta, S. C. (2018). Proposed Prototype and Simulation of Wireless Smart City: Wireless Sensor Network for Congestion and Flood Detection in Makassar. *Proceedings - 2nd East Indonesia Conference on Computer and Information Technology: Internet of Things for Industry, EIconCIT 2018*, 72–77. <https://doi.org/10.1109/EICONCIT.2018.8878660>
- Marques, G., Ferreira, C. R., & Pitarma, R. (2019). Indoor Air Quality Assessment Using a CO₂ Monitoring System Based on Internet of Things. *Journal of Medical Systems 2019 43:3, 43(3)*, 1–10. <https://doi.org/10.1007/S10916-019-1184-X>
- Ming, F. X., Ariyaluran Habeeb, R. A., Md Nasaruddin, F. H. B., & Gani, A. bin. (2019). Real-time carbon dioxide monitoring based on IoT & cloud technologies. *ACM International Conference Proceeding Series, Part F147956*, 517–521. <https://doi.org/10.1145/3316615.3316622>
- Moharana, B. K., Anand, P., Kumar, S., & Kodali, P. (2020). Development of an IoT-based Real-Time Air Quality Monitoring Device. *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Communication and Signal Processing, ICCSP 2020*, 191–194. <https://doi.org/10.1109/ICCSP48568.2020.9182330>
- Molka-Danielsen, J., Engelseth, P., Olesnanikova, V., Sarafin, P., & Zalman, R. (2017). Big Data Analytics for Air Quality Monitoring at a Logistics Shipping Base via Autonomous Wireless Sensor Network



- Technologies. *Proceedings - 2017 5th International Conference on Enterprise Systems: Industrial Digitalization by Enterprise Systems, ES 2017*, 38–45. <https://doi.org/10.1109/ES.2017.14>
- Molka-Danielsen, J., Engelseth, P., & Wang, H. (2018). Large scale integration of wireless sensor network technologies for air quality monitoring at a logistics shipping base. *Journal of Industrial Information Integration*, 10, 20–28. <https://doi.org/10.1016/J.JII.2018.02.001>
- Montoya, J. M., & Chilo, J. (2019). RealTime wireless monitoring system of CO₂ and CH₄ in juliaca-perú. *Proceedings of the 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS 2019*, 1, 464–467. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924332>
- Oproescu, M., Poure, P., Pérez De Prado, R., Abdelkefi, A., Calvo, I., Espin, A., Gil-García, J. M., Bustamante, P. F., Barambones, O., & Apiñaniz, E. (2022). Scalable IoT Architecture for Monitoring IEQ Conditions in Public and Private Buildings. *Energies* 2022, Vol. 15, Page 2270, 15(6), 2270. <https://doi.org/10.3390/EN15062270>
- Ordóñez Mendieta, Á. J., Garrochamba, Á. P., Ordóñez Mendieta, Á. J., & Garrochamba, Á. P. (2020). Diseño de una WSN para el monitoreo de CO₂ en el aire y niveles de ruido en la ciudad de Loja. *Maskay*, 10(1), 20–31. <https://doi.org/10.24133/MASKAY.V10I1.1522>
- Palconit, M. G. B., & Nunez, W. A. (2017). CO₂ emission monitoring and evaluation of public utility vehicles based on road grade and driving patterns: An Internet of Things application. *HNICEM 2017 - 9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management, 2018-January*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/HNICEM.2017.8269496>
- Raghuveera, E., Kanakaraja, P., Kishore, K. H., Tanvi Sriya, C., Durga Prasad, B., & Sai Krishna Teja Lalith, B. (2021). An IoT Enabled Air Quality Monitoring System Using LoRa and LPWAN. *Proceedings - 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication, ICCMC 2021*, 453–459. <https://doi.org/10.1109/ICCMC51019.2021.9418440>
- Rokade, A., Singh, M., Malik, P. K., Singh, R., & Alsuwian, T. (2022). Intelligent Data Analytics Framework for Precision Farming Using IoT and Regressor Machine Learning Algorithms. *Applied Sciences* 2022, Vol. 12, Page 9992, 12(19), 9992. <https://doi.org/10.3390/APP12199992>
- Secretaría del IPCC. (2021). *COMUNICADO DE PRENSA DEL IPCC*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release-Final_es.pdf



Sendra, S., Garcia-Navas, J. L., Romero-Diaz, P., & Lloret, J. (2019). Collaborative LoRa-based sensor network for pollution monitoring in smart cities. *2019 4th International Conference on Fog and Mobile Edge Computing, FMEC 2019*, 318–323. <https://doi.org/10.1109/FMEC.2019.8795321>



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)