

# Desarrollo metodológico de un sistema de monitoreo IoT-ML para la red de acueducto de Los Santos, Panamá

Melgar, Yarelis

Facultad de Ingeniería Civil – Universidad Tecnológica de Panamá  
Panamá, República de Panamá  
yarelis.melgar@utp.ac.pa

Hooper, Mauricio

Facultad de Ingeniería Civil – Universidad Tecnológica de Panamá  
Panamá, República de Panamá  
mauricio.hooper@utp.ac.pa

## Abstract

Water supply systems in Panama experience water losses of close to 45%, a situation exacerbated by the lack of real-time network monitoring. This work proposes the methodological development of a LoRaWAN monitoring system for the Los Santos water distribution network, which supplies more than 57,000 inhabitants in the Arco Seco region through the treatment of La Villa River water at the IDAAN Rufina Alfaro water treatment plant. The methodology defines the IoT architecture and proposed machine learning algorithms to assess current pressure patterns and predict their behavior. The IoT architecture is structured into four main layers: acquisition, communication, storage, and application. The study defines the IoT sensing scheme based on LoRaWAN, the communication protocols, a hybrid cloud–local storage architecture, methods for data cleaning and validation, visualization dashboards, and the procedure for building the predictive pressure model, from training through to validation of the data obtained.

**Keywords:** Internet of Things, LoRaWAN, MQTT, Machine Learning, water monitoring.

## Resumen

Los acueductos en Panamá registran pérdidas de agua cercanas al 45%, agravadas por la falta de monitoreo de la red en tiempo real. Este trabajo propone el desarrollo metodológico de un sistema de monitoreo LoRaWAN para la red de acueducto de Los Santos, que beneficia a más de 57,000 habitantes en la Región del Arco Seco a través del tratamiento de las aguas del río La Villa en la planta potabilizadora IDAAN Rufina Alfaro. La metodología

define la arquitectura IoT y los algoritmos de aprendizaje automático propuestos para evaluar los patrones de presión actuales y predecir su comportamiento. La arquitectura IoT se desarrolla en cuatro capas principales: adquisición, comunicación, almacenamiento y aplicación. Se logró definir la sensorización IoT basada en LoRaWAN, los protocolos de comunicación, una arquitectura híbrida de almacenamiento en nube y local; métodos para limpieza y validación de datos, tableros de visualización, y el procedimiento para la construcción del modelo predictivo de presiones, desde el entrenamiento hasta validación de los datos obtenidos.

**Palabras claves:** Internet of Things, LoRaWAN, MQTT, Machine Learning, water monitoring.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las redes de distribución de agua potable enfrentan estrés hídrico, envejecimiento de infraestructura y altas pérdidas, por lo que los enfoques basados solo en inspecciones y registros puntuales resultan insuficientes [1]. La medición en tiempo real, soportada en IoT y machine learning, permite controlar presiones, detectar y localizar fugas con mayor rapidez, mejorando los indicadores operativos y la toma de decisiones [2]–[4]. En este contexto, las LPWAN ofrecen gran cobertura con bajo consumo; entre ellas, LoRaWAN sobresale en entornos semiurbanos por su escalabilidad, robustez y adecuada gestión de red [5]. Este trabajo propone un sistema de monitoreo LoRaWAN para la red de acueducto de Los Santos, que abastece a más de 57 000 habitantes de la región del Arco Seco de Panamá mediante la planta potabilizadora IDAAN Rufina Alfaro [6].

## 2. MÉTODO

### A. Área de estudio

El acueducto de Los Santos, ubicado en la provincia del mismo nombre en la región del Arco Seco de Panamá, abastece los distritos de Los Santos, Guararé y Las Tablas, incluyendo localidades como El Carate, Santo Domingo, Las Tablas cabecera, Guararé cabecera, La Espigadilla, La Villa de Los Santos y otras comunidades aledañas [7], [8] (Fig. 1). En los últimos años, ha enfrentado pérdidas significativas en la red, dependencia de inspecciones manuales y variaciones de presión registradas de forma puntual, situación que subraya la necesidad de un monitoreo en tiempo real para comprender mejor el comportamiento del sistema y respaldar decisiones operativas basadas en datos.

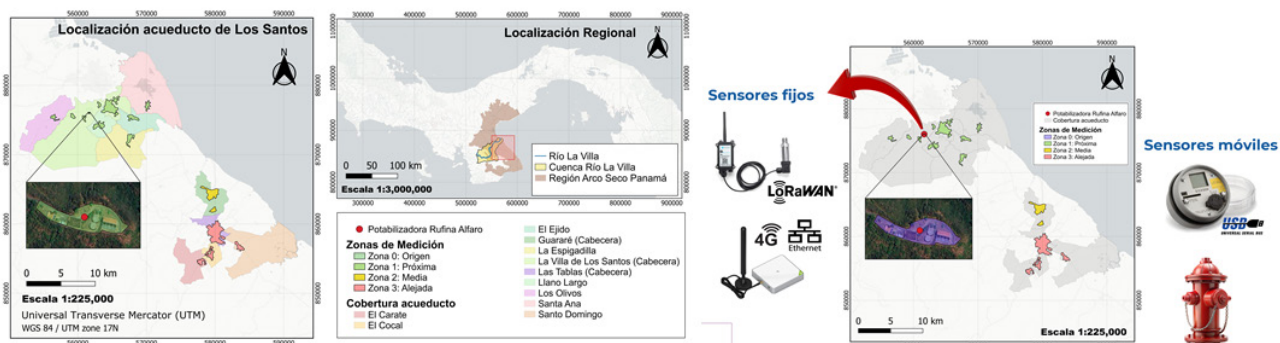


Fig. 1. Área de estudio y zonas propuestas para la medición de presiones

## B. Criterios de diseño

Los principales parámetros de LoRaWAN son el factor de dispersión (SF), el ancho de banda (BW), la frecuencia central (CF), la potencia de transmisión (TP) y la velocidad de codificación (CR) [5]. En aplicaciones de monitoreo, se recomiendan valores de SF entre 7–12, TP entre 2–14 dBm, frecuencia central de 915 MHz e intervalos de envío de 5–30 minutos para áreas de hasta 25 km<sup>2</sup> [5], [9]. En Panamá, el PNAF autoriza el uso de equipos RLAN/WAN en la banda de 902–928 MHz [10], por lo que la configuración seleccionada se ajusta al marco regulatorio nacional [10]. Los dispositivos considerados emplean LoRaWAN 1.0.3 de clase A, en la que los nodos inician sus transmisiones ascendentes según sus necesidades de comunicación, lo que minimiza el consumo energético a costa de una mayor latencia en el enlace descendente [5], [11]. Además, la red adopta la topología en estrella característica de LoRaWAN, donde los dispositivos finales no se comunican entre sí, sino únicamente con las puertas de enlace [5], [9].

## 3. RESULTADOS

El sistema de monitoreo propuesto (Fig. 2) se organiza en cuatro capas: adquisición, comunicación, almacenamiento y aplicación. En la capa de adquisición se combina un nodo fijo LoRaWAN de presión, ubicado en un punto hidráulicamente representativo, con tres registradores móviles que se desplazan por distintos sectores y descargan los datos por USB. Este esquema mixto permite capturar tanto la dinámica de largo plazo como campañas focalizadas en puntos críticos, en línea con arquitecturas IoT escalables para redes de agua potable basadas en nodos de baja potencia y sensorización de presión/caudal [12]–[15].

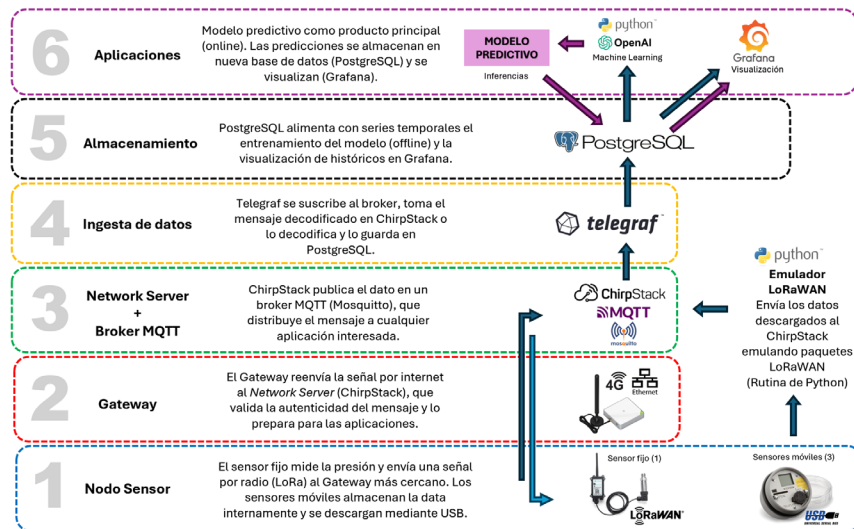


Fig. 2. Arquitectura IoT propuesta

En la capa de comunicación, un gateway LoRaWAN envía los paquetes al network server (ChirpStack), mientras que un broker MQTT (Mosquitto) actúa como bus de mensajería; los datos históricos de los sensores móviles se inyectan mediante un emulador LoRaWAN en Python, lo que facilita validar la arquitectura más allá del tráfico en tiempo real [16]–[19]. Sobre esta base, la capa de ingesta y almacenamiento utiliza Telegraf, suscrito a tópicos MQTT, para normalizar los mensajes y almacenarlos en PostgreSQL orientado a series temporales, siguiendo patrones de pipelines desacoplados en plataformas IoT modernas [20]–[22]. Finalmente, en la capa de aplicación se integran paneles en Grafana para la supervisión casi en tiempo real y un entorno de analítica en Python donde se entrenan modelos de machine learning cuyos resultados se visualizan también en Grafana; la literatura muestra que la combinación de monitorización continua de presión y modelos de aprendizaje automático mejora significativamente la detección y localización temprana de fugas [21]–[25].

## 4. CONCLUSIONES

La arquitectura IoT propuesta articula de forma coherente la sensorización de presión, la red LoRaWAN conforme al PNAF, el pipeline de datos sobre MQTT–Telegraf–PostgreSQL y la capa de analítica y visualización en Grafana, respondiendo a la necesidad de monitoreo en tiempo real identificada para el acueducto de Los Santos. Esta organización modular en cuatro capas facilita la escalabilidad, la integración con sistemas existentes y la explotación de series temporales de presión mediante enfoques de machine learning. Con ello, se fortalece la capacidad operativa para detectar y localizar fugas con mayor rapidez, mejorar el control de presiones y apoyar decisiones informadas en la gestión del recurso hídrico urbano.

## Referencias

- [1] E. Farah y I. Shahrour, “Water Leak Detection: A Comprehensive Review of Methods, Challenges, and Future Directions”, *Water* 2024, vol. 16, núm. 20, p. 2975, oct. 2024, doi: 10.3390/W16202975.
- [2] Y. Liu, X. Ma, Y. Li, Y. Tie, Y. Zhang, y J. Gao, “Water Pipeline Leakage Detection Based on Machine Learning and Wireless Sensor Networks”, *Sensors* 2019, vol. 19, núm. 23, p. 5086, nov. 2019, doi: 10.3390/S19235086.
- [3] N. J. Okoli y B. Kabaso, “Building a Smart Water City: IoT Smart Water Technologies, Applications, and Future Directions”, *Water (Basel)*, vol. 16, núm. 4, p. 557, feb. 2024, doi: 10.3390/w16040557.
- [4] X. Fan, X. Zhang, y X. Yu, “Machine learning model and strategy for fast and accurate detection of leaks in water supply network”, *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, vol. 2, núm. 1, pp. 1–21, dic. 2021, doi: 10.1186/S43065-021-00021-6/FIGURES/20.
- [5] A. M.; Alghamdi, E. F.; Khairullah, M. M. Al Mojamed, A. M. Alghamdi, E. F. Khairullah, y M. M. Al Mojamed, “LoRaWAN Performance Analysis for a Water Monitoring and Leakage Detection System in a Housing Complex”, *Sensors* 2022, vol. 22, núm. 19, p. 7188, sep. 2022, doi: 10.3390/S22197188.
- [6] DAAN, “Plataforma SIG IDAAN”. Consultado: el 4 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://sig-idaan.hub.arcgis.com/>
- [7] R. Rodríguez, “Falta de agua en Los Santos se debe a trabajos en la potabilizadora Rufina Alfaro – En Segundos Panama”, *En Segundos*, el 6 de septiembre de 2021. Consultado: el 17 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ensegundos.com.pa/2021/09/06/falta-de-agua-en-los-santos-se-debe-a-trabajos-en-la-potabilizadora-rufina-alfaro/>
- [8] N. Ruíz, “Declaran Estado de Emergencia en Herrera y Los Santos por contaminación del río La Villa”, *Telemetro Reporta*, Panamá, el 11 de junio de 2025. Consultado: el 17 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.telemetro.com/nacionales/declaran-estado-emergencia-herrera-y-los-santos-contaminacion-del-rio-la-villa-n6042787>
- [9] A. Farhad, D. H. Kim, S. Subedi, y J. Y. Pyun, “Enhanced LoRaWAN Adaptive Data Rate for Mobile Internet of Things Devices”, *Sensors* 2020, vol. 20, núm. 22, p. 6466, nov. 2020, doi: 10.3390/S20226466.
- [10] ASEP, “Plan Nacional de Atribución de Frecuencias (PNAF)”, Panamá, Panamá, dic. 2016. Consultado: el 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.asep.gob.pa/wp-content/uploads/telecomunicaciones/pnaf/pnaf-dic2015.pdf>
- [11] N. E. H. Djidi, M. Gautier, A. Courtay, O. Berder, y M. Magno, “How Can Wake-up Radio Reduce LoRa Downlink Latency for Energy Harvesting Sensor Nodes?”, *Sensors* 2021, vol. 21, núm. 3, p. 733, ene. 2021, doi: 10.3390/S21030733.
- [12] V. Slaný, A. Lučanský, P. Koudelka, J. Mareček, E. Krčálová y R. Martínek, “An Integrated IoT Architecture for Smart Metering Using Next Generation Sensor for Water Management Based on LoRaWAN Technology: A Pilot Study,” *Sensors*, vol. 20, n.º 17, art. 4712, 2020, doi: 10.3390/s20174712.
- [13] J. P. García-Martín et al., “IoT solution for smart water distribution networks based on a low-power wireless network, combined at the device-level: A case study,” *Internet of Things*, vol. 23, art. 100873, 2023, doi: 10.1016/j.iot.2023.100873.
- [14] A. M. Alghamdi, E. F. Khairullah y M. M. Al mojamed, “LoRaWAN Performance Analysis for a Water Monitoring and Leakage Detection System in a Housing Complex,” *Sensors*, vol. 22, n.º 19, art. 7188, 2022, doi: 10.3390/s22197188.
- [15] N. J. Okoli y B. Kabaso, “Building a Smart Water City: IoT Smart Water Technologies, Applications,

- and Future Directions,” *Water*, vol. 16, n.º 4, art. 557, 2024, doi: 10.3390/w16040557.
- [16] S. A. Ansari y V. K. Vidyarthi, “Use of Internet of Things in water resources applications: challenges and future directions: a critical review,” *Discover Internet of Things*, vol. 5, art. 96, 2025, doi: 10.1007/s43926-025-00193-7.
- [17] S. T. Ahmed y A. Annamalai, “On Private Server Implementations and Data Visualization for LoRaWAN,” en *Proc. 2023 IEEE 13th Symp. on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE)*, Penang, Malaysia, 2023, pp. 342–347, doi: 10.1109/ISCAIE57739.2023.10165109.
- [18] M. Kashyap, A. K. Dev y V. Sharma, “Implementation and Analysis of EMQX Broker for MQTT Protocol in the Internet of Things,” *e-Prime: Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 10, art. 100846, 2024, doi: 10.1016/j.prime.2024.100846.
- [19] B. Mishra, B. Mishra y A. Kertesz, “Stress-Testing MQTT Brokers: A Comparative Analysis of Performance Measurements,” *Energies*, vol. 14, n.º 18, art. 5817, 2021, doi: 10.3390/en14185817.
- [20] C. Wang et al., “Apache IoTDB: Time-Series Database for Internet of Things,” *Proc. VLDB Endowment*, vol. 13, n.º 12, pp. 2901–2904, 2020, doi: 10.14778/3415478.3415504.
- [21] G. Calderon, G. del Campo, E. Saavedra y A. Santamaría, “Monitoring Framework for the Performance Evaluation of an IoT Platform with Elasticsearch and Apache Kafka,” *Information Systems Frontiers*, vol. 26, pp. 2373–2389, 2024, doi: 10.1007/s10796-023-10409-2.
- [22] M. Bajpai, “Building Time-Series Data Monitoring Pipeline from the Cloud to Grafana,” *International Journal for Multidisciplinary Research*, vol. 5, n.º 1, pp. 232–241, 2023, doi: 10.36948/ijfmr.2023.v05i01.14155.
- [23] P. Pandey, S. Mücke y R. Shrestha, “Machine Learning-Based Digital Twin for Water Distribution Network Anomaly Detection and Localization,” *Proceedings of the 3rd WDSA/CCWI Joint Conference*, Ferrara, Italy, 2024, Proc. 2673-4591, vol. 69, n.º 1, art. 201, doi: 10.3390/proceedings2024069201.
- [24] H. Yu et al., “Leak Detection in Water Distribution Networks Based on Deep Learning and Data Imaging,” *AQUA – Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, vol. 73, n.º 8, pp. 1741–1754, 2024, doi: 10.2166/aqua.2024.054.
- [25] D. Elshazly, S. L. Abaza, R. Z. Homsy y L. Khalil, “An Automated Geographical Information System-Based Spatial Machine Learning Method for Leak Detection in Water Distribution Networks Using Monitoring Sensors,” *Applied Sciences*, vol. 14, n.º 13, art. 5853, 2024, doi: 10.3390/app14135853.

## Autorización y Licencia CC

Los autores autorizan a APANAC XVIII a publicar el artículo en las actas de la conferencia en Acceso Abierto (Open Access) en diversos formatos digitales (PDF, HTML, EPUB) e integrarlos en diversas plataformas online como repositorios y bases de datos bajo la licencia CC:

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

Ni APANAC XVIII ni los editores son responsables ni del contenido ni de las implicaciones de lo expresado en el artículo.