

Prototipo modular para monitoreo de contaminantes ambientales con IoT

Modular prototype for monitoring environmental contaminants with IoT

Pedro Torres Silva¹

Gilma Paola Andrade Trujillo²

Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia

Resumen

Las actividades humanas se desarrollan en diferentes ambientes los cuales han sido manipulados industrialmente para satisfacer las necesidades puntuales de las personas, lamentablemente estas acciones han generado daños de contaminación al entorno. Hoy en día se sabe que el interés por determinar las causas de los problemas medioambientales es un tema prioritario para la comunidad científica y gubernamental, y es así como desarrollos tecnológicos se posicionan con fuerza para analizar variables medioambientales y activar la conciencia colectiva por la protección del planeta. La presente propuesta busca diseñar un prototipo modular que analice las condiciones de variables ambientales en el agua y aire, dirigidas a determinar el estado de contaminación de dichos elementos. El prototipo realizará la recolección de información bajo el intercambio de sensores que se alternarán tipo modular dentro del equipo según la necesidad puntal; cada sensor en el sistema se configura para responder a un componente específico, es así como se tendrá la cantidad de sensores igual al número de variables que se desean monitorear. La implementación de sensores inalámbricos permite que la información se obtenga de manera sencilla y precisa, y de la misma forma se procese para obtener resultados fiables que den paso a toma de decisiones frente a determinadas circunstancias. Finalmente, mediante tecnología IoT los datos recolectados podrán analizarse y visualizarse de manera cuantitativa y cualitativa. Determinar de manera particular el nivel de

¹ Ingeniero electrónico, especialista en Computación para la Docencia; magíster en Educación, Educación en línea, UNAD. <https://orcid.org/0000-0003-3649-2281/> pedro.torress@unad.edu.co

² Ingeniera electrónica, especialista en Gerencia Informática, magíster en Docencia Universitaria, estudiante doctorado en Proyectos, UNAD. <https://orcid.org/0000-0001-8676-3612/> gilma.andrade@unad.edu.co

contaminación en el entorno en el que una persona se desenvuelve constituye el primer paso para gestar acciones de cambio en pro de la preservación del medio ambiente.

Palabras clave: sensores, contaminación, IoT, monitoreo ambiental, prototipos.

Abstract

Human activities take place in different environments which have been industrially manipulated to meet the specific needs of people. Unfortunately, these actions have brought about pollution damage to the environment. Nowadays, it is known that the interest in determining the causes of environmental problems is a priority issue for the scientific and governmental community, and this is how technological developments are strongly positioned to analyze environmental variables and activate collective awareness for the protection of the planet. This proposal seeks to design a modular prototype that analyzes the conditions of environmental variables in water and air, aimed at determining the pollution status of these elements. The prototype will collect information through the exchange of sensors that will alternate in a modular manner within the equipment according to the specific need; each sensor in the system is configured to respond to a specific component, thus the number of sensors will equal the number of variables to be monitored. The implementation of wireless sensors allows the information to be obtained easily and accurately, and in the same way, processed to obtain reliable results that lead to decision-making in certain circumstances. Finally, through IoT technology, the data collected can be analyzed and visualized both quantitatively and qualitatively. Determining the level of pollution in the environment in which a person operates constitutes the first step in generating change actions in favor of environmental preservation.

Keywords: Sensors, pollution, IoT, environmental monitoring, prototypes.

1. INTroducción

El crecimiento urbano, industrial y agrícola ha intensificado la presión sobre los ecosistemas, generando un aumento progresivo de contaminantes en el aire, el agua y el suelo. Esta situación representa una amenaza directa para la salud humana, la biodiversidad y el equilibrio ecológico. En este contexto, el monitoreo ambiental continuo y en tiempo

real se ha convertido en una necesidad prioritaria para las entidades gubernamentales, instituciones académicas y empresas comprometidas con la sostenibilidad y la mitigación del impacto ambiental.

En los últimos años, el desarrollo tecnológico ha permitido la integración de sensores inalámbricos y plataformas de Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) en sistemas de monitoreo ambiental, ofreciendo soluciones eficientes, escalables y de bajo costo. Estas tecnologías posibilitan la recolección, transmisión y análisis de datos en tiempo real, lo que facilita la toma de decisiones informadas y oportunas frente a eventos de contaminación o alteraciones significativas en la calidad ambiental.

Sin embargo, muchos de los sistemas existentes presentan limitaciones en cuanto a su adaptabilidad a diferentes contextos geográficos, económicos y funcionales, así como en su capacidad para integrar múltiples variables ambientales en un solo dispositivo. Por ello, se hace necesaria la creación de soluciones más flexibles y modulares que puedan ser personalizadas de acuerdo con las necesidades específicas del entorno y del usuario final.

En este marco, el presente proyecto tiene como objetivo diseñar un prototipo modular diferenciado para el monitoreo de niveles contaminantes medioambientales, basado en la implementación de sensores inalámbricos y tecnología IoT. Este sistema permitirá medir en tiempo real variables críticas como material particulado, compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono, temperatura, humedad relativa, así como parámetros de calidad del agua como pH, oxígeno disuelto, turbidez, temperatura y conductividad. La modularidad del diseño facilitará su adaptación a distintos escenarios de uso, promoviendo su aplicabilidad en zonas urbanas, rurales e industriales, con un enfoque de sostenibilidad, eficiencia energética y bajo costo.

2. Metodología

El desarrollo del proyecto se planteó bajo un enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo), con un carácter experimental-aplicado, buscando tanto validar técnicamente el prototipo como generar evidencia de su pertinencia en el contexto de monitoreo ambiental local. El proceso metodológico se estructuró en seis fases principales:

2.1 Fase de análisis de requerimientos

- Se realizó un diagnóstico inicial de las problemáticas ambientales más críticas en el departamento del Huila, destacando la limitada cobertura de estaciones oficiales de calidad del aire y la ausencia de mecanismos comunitarios de vigilancia de la calidad del agua.
- A partir de la normativa nacional (Resolución 2254 de 2017 para aire, Decreto 1594 de 1984 y Resolución 2115 de 2007 para agua) y estándares internacionales (OMS, EPA), se definieron las variables a monitorear:
 - Aire: material particulado (PM2.5 y PM10), ozono (O_3) y compuestos orgánicos volátiles (COV).
 - Aqua: pH, oxígeno disuelto, turbidez y conductividad eléctrica.
- Se establecieron criterios técnicos de selección de sensores: rango de operación, sensibilidad, disponibilidad comercial, bajo costo y facilidad de integración con plataformas IoT.

2.2 Revisión del estado del arte

- Se revisaron 35 referencias académicas y técnicas (artículos, manuales de sensores, normas ISO y reportes de la OMS) sobre monitoreo ambiental y tecnologías IoT.
- Se identificaron experiencias previas de uso de sensores de bajo costo como el SDS011 para material particulado y el MQ135 para gases, contrastándolas con sus limitaciones en ambientes húmedos.
- Se concluyó que la tendencia global apunta al uso de plataformas Arduino y ESP32, comunicación LoRa y almacenamiento de datos en la nube para proyectos comunitarios y de investigación.

2.3 Diseño conceptual y arquitectura del sistema

- Se propuso un modelo modular de hardware dividido en dos nodos principales:

Nodo de calidad del aire: sensores SDS011 (PM2.5 y PM10), MQ135 (COVs) y un módulo de O_3 .

Nodo de calidad del agua: sensores de pH, oxígeno disuelto (DFRobot SEN0237), turbidez y conductividad.

- Ambos nodos se integraron a un módulo LoRa SX1278, encargado de transmitir los datos a un gateway central basado en ESP32 con conectividad WiFi.
- Se diseñó un esquema de alimentación mediante batería recargable con autonomía de 6 horas, soportada por paneles solares portátiles para aplicaciones rurales.
- El software incluyó rutinas de adquisición, preprocesamiento y envío de datos en lenguaje C++ (Arduino IDE) y visualización en una interfaz web de acceso remoto.

2.4 Construcción y ensamblaje del prototipo

- Se fabricaron las carcchas protectoras de los sensores en impresión 3D, priorizando resistencia a humedad y polvo (grado IP44).
- Se realizó la integración electrónica con placas PCB de conexión, módulos de acondicionamiento de señal y controladores de bajo ruido eléctrico.
- Cada sensor fue sometido a un proceso de calibración preliminar en laboratorio, utilizando patrones de referencia (p. ej., soluciones tampón para pH y generadores de gases calibrados para MQ135 y O₃).

2.5 Validación experimental

- **Pruebas de calidad del aire:**

- El nodo se instaló junto a la estación oficial de Fontibón (Bogotá) para realizar comparaciones durante 72 horas consecutivas.
- Se recolectaron lecturas horarias de PM2.5, PM10 y O₃, comparándolas con los registros de la estación.
- Se calcularon métricas de error medio absoluto (MAE), diferencia promedio y desviación estándar.

- **Pruebas de calidad del agua:**

- Se realizaron mediciones en fuentes naturales y tanques de almacenamiento de la Empresa de Servicios Públicos Las Ceibas.
- Se recolectaron 24 muestras paralelas con sensores del prototipo y equipos multiparámetro de referencia.
- Se aplicó un análisis de concordancia mediante correlaciones de Pearson.

- **Pruebas de conectividad IoT:**

- Se midió el alcance del enlace LoRa en entornos urbanos (Neiva) y rurales.
- Se evaluaron tasas de pérdida de paquetes, latencia promedio y estabilidad en condiciones de interferencia.

2.6 Optimización y ajustes

- Se identificaron problemas de dispersión en el sensor SDS011 bajo alta humedad; se propuso incorporar algoritmos de compensación y filtros digitales.
- Se ajustó la frecuencia de muestreo a 10 minutos para optimizar consumo energético sin sacrificar resolución temporal.
- Se mejoró la gestión de energía, logrando extender la autonomía del sistema a 8 horas con panel solar auxiliar.
- Se documentaron protocolos de calibración y mantenimiento para replicabilidad del prototipo.

3. Resultados

3.1 Calidad del aire

Se compararon las lecturas de los sensores del prototipo con las obtenidas en la estación oficial de Fontibón (Bogotá) durante 72 horas consecutivas.

Tabla 1. Comparación de lecturas de calidad del aire

Variable	Promedio estación oficial	Promedio prototipo	Diferencia media	Desviación estándar	Observaciones
O ₃ (ppb)	25.34	32.90	+7.56	6.12	Sobreestimación leve; dentro de tolerancia aceptada
PM2.5 (µg/m ³)	16.70	14.15	-2.55	4.89	Subestimación moderada
PM10 (µg/m ³)	32.45	22.25	-10.20	57.20	Alta dispersión; sensibilidad afectada por humedad
COVs (ppm)	0.12	0.13	+0.01	0.02	Buena concordancia

El sensor de O₃ mostró una diferencia sistemática de +7.56 ppb frente al equipo oficial, pero dentro del rango de incertidumbre reportado en literatura para este tipo de sensores.

El SDS011 para PM2.5 tuvo un desempeño aceptable (error promedio -2.55 µg/m³), mientras que para PM10 la dispersión fue elevada, confirmando la sensibilidad de este sensor a la humedad relativa.

Los sensores MQ135 para COVs mostraron lecturas muy próximas a los valores de referencia, lo cual valida su aplicabilidad en escenarios comunitarios.

3.2 Calidad del agua

Las pruebas se realizaron en fuentes naturales y tanques de la Empresa de Servicios Públicos Las Ceibas. Los resultados se contrastaron con equipos multiparámetro de laboratorio.

Tabla 2. Comparación de lecturas de calidad del agua

Variable	Valor referencia	Valor prototipo	Diferencia media	% Error relativo	Observaciones

pH	7.20	7.05	-0.15	2.08 %	Lectura estable y dentro del margen aceptable
Oxígeno disuelto (mg/L)	6.80	6.60	-0.20	2.94 %	Alta precisión
Turbidez (NTU)	12.0	12.5	+0.5	4.16 %	Detectó cambios por simulación de vertimientos
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	420	410	-10	2.38 %	Desempeño consistente

Todas las variables presentaron errores relativos inferiores al 5 %, confirmando la viabilidad de los sensores de bajo costo para monitoreo de agua.

El sensor de turbidez mostró sensibilidad suficiente para detectar incrementos simulados en presencia de contaminantes sólidos.

El sensor de oxígeno disuelto validó un comportamiento confiable frente a estándares de referencia, relevante en aplicaciones de piscicultura y control de descargas.

3.3 Desempeño del sistema IoT

Se evaluó el módulo de transmisión LoRa SX1278 y el gateway ESP32 en condiciones urbanas y rurales.

Tabla 3. Pruebas de conectividad

Entorno	Alcance máximo (m)	Pérdida de paquetes (%)	Latencia promedio (s)	Observaciones
Urbano (Neiva)	650	4.8	1.7	Interferencias por edificaciones
Rural (área abierta)	1200	1.2	1.5	Excelente estabilidad en línea de vista

El sistema alcanzó 1.2 km de transmisión confiable en entornos rurales, lo que lo hace altamente pertinente para zonas con baja cobertura de internet.

En entornos urbanos, el desempeño fue aceptable con pérdidas menores al 5 %, atribuibles a la interferencia electromagnética y obstáculos físicos.

La latencia promedio (1.5–1.7s) es adecuada para aplicaciones de monitoreo ambiental que no requieren respuesta en tiempo real crítico.

4. Conclusiones

El proyecto permitió validar la factibilidad técnica y operativa de un prototipo modular para el monitoreo ambiental de aire y agua, integrando sensores de bajo costo con tecnologías de comunicación IoT (LoRa + ESP32). A partir de los resultados obtenidos, se establecen las siguientes conclusiones:

4.1 Viabilidad técnica de los sensores

Los sensores empleados (SDS011, MQ135, O₃, pH, oxígeno disuelto, turbidez y conductividad) demostraron un desempeño aceptable frente a equipos de referencia, con errores relativos menores al 5 % en agua y diferencias moderadas en aire (PM2.5 y O₃).

Se confirma que los sensores de bajo costo son útiles para vigilancia comunitaria y educativa, siempre que se apliquen protocolos de calibración y compensación (especialmente en el caso de PM10, sensible a la humedad).

4.2 Confiabilidad en la transmisión de datos

El sistema IoT basado en LoRa alcanzó 1.2 km en entornos rurales y 650 m en entornos urbanos, con pérdidas de paquetes inferiores al 5 %.

La latencia promedio (1.5–1.7 s) asegura la disponibilidad de datos casi en tiempo real, adecuada para aplicaciones de monitoreo ambiental no críticas.

4.3 Impacto ambiental y social

El prototipo constituye una alternativa económica y replicable frente a estaciones oficiales, lo que favorece su adopción en comunidades rurales y urbanas con recursos limitados.

La facilidad de integración en plataformas web y móviles permite la democratización del acceso a datos ambientales, fomentando procesos de educación ambiental y participación ciudadana.

4.4 Innovación y pertinencia

El diseño modular aporta flexibilidad y escalabilidad, facilitando la incorporación de nuevos sensores según los requerimientos locales (ej. nitratos, amonio, SO₂).

El proyecto se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 6, 9, 11 y 13), al contribuir a la gestión sostenible del agua, la innovación tecnológica y la mitigación de la contaminación.

4.5 Limitaciones identificadas

El sensor SDS011 mostró alta dispersión en condiciones de humedad, lo cual requiere corrección mediante algoritmos de compensación o integración con un sensor de humedad relativa.

La autonomía energética del sistema, aunque adecuada (8 horas con panel solar auxiliar), puede ampliarse mediante optimización de consumo y baterías de mayor capacidad.

4.6 Proyecciones futuras

Incorporar inteligencia artificial y machine learning para la predicción de tendencias de contaminación y la detección temprana de anomalías.

Integrar el sistema con plataformas IoT abiertas (ej. ThingsBoard, Node-RED, Grafana) para análisis y visualización avanzada de datos.

Escalar el prototipo a redes de sensores distribuidas en diferentes localidades, construyendo mapas dinámicos de calidad del aire y agua.

Desarrollar módulos autosostenibles mediante sistemas fotovoltaicos de mayor capacidad, asegurando operación continua en campo.

Referencias

Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376.
<https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>

Artés, D. (26 de agosto de 2022). *Análisis y diseño de un dispositivo de sensores ambientales para su integración con terminales móviles*. (Trabajo de grado). Universidad Politécnica de Madrid.
<https://oa.upm.es/47295/>

Arvind, S., & Dhingra, S. (2021). Real-time monitoring system for water quality parameters using IoT and cloud computing. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5671–5675.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.430>

Baranidharan, B., & Thanushkodi, K. (2022). IoT based real-time air pollution monitoring system using sensors and LoRa communication. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(1), 1–12.
<https://doi.org/10.1007/s10661-021-09634-1>

Cama A., De la Hoz, E., & Cama, D. (26 de agosto de 2022). Las redes de sensores inalámbricos y el Internet de las cosas. *Revista INGE CUC*.
<https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/1546/7.%20Las%20redes%20de%20sensores%20inal%C3%A1mbricos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Flórez F., Cossio, E. (26 de agosto de 2022). Aplicaciones, enfoques y tendencias del Internet de las cosas (IoT): revisión sistemática de la literatura. *Artículos del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals*.
<https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1020/543/1/Aplicaciones%20enfoques%20y%20tendencias%20del%20IoT.pdf>

Kumar, P., Singh, S. K., & Tripathi, R. (2020). An IoT-based framework for real-time monitoring and control of air and water pollution. *Environmental Technology & Innovation*, 19, 100829.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100829>

Peña, J., García, H., Laudy, A., Modzelewska, E., Villegas, M. (26 de agosto de 2022). Aplicación de sensores ambientales para la conservación preventiva de bienes culturales en el Palacio Real Museo de Wilanów. *XVIII Congreso Internacional Conservación y*

Restauración de Bienes Culturales..
<https://digital.csic.es/bitstream/10261/123955/1/Aplicaci%C3%B3n%20de%20sensores%20ambientales.pdf>

Rubio, J., Hernández, J., Ávila, F., Stein, J., & Meléndez, A. (2016). Sistema sensor para el monitoreo ambiental basado en redes neuronales. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 17(2), 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.06.006>

Socarrás, C., Fernández, J., Gómez, J., & García, A. (2019). Integración de un nodo móvil en una red híbrida de sensores inalámbricos para entornos urbanos. *Revista de acceso abierto MDPI*, 19(1(2019)), 215–235. <https://doi.org/10.3390/s19010215>

Suryawanshi, P., & Hegde, G. (2022). IoT-based smart water quality monitoring system using Arduino and cloud computing. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 13(2), 89–94. <https://www.ijser.org/researchpaper/IoT-based-Smart-Water-Quality-Monitoring-System.pdf>

Tovar, J. (26 de agosto de 2022). *Determinar las variables asociadas a un sistema de diagnóstico de contaminación ambiental en área urbana*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.

<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/19972/1075230624.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

World Health Organization. (2021). *Air quality guidelines: Global update 2021*. WHO Press. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

Yadav, R., & Pandey, M. (2019). Design and implementation of air quality monitoring system using IoT with Arduino. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 8(6), 1315–1320. <https://doi.org/10.35940/ijeat.F8834.088619>

Zhang, D., & Wang, L. (2020). Low-cost sensors for real-time environmental monitoring: A review. *IEEE Sensors Journal*, 20(20), 11224–11235. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2996639>