

# Micromedición hídrica mediante IoT en infraestructura pública: experiencia en Baja California Sur

*IoT-enabled hydrological micrometering for public infrastructure management: implementation experience in Baja California Sur, Mexico*

## Información del reporte:

Licencia Creative Commons



El contenido de los textos es responsabilidad de los autores y no refleja forzosamente el punto de vista de los dictaminadores, o de los miembros del Comité Editorial, o la postura del editor y la editorial de la publicación.

Para citar este reporte técnico:

Hernández Cosío, J., Flores López, M.Z. y Villavicencio Álvarez, M.E. (2026). Micromedición hídrica mediante IoT en infraestructura pública: experiencia en Baja California Sur [número especial]. *Cuadernos Técnicos Universitarios de la DGTIC*, 4, páginas (28 - 47). <https://doi.org/10.22201/dgtic.30618096e.2026.4.ESPECIAL.163>

**Jesús Hernández Cosío**

Universidad Autónoma de Baja California Sur

[jhernandez@uabcs.mx](mailto:jhernandez@uabcs.mx)

ORCID: 0000-0001-7446-5116

**María Z. Flores López**

Universidad Autónoma de Baja California Sur

[m.zflores@uabcs.mx](mailto:m.zflores@uabcs.mx)

ORCID: 0000-0002-8446-9951

**Manuel Eduardo Villavicencio Álvarez**

Universidad Autónoma de Baja California Sur

[me.villavicencio@uabcs.mx](mailto:me.villavicencio@uabcs.mx)

ORCID: 0009-0000-6075-6801

## Resumen

La gestión del agua en zonas áridas representa un desafío estructural para las instituciones de educación superior, que deben optimizar sus operaciones y asumir un rol activo en la sostenibilidad de los recursos naturales. El sistema SMART-UABCS es una propuesta tecnológica desarrollada en el ámbito universitario que utiliza el Internet de las Cosas, integra dispositivos de micromedición y protocolos de comunicación encriptados, así como una plataforma web que monitorea el consumo de agua en tiempo real en edificios institucionales. Compatible con infraestructura de Tecnologías de la Información y la Comunicación universitaria mediante protocolos *Lightweight Directory Access Protocol* y *Security Assertion Markup Language*, fue construido íntegramente con tecnologías de código abierto para garantizar autonomía tecnológica y replicabilidad. El sistema operó de forma continua en el edificio central del H. XVII Ayuntamiento de

La Paz, Baja California Sur, entre febrero y noviembre de 2023, con una eficiencia operativa del 95 por ciento, empleando microcontroladores ESP32S3, comunicaciones WiFi y LoRa, así como un framework PHP entre febrero y noviembre de 2023, con una eficiencia operativa del 95 por ciento, empleando microcontroladores ESP32S3, comunicaciones WiFi y LoRa, así como un *framework* PHP 8.2 basado en Laravel. Los resultados potenciaron la detección temprana de anomalías, la identificación de patrones temporales y la generación de información estratégica para la toma de decisiones. El Reconocimiento ANUIES TIC 2023 en la categoría TIC en Responsabilidad Social confirma su pertinencia dentro del ecosistema universitario de Tecnologías de la Información y la Comunicación, en especial su potencial de transferencia tecnológica a instituciones que enfrentan problemáticas hídricas en zonas áridas.

**Palabras clave:** Internet de las cosas, gestión del agua, micromedición, telemetría de recursos naturales.

### Abstract

*Water management in arid zones represents a structural challenge for higher education institutions, which must optimize their operations while assuming an active role in the sustainability of natural resources. The SMART-UABCS system is a technology-based proposal developed within a university context that leverages the Internet of Things, integrating micro-metering devices and encrypted communication protocols alongside a web platform that monitors water consumption in real time across institutional buildings. Because of its compatibility with the university ICT infrastructure through Lightweight Directory Access Protocol and Security Assertion Markup Language protocols, it was built entirely on open-source technologies to ensure technological autonomy and replicability. The system operated continuously in the main building of the H. XVII City Council of La Paz, Baja California Sur, between February and November 2023, achieving 95 percent operational efficiency, and employing ESP32-S3 microcontrollers, WiFi and LoRa communications, and a PHP 8.2 framework based on Laravel. The results strengthened early anomaly detection, the identification of temporal consumption patterns, and the generation of strategic information for evidence-based decision-making. "Reconocimientos ANUIES TIC 2023" awarded this project in the ICT for Social Responsibility category, confirming the system's relevance within the university Information and Communications Technology ecosystem and its potential for technological transfer to institutions facing water-related challenges in arid regions.*

**Keywords:** Internet of things, water management, micrometering, natural resources telemetry.

## 1. INTRODUCCIÓN

La península de Baja California presenta uno de los casos más severos de escasez de agua en el territorio mexicano. Su precipitación media anual es inferior a 180 milímetros, lo que la convierte en la entidad federativa con mayor estrés hídrico del país (Comisión Nacional del Agua, 2024). Otros datos alarmantes refieren a la sobreexplotación de más del 50% de sus acuíferos y a las extracciones por encima del volumen de su propia reposición natural. El acuífero de La Paz enfrenta una escasez estructural que pone en peligro la sostenibilidad hídrica a mediano y largo plazo. Ante este escenario, las instituciones de educación superior enfrentan el doble reto de optimizar sus operaciones y liderar la implementación de medidas de sostenibilidad en la gestión de los recursos naturales disponibles.

Las características climáticas de la zona incluyen temperaturas superiores a los 24°C anuales, una evapotranspiración que supera la precipitación observada y lluvias asociadas a huracanes y tormentas

tropicales en verano y otoño. El balance hídrico regional se traduce en déficits acumulativos que generan una caída sostenida de los niveles freáticos y una degradación progresiva de la calidad del agua subterránea por intrusión salina en los sistemas costeros. Este conjunto de factores otorga un valor estratégico a la gestión de cada litro de agua dulce disponible, tanto para las actividades humanas como para la conservación de los frágiles ecosistemas áridos.

Este contexto exige respuestas institucionales proactivas que incorporen tecnologías propias de monitoreo, dado que la ausencia de sistemas de medición en infraestructura pública puede compensarse con una gestión hídrica basada en la evidencia (Maddaus, 1984). Tanto los métodos tradicionales de medición como las mediciones periódicas manuales realizadas con la frecuencia deseada suelen ser registros fragmentados y con capacidades de procesamiento analítico muy limitadas; a veces, no son suficientes para identificar patrones de consumo (Beal, 2017), identificar ineficiencias en las operaciones o reaccionar positivamente ante anomalías como fugas o consumos inusuales (Corraliza, 2000).

El desajuste entre el nivel de desarrollo y las condiciones de la infraestructura también limita la capacidad de aplicar estrategias de optimización mejor controladas, así como la capacidad institucional para alcanzar los objetivos de sostenibilidad de acuerdo con las agendas establecidas o los compromisos con los ODS (Alshehri, 2021). Con respecto a los marcos normativos, las políticas públicas en el área de gestión hídrica han cambiado eminentemente en el país en las últimas dos décadas. Alcalá-Rodríguez *et al.* (2022) sugieren que, desde el reconocimiento de la importancia estratégica de este recurso y la necesidad de que la autoridad competente conozca la situación de consumo medido e información reportada, la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento imponen la obligación de medir el consumo y reportar la información a las autoridades responsables. No obstante, la implementación práctica de estas líneas de acción también encuentra restricciones que son a la vez significativas y considerables en el contexto de las limitaciones de los presupuestos, las capacidades operativas de las institucionales y la falta de soluciones que sean tecnológicamente aplicables, viables y pertinentes a las circunstancias específicas a nivel local y regional.

Los avances en las tecnologías IoT ocurridos en la última década han abierto una ventana de oportunidades nunca antes vistas para la instrumentación automatizada de infraestructuras en distintos ámbitos. Numerosos autores han reportado la viabilidad de sistemas inteligentes de monitoreo de la gestión hídrica basada en sensores y dispositivos inalámbricos. Pruna *et al.* (2016) han demostrado que los medidores digitales son capaces de transmitir datos en tiempo real, así como el ahorro en costos operativos en comparación con los sistemas electromecánicos convencionales. Rubio Jaramillo *et al.* (2018) han establecido marcos metodológicos rigurosos para la validez de los equipos de los sistemas de suministro, formalizando, a su vez, protocolos de la fidelidad metrológica. Sierra *et al.* (2020) examinaron las arquitecturas de sistemas inteligentes para el monitoreo y la gestión de recursos hídricos, mostrando los factores importantes que debían considerarse, incluyendo patrones de diseño aplicables a la gestión de los recursos naturales.

No obstante, la literatura especializada también descubre limitaciones significativas que plantean las soluciones comerciales existentes en el mercado, particularmente en lo que respecta a la relación costo-eficiencia (Ramos *et al.*, 2020). Dichas limitaciones afectan especialmente a las propias instituciones, la flexibilidad de las tecnologías para adaptarse al contexto local y a las necesidades específicas, las oportunidades de integración con los sistemas ya existentes y la dependencia de proveedores externos para mantener las operaciones y brindar servicios técnicos de soporte (Ren *et al.*, 2022). Estas condiciones

explican la razón por la cual se están desarrollando alternativas que puedan responder a las necesidades de cada región mediante aproximaciones que priorizan el enfoque tecnológico autónomo (Stewart, 2010) y la sostenibilidad económica. La Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS), como institución pública, es consciente de que la responsabilidad social implícita en su función sustantiva deriva hacia el compromiso con la gestión de recursos ambientales. Desde este enfoque, la UABCS ha dado respuesta a las necesidades específicas de las instituciones en cuanto al monitoreo del consumo de agua en edificios universitarios, a la par de contribuir a la creación de conocimiento científico y tecnológico, que podría transferirse a otras instituciones que enfrentan problemas similares en hidrología.

Este proyecto interdisciplinario combina la experiencia técnica del Centro de Innovación, Tecnología y Agua con la gestión hídrica del Programa Institucional de Manejo Integral del Agua (Coordinación de Responsabilidad Social Universitaria). Se formalizaron relaciones interinstitucionales con el H. XVIII Ayuntamiento de La Paz, la Comisión Estatal del Agua de Baja California Sur y el OOMSAPAS. Esta colaboración permitió probar el sistema en condiciones operacionales reales (alta demanda y usuarios variables), generando evidencia sobre su funcionalidad, confiabilidad y aceptación por tomadores de decisiones. La validez externa y la relevancia del proyecto con las prioridades nacionales se confirmaron con el reconocimiento ganado en la convocatoria ANUIES-TIC 2023 (categoría TIC en Responsabilidad Social).

El presente reporte técnico documenta el diseño, implementación y validación de una propuesta IoT de micromedición y telemetría hídrica desarrollada con tecnologías de código abierto. Mediante una metodología de desarrollo ágil con marcos SCRUM y evaluación sistemática multinivel, se caracteriza su desempeño operativo durante diez meses de operación continua en infraestructura pública institucional con el propósito de contribuir al acervo de conocimiento transferible sobre gestión hídrica en zonas áridas.

## 2. DESARROLLO TÉCNICO

### 2.1 METODOLOGÍA DE DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN

Para gestionar el proceso de diseño del sistema, construcción y pruebas de software, el equipo interdisciplinario aplicó metodologías ágiles de desarrollo de software, específicamente en el marco de desarrollo SCRUM. Este enfoque propició la organización de ciclos breves de desarrollo con resultados concretos, lo que, a su vez, permitió la adaptación a las nuevas necesidades, así como la integración sistemática de la retroalimentación de los usuarios finales. El desarrollo se realizó en *sprints* (bloques de trabajo) de dos semanas, con revisiones periódicas que involucraron al equipo técnico responsable y al grupo de las instituciones de los beneficiarios.

La primera etapa del proyecto implicó el reconocimiento y la adquisición de requisitos técnicos en el esquema de sesiones de trabajo con los responsables de la toma de decisiones de las instituciones participantes, además de la implementación de un proceso de trabajo de cuatro semanas, complementado siempre con una comunicación fluida entre sesiones y participantes. De esta manera, se identificaron requisitos relacionados con la logística, especificaciones técnicas del sistema de conducción y almacenamiento de agua, criterios para la detección oportuna de fugas, la creación de mensajes de

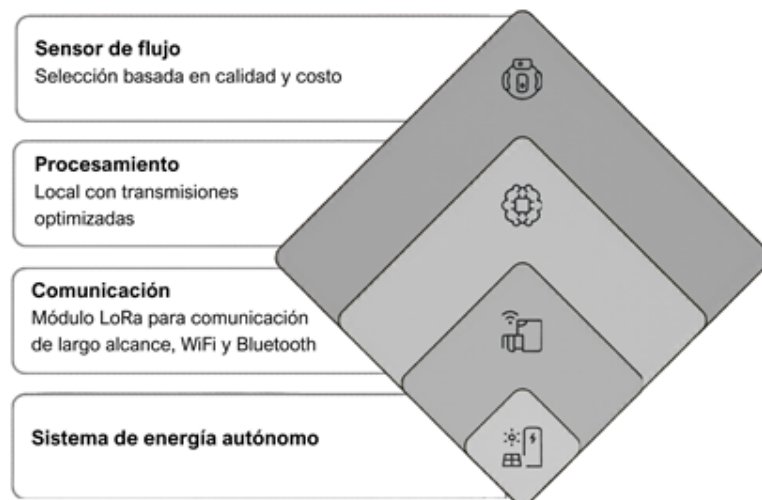
alerta configurables, así como con el suministro de información en formatos estándar para facilitar el análisis y la integración del nuevo sistema con otros ya existentes (Hessel *et al.*, 2023).

Posteriormente, se llevó a cabo la especificación detallada de la arquitectura de integración, considerando diversas restricciones y condiciones del proyecto. Entre los factores contemplados, se encontraban las restricciones presupuestarias, que restringían la elección de componentes, la heterogeneidad en la disponibilidad de la infraestructura de comunicaciones, las condiciones ambientales locales caracterizadas por altas temperaturas y humedad variable, los requisitos de mantenimiento a largo plazo, las necesidades de expansión futuras y la expectativa de vida útil de los equipos. El análisis de riesgos determinó la presencia de amenazas potenciales como la obsolescencia tecnológica, la falta de continuidad de los componentes, la vulnerabilidad y repetibilidad de la seguridad y la imprevisibilidad de las condiciones operativas.

El planteamiento modular del sistema fue una opción arquitectónica de primer orden que trajo consigo numerosos beneficios, tales como facilitar el desarrollo independiente y concurrente de la electrónica, así como la infraestructura de comunicaciones y la plataforma web analítica. Cada módulo se sometió a pruebas de validez unitaria antes de iniciar el proceso de integración del sistema para evitar el riesgo de fallos operativos en campo. La metodología modular, en contraste con los métodos tradicionales en cascada, predeterminó la validación de los pasos que implicaban la combinación de riesgos de desviación entre las especificaciones y los requisitos reales. A continuación, en la Figura 1, se ilustra la arquitectura modular del sistema en cuatro capas funcionales integradas: sensor de flujo, procesamiento local, comunicación LoRa y energía autónoma. Su diseño desacoplado facilita el mantenimiento independiente por componente y la escalabilidad hacia nuevos puntos de medición sin rediseño integral del sistema.

### Figura 1

*Anatomía del sistema integral IoT para micromedición y telemetría hídrica*



Así mismo, se presenta en la Tabla 1 las especificaciones técnicas de los ocho módulos que integran el sistema SMART-UABCS. Para cada módulo se documenta el componente seleccionado, sus parámetros técnicos y el criterio de selección que determinó su adopción. Esta información sistematiza las decisiones de diseño adoptadas durante la fase de especificación arquitectónica y permite verificar que cada

componente responde a características concretas del proyecto: presupuesto acotado, condiciones ambientales extremas, requerimientos de autonomía energética y la necesidad de integración con infraestructura TIC preexistente.

**Tabla 1**

*Especificaciones técnicas resumidas de los módulos del sistema SMART-UABCS*

Módulo	Componente seleccionado	Parámetros técnicos principales	Criterio de selección
Procesamiento central	Microcontrolador ESP32-S3	Hasta 240 MHz; WiFi doble banda; LoRa; Bluetooth 5.0 BLE	Equilibrio funcionalidad-costo; soporte de bibliotecas; experiencia previa del equipo.
Medición de caudal	Sensor YF-S201 (turbina)	Salida pulso digital; linealidad señal-caudal; $R^2 > 0.999$	Precisión metrológica; bajo costo; disponibilidad; interfaz digital simple.
Presión hidráulica	Sensor MPX5700AP (piezorresistivo)	Rango 0–700 kPa; sensibilidad 6.4 mV/kPa	Cobertura del rango operativo; compatibilidad con la arquitectura analógica del sistema.
Temperatura del agua	Sensor DS18B20	Interfaz OneWire; resolución programable 9–12 bits	Precisión; integración digital simplificada; bajo consumo.
Comunicación de largo alcance	Módulo LoRa	Banda ISM 915 MHz; alcance de varios kilómetros; consumo mínimo	Cobertura en zonas sin infraestructura de red; autonomía energética prolongada.
Comunicación local	WiFi / Bluetooth BLE	Mayor volumen de datos; configuración y diagnóstico local	Disponibilidad de infraestructura; uso exclusivo en configuración y diagnóstico.
Protección física	Carcasa PLA impresa en 3D	Clasificación IP65; ventilación pasiva; diseño modular	Sostenibilidad; iteración rápida de diseño; personalización por instalación.
Alimentación y respaldo	Batería Li-ion 18650 + panel solar monocristalino	3000 mAh; panel de 10 W	Continuidad operativa ante cortes eléctricos; autonomía en zonas periféricas.

La Tabla 2 presenta el análisis comparativo estructurado entre el sistema SMART-UABCS y soluciones comerciales de referencia (Itron IZAR y sistemas equivalentes de la categoría Smart Water IoT), considerando los criterios técnicos y económicos utilizados durante la fase de diseño del proyecto (primer semestre de 2022). Los valores de referencia corresponden a cotizaciones directas con proveedores registradas en los archivos del proyecto. Esta comparación sustenta la decisión de optar por un desarrollo institucional propio frente a la adquisición de soluciones comerciales.

**Tabla 2**

*Análisis comparativo: sistema SMART-UABCS vs. soluciones comerciales de referencia*

Criterio de comparación	SMART-UABCS (sistema propio)	Solución comercial de referencia	Ventaja del sistema propio
Costo aproximado de hardware por nodo (USD)	~35 – 50	~120 - 200	Reducción ≈ 60 - 75%
Licencia de plataforma analítica (anual, USD)	0 (código abierto)	~800 - 2,400	Eliminación total del costo recurrente
Soporte técnico externo requerido	No (equipo interno)	Sí (proveedor)	Autonomía operativa institucional
Dependencia de proveedor para actualizaciones	No	Sí	Control total del ciclo de vida
Adaptabilidad a condiciones locales	Alta (código modificable)	Baja (sistema cerrado)	Integración con sistemas existentes

*Nota:* Soluciones de referencia consultadas, plataformas equivalentes de la categoría SmartWater IoT (archivos del proyecto).

La evaluación sistemática implicó varios niveles de pruebas, diseñados para evaluar diferentes aspectos del sistema. Las pruebas de laboratorio se realizaron en un entorno cerrado con equipos de referencia certificados, lo que permitió validar la precisión de los sensores. Se analizó la estabilidad de las comunicaciones en condiciones ideales y la fiabilidad del almacenamiento mediante simulación de escenarios. Posteriormente, se realizaron experimentos de campo en condiciones de trabajo, primero en instalaciones universitarias bajo supervisión constante y, posteriormente, en edificios gubernamentales bajo monitoreo remoto. Este proceso de escalado permitió detectar y abordar problemas de interferencia de radiofrecuencia, voltaje y diferencias de acceso con ingresos no autorizados antes de la implementación.

## 2.2 ARQUITECTURA DE HARDWARE Y SISTEMAS DE MEDICIÓN

### 2.2.1 SELECCIÓN Y CRITERIOS DE EVALUACIÓN DEL MICROCONTROLADOR

El núcleo del sistema de medición de caudal fue una plataforma basada en un microcontrolador ESP32-S3, seleccionado tras un análisis comparativo de las opciones de mercado. Los criterios que determinaron la

elección del microcontrolador incluyeron la capacidad de integrar procesos de hasta 240 megahercios, comunicaciones Wi-Fi de doble banda, LoRa (*Long Range*) y Bluetooth 5.0 de bajo consumo, desempeño eficiente con bibliotecas de las placas ESP32, relativa asequibilidad que se ajusta a las limitaciones presupuestarias de las instituciones y el tamaño del soporte de desarrollo, incluyendo las bibliotecas del hardware.

La selección de componentes también implicó el análisis técnico y de costos de un conjunto de opciones. En el caso de los microcontroladores, la elección de la plataforma Arduino, ESP8266, ESP32 y Raspberry Pi se basó en la comparación de las capacidades de los procesadores, el consumo de energía, la presencia de protocolos de comunicación integrados, la disponibilidad de bibliotecas de software, el costo unitario y la experiencia previa del equipo.

### 2.2.2 ARQUITECTURA MAESTRO-ESCLAVO Y SELECCIÓN DE SENSORES DE FLUJO

Se optó por el ESP32-S3 debido a su equilibrio entre funcionalidad y precio, así como a su experiencia favorable en proyectos similares. En cuanto a los sensores de flujo, se consideraron las tecnologías de turbina, entre ellas, los sensores electromagnéticos y los ultrasónicos. Los sensores de flujo de tipo turbina se seleccionaron por su competencia en términos de precisión, bajo costo, disponibilidad en el mercado y facilidad de conexión con interfaces de pulso digital. La arquitectura maestro-esclavo utilizada permitió la sincronización efectiva de varios nodos de mediciones, distribuidas espacialmente mediante una unidad de control central. El nodo maestro, dotado de capacidades de procesamiento de alto nivel y conexión directa a internet, sincronizó temporalmente todos los dispositivos mediante el protocolo NTP y agregó la información obtenida por los nodos esclavos para optimizar el ancho de banda y gestionar las actualizaciones del firmware de forma remota. Los nodos esclavos, con una configuración simplificada y un consumo energético reducido, tenían la tarea de adquirir los datos de los nodos sensores, así como transportar los datos al nodo maestro a través de protocolos de bajo consumo energético (Haughian, 2018).

### 2.2.3 CALIBRACIÓN DE SENSORES DE CAUDAL E INSTRUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA

Para la medición del caudal hídrico, se utilizaron los sensores YF-S201, que son dispositivos de turbina y su salida es un pulso digital. La dependencia entre la frecuencia de la señal y el caudal instantáneo es prácticamente lineal. El proceso de calibración se registró detalladamente y se definieron los factores de corrección de cada medidor. Las curvas se calibraron mediante regresiones de tercer orden, con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) superiores a 0.999 en todos los dispositivos caracterizados.

La calibración se realizó de forma interna mediante un banco de pruebas hidráulico diseñado *ad hoc*, utilizando como referencia un medidor volumétrico de precisión clase B. No se recurrió a un laboratorio de metrología acreditado bajo norma ISO/IEC 17025 o equivalente NMX. Si bien los coeficientes de determinación obtenidos ( $R^2 > 0.999$ ) evidencian la consistencia interna de las mediciones, la ausencia de trazabilidad a patrones certificados representa una limitación que deberá subsanarse en fases posteriores del proyecto mediante validación externa con laboratorio acreditado, con el propósito de fortalecer la validez científica del sistema ante las autoridades del agua.

La instrumentación complementaria del sistema consistió en matrices de sensores piezorresistivos de presión absoluta MPX5700AP para monitorear las condiciones hidráulicas con un rango de 0 a 700 kilopascales (o 101.5 psi o libras por pulgada cuadrada) y una sensibilidad de 6.4 milivoltios por kilopascal, sensores de temperatura DS18B20 con interfaz digital OneWire para detectar cambios de temperatura con una resolución programable de 9-12 bits. Esta configuración multisensor no sólo permitió cuantificar los consumos volumétricos, sino también ayudó a determinar correlaciones estadísticamente significativas entre las variables ambientales y el comportamiento hidráulico, lo que amplió sustancialmente las capacidades analíticas del sistema.

### 2.2.4 PRUEBAS DE ESTRÉS Y VALIDACIÓN DE COMPONENTES

Las pruebas de estrés realizadas en prototipos de componentes funcionales sometieron a los componentes a condiciones que excedían las especificaciones nominales de operación. Los microcontroladores se sometieron a ciclos de temperatura entre 0 y 60 grados Celsius, cambios en los voltajes de alimentación entre el 80 y el 120 por ciento del valor nominal y operación prolongada de poco más de 1000 horas sin reinicios. Los sensores de flujo se sometieron a niveles de caudal que excedieron los límites superiores especificados, a presencia de partículas en suspensión que imitaban las condiciones de agua con un alto nivel de turbidez y a ciclos de arranque-parada para evaluar la repetibilidad de las mediciones.

### 2.2.5 DISEÑO DE CARCASAS PROTECTORAS Y FABRICACIÓN ADITIVA

Las carcasas protectoras diseñadas también utilizaron tecnologías de fabricación basadas en impresión 3D con filamento de polilactida ácida, un material biotermoplástico biodegradable y cuyo uso refleja el significado de comprometerse con la sostenibilidad ambiental. El proceso de diseño asistido por computadora tuvo en cuenta varias consideraciones funcionales, como resistencia al impacto, protección mecánica robusta, sellado contra la humedad mediante empaquetaduras grabadas en silicona para detener la penetración de agua con clasificación IP65, ventilación pasiva mediante diseño de canal para disipar el calor sin perder sellado y fácil acceso a los componentes internos mediante diseño modular con empaquetaduras grabadas en silicona. La flexibilidad asociada con la iteración rápida del diseño de ejes y la personalización según las necesidades específicas fue proporcionada por el uso de la impresión 3D.

### 2.2.6 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA Y RESPALDO ENERGÉTICO

El sistema de alimentación instalado contaba con capacidad de respaldo para baterías recargables de iones de litio de formato 1,8650 con una capacidad de 3,000 miliamperios por hora para garantizar su funcionamiento durante interrupciones temporales del suministro principal. La vida útil de la batería y el estado de carga se monitoreaban continuamente, generando alertas cuando los niveles caían por debajo de niveles críticos. Además, se incluía la opción de alimentación fotovoltaica con paneles solares monocristalinos de 10 vatios para instalaciones alejadas de una red eléctrica convencional, especialmente en vigilancia de excavaciones o tanques en zonas periféricas.

## 2.3 INFRAESTRUCTURA DE COMUNICACIONES

### 2.3.1 ARQUITECTURA MULTIPROTOCOLO DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS

Si bien tecnologías como Zigbee, Z-Wave o NB-IoT ofrecen ventajas en densidad de nodos o integración con redes celulares, su adopción implica costos de licenciamiento, dependencia de infraestructura operadora o limitaciones de alcance en entornos abiertos. La combinación WiFi-LoRa-BLE seleccionada optimizó el equilibrio entre cobertura, autonomía energética y autonomía tecnológica institucional bajo las condiciones específicas del proyecto. Las comunicaciones WiFi se utilizaron preferentemente en instalaciones con infraestructura de red local compatible con una banda que pudiera albergar un mayor volumen de datos y actualizaciones frecuentes (Okoli *et al.*, 2024). Las comunicaciones LoRa de largo alcance, que operan en la banda ISM de 915 megahercios, se reservaron para su instalación en zonas lejanas con alcances de varios kilómetros, garantizando un consumo mínimo de energía y un funcionamiento óptimo durante largos periodos con la ayuda de baterías. La conectividad Bluetooth de bajo consumo se diseñó exclusivamente para su uso en la configuración local de dispositivos y su diagnóstico mediante una aplicación móvil especial.

### 2.3.2 PROTOCOLO DE TRANSMISIÓN Y ESTRUCTURA DE PAQUETES DE DATOS

El protocolo de transmisión de datos se diseñó considerando restricciones operativas como límites de ancho de banda, latencia tolerable para aplicaciones de monitoreo no críticas, confiabilidad que garantizara la integridad de la información sin pérdidas significativas y un costo de energía que no afectase la autonomía de los dispositivos alimentados por batería. Los instrumentos reportaron los paquetes de datos con una frecuencia de cinco minutos en condiciones normales de funcionamiento, con un intervalo definido entre la resolución suficiente y la eficiencia energética. El sistema agregó funciones para reducir dinámicamente dicha pausa a un minuto al detectar una anomalía, tras lo cual vuelve automáticamente a la normalidad una vez que las condiciones se estabilizan.

Cada lote de registros contenía datos estructurados con volumetría, como los datos acumulados desde el último informe, expresados en litros y caudal instantáneo en litros por minuto al momento de la medición; la presión absoluta de la red en kilopascales; la temperatura del agua en grados Celsius; la humedad relativa ambiental expresada en porcentaje y el nivel de batería de respaldo expresado en porcentaje de la capacidad nominal, respectivamente; y los códigos de estado de operación que indicaron la presencia de condiciones de alarma, errores de sensor o requisitos de mantenimiento preventivo. La disposición de los paquetes se creó con un enfoque de diseño que consideró la eficiencia en el uso del ancho de banda mediante la codificación compacta de datos binarios.

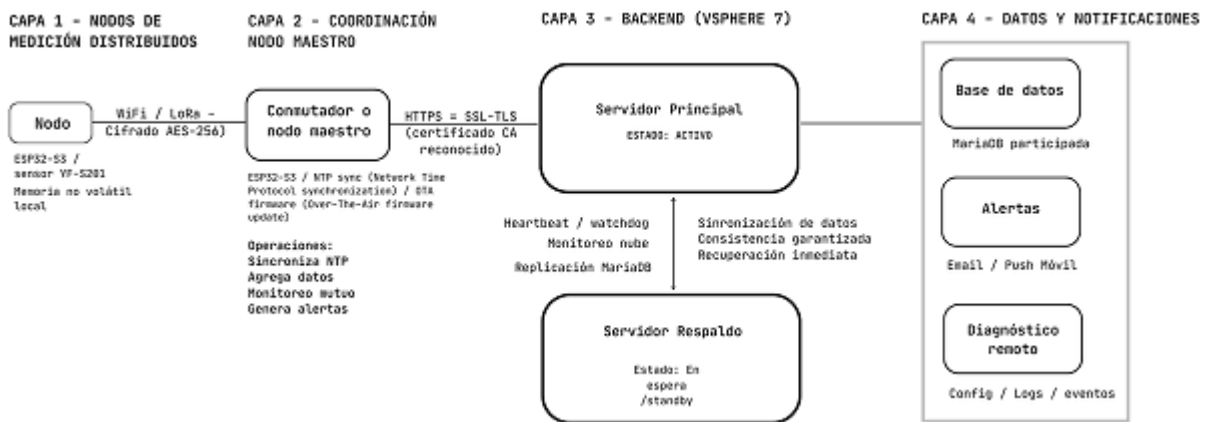
### 2.3.3 REDUNDANCIA, TOLERANCIA A FALLOS Y ALTA DISPONIBILIDAD

La arquitectura implementada de redundancia y tolerancia a fallos favoreció la disponibilidad continua del sistema ante el funcionamiento de componentes individuales o interrupciones del servicio no esperados. Los dispositivos de medición utilizados incluían memoria no volátil, que almacenaba datos localmente en caso de pérdida de contacto y los retransmitía automáticamente una vez restablecido el contacto, sin

pérdida de información. El servidor *backend* se configuró en modo de alta disponibilidad, equipado con nodos principales y de respaldo que se monitorizaban entre sí y redirigían automáticamente los servicios al nodo de respaldo en caso de fallos detectados por el nodo principal. Los datos se sincronizaban entre los servidores mediante protocolos específicos, lo que garantizaba la consistencia de la información y la recuperación inmediata.

**Figura 2**

*Diagrama de la arquitectura de redundancia y alta disponibilidad*



En la Figura 2, se ilustra la arquitectura de redundancia y alta disponibilidad del sistema, organizada en cuatro capas funcionales: nodos de campo con almacenamiento local no volátil, nodo maestro de coordinación, *backend* con configuración activo-respaldo bajo vSphere 7, y capa de datos con notificaciones, evidenciando los mecanismos de *failover* automático y sincronización continua.

### 2.3.4 MONITOREO CONTINUO, DIAGNÓSTICO REMOTO Y GESTIÓN DE ALERTAS

El monitoreo continuo del estado de salud automatizado, de red y diagnóstico, proporcionó una mejor visibilidad del estado operativo de la infraestructura. El sistema utilizó comprobaciones periódicas de conectividad mediante la transmisión de pruebas basadas en paquetes que medían las latencias, las tasas de pérdida por paquete y la calidad de la señal en las alarmas de los enlaces. Los dispositivos también reportaban métricas de desempeño de las comunicaciones y de la medición, lo que permitía detectar la degradación del servicio en una etapa temprana. Se generaban alertas cuando las métricas superaban los umbrales preestablecidos, las cuales se enviaban a los administradores por correo electrónico y mensajes móviles dentro de la aplicación.

### 2.3.5 SEGURIDAD DE LAS COMUNICACIONES Y CIFRADO DE DATOS

La seguridad de las comunicaciones se convirtió en una de las prioridades del diseño arquitectónico, lo que generó la idea de que la información de consumo hidráulico podría ser confidencial en ciertas situaciones dentro del entorno institucional (Mahajan, 2022). Por ello, se implementó AES-256 para cifrar todos los datos en tránsito y garantizar que la información no fuera interceptada ni accedida. El protocolo HTTPS, que utilizaba el certificado SSL, controlado por la autoridad certificadora reconocida, favoreció

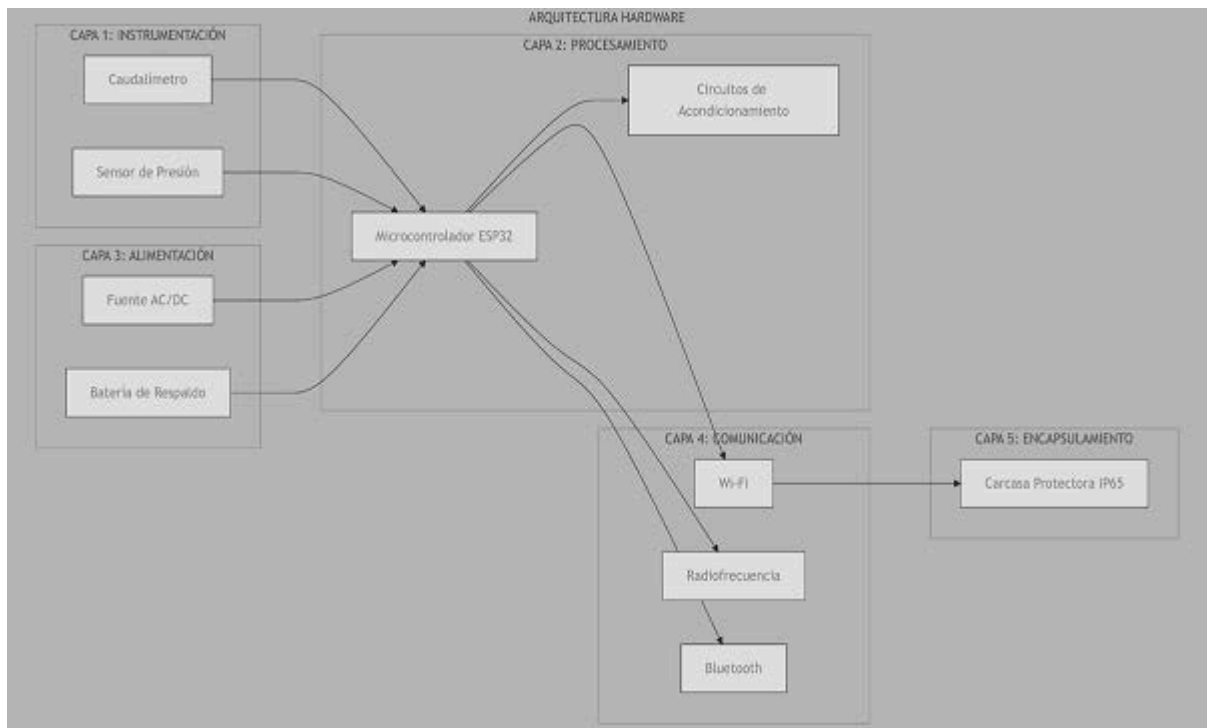
la integridad y la autenticidad de los mensajes entre los dispositivos y los servidores *backend*. Además, se estableció un sólido sistema de autenticación basado en listas de direcciones MAC blancas de las interfaces de las redes, que sólo permitía que los dispositivos incorporados previamente registrados pudieran enviar datos a la infraestructura central.

### **2.3.6 INFRAESTRUCTURA DE BACKEND Y CRITERIOS DE SELECCIÓN TECNOLÓGICA**

La capa de infraestructura de *backend* se implementó sobre servidores virtualizados compatibles con vSphere 7, líder del mercado en virtualización empresarial, que ha permitido provisionar dinámicamente más unidades de procesamiento. La selección de software libre y de código abierto en la construcción de todo el sistema reflejó el equilibrio entre la autonomía institucional y tecnológica, la transparencia en los mecanismos de funcionamiento de los sistemas críticos y la menor dependencia hacia los proveedores.

**Figura 3**

*Arquitectura de los componentes físicos*



En la Figura 3, se presentan los componentes e interrelaciones dentro de la arquitectura de hardware.

## 2.4 PLATAFORMA WEB Y VISUALIZACIÓN DE INFORMACIÓN

### 2.4.1 ARQUITECTURA DE SOFTWARE Y MARCO DE DESARROLLO

La plataforma web se desarrolló sobre el *framework* de base de datos Laravel en PHP 8.2, una combinación de tecnologías que refleja la vanguardia en el desarrollo de aplicaciones web corporativas. La adopción de la arquitectura Modelo-Vista-Controlador (MVC), impulsada por Laravel, promueve la separación de responsabilidades entre los componentes del sistema, el mantenimiento evolutivo del código mediante la organización lógica de las funcionalidades, el desarrollo colaborativo de software que minimiza las ambigüedades y la provisión de bases sólidas para la certificación de funciones automatizadas y comprobables.

### 2.4.2 SERVICIOS DE ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO E INFORMES

El servicio de adquisición de datos recibía las transmisiones de los dispositivos de campo, procesaba la integridad de los paquetes y almacenaba la información en bases de datos. Los procesos de detección de anomalías, agregación de estadísticas de procesamiento y algoritmos de generación de alertas eran ejecutados por el servicio de procesamiento analítico. La recopilación de información en formatos de documentos distribuidos según calendarios preprogramados se automatizó mediante el servicio de informes. Esta división de responsabilidades permitió el desarrollo independiente de componentes según sus necesidades específicas, facilitó el mantenimiento del sistema mediante el aislamiento de cambios y mejoró la resiliencia del sistema ante fallos de servicios individuales.

### 2.4.3 CAPA DE PRESENTACIÓN Y DISEÑO RESPONSIVO

La capa de presentación se desarrolló utilizando estándares modernos de tecnologías web, tales como HTML5, para proporcionar una estructura de contenido semántica; CSS3, para definir estilos con necesidades avanzadas de diseño responsivo; y el *framework Tailwind CSS*, para proporcionar componentes listos para su uso. El enfoque adoptado garantizó que las interfaces se ajustaran automáticamente a los distintos tamaños de pantalla y capacidades de los dispositivos para ofrecer experiencias optimizadas tanto en computadoras de escritorio con pantallas de alta resolución, tabletas con pantallas menores, así como en teléfonos móviles con pantallas más pequeñas que simplifican los elementos visuales.

### 2.4.4 GESTIÓN Y ALMACENAMIENTO DE DATOS

Se utilizó MariaDB como gestor de base de datos que, siendo una versión bifurcada de alto nivel de MySQL, brindó la capacidad de escalar con consultas muy complejas y lograr un alto rendimiento con estructuras y procesamiento de datos complejos. El esquema de datos se diseñó con escalabilidad a largo plazo, lo que predijo el crecimiento del volumen con la incorporación de nuevos dispositivos y la acumulación de registros históricos. La normalización adecuada eliminó redundancias y garantizó la eficiencia de las consultas en el uso frecuente. La ubicación estratégica de índices en columnas, utilizadas en condiciones de filtrado y la partición temporal de tablas, promovió la gestión eficiente del almacenamiento histórico de la información.

## 2.4.5 DETECCIÓN DE ANOMALÍAS E INTELIGENCIA ANALÍTICA

Los modelos de detección de anomalías, según técnicas no supervisadas, definieron perfiles de comportamiento normales mediante el uso del análisis espacio-temporal, detectando desviaciones estadísticamente significativas que podrían reflejar fugas o consumos de agua no autorizados. Los algoritmos dividieron los dispositivos en diferentes tipos, en función de similitudes de patrones de consumo, y permitieron identificar instalaciones con comportamiento atípico y/o brindar detalles adicionales en el monitoreo.

## 2.4.6 INTERFAZ DE USUARIO Y VISUALIZACIÓN DE INDICADORES

La interfaz de usuario se creó teniendo en cuenta los principios básicos de usabilidad e intuición y fue diseñada para ser fácil de usar por usuarios sin conocimientos técnicos de sistemas especializados. El panel principal muestra indicadores clave de desempeño ordenados de forma jerárquica según la relevancia incluida en el consumo diario actualizado en tiempo real con comparación con el día anterior, tendencias semanales y mensuales visualizadas a través de gráficos de líneas con capacidades de énfasis temporal, eventualidades anómalas resaltadas mediante codificación de colores y acceso a funcionalidades frecuentes a través de botones claramente etiquetados.

## 2.4.7 CONTROL DE ACCESO Y GESTIÓN DE PERFILES DE USUARIO

El sistema de control de autenticado y acceso se entrelaza sinérgicamente con los directorios institucionales presentes a través de protocolos de los estándares de la industria LDAP, como directorio consulta, y SAML, como federado. Esto se hace para permitir que los usuarios inicien sesión con sus credenciales institucionales. Esta integración ha proporcionado varias ventajas, como la reducción de la carga administrativa, la mejora de la seguridad mediante la centralización de la complejidad de las contraseñas y la mejora de la experiencia del usuario mediante la autenticación única. Los perfiles de usuario se configuraron con un sistema de permisos granulares que distinguía entre el perfil de visualizador con acceso de sólo lectura, el perfil de operador con acceso de lectura y escritura para establecer umbrales de advertencia, y el perfil de administrador con control general del sistema.

# 3. RESULTADOS

Este sistema operó de forma continua en el edificio central del H. XVIII Ayuntamiento de La Paz entre febrero y noviembre de 2024, acumulando diez meses de experiencia operativa en condiciones reales. Durante este largo período de validez, los flujos de consumo de agua se distribuyeron de forma heterogénea con importantes variaciones relacionadas con los patrones de ocupación del edificio, la ocurrencia de eventos especiales que incrementaron la demanda temporal y las condiciones estacionales relacionadas con la temperatura ambiente, que influyeron en el comportamiento de los usuarios.

## 3.1 DESEMPEÑO OPERATIVO Y PATRONES DE CONSUMO HÍDRICO

La disponibilidad del sistema mostró un nivel de eficiencia superior al 95 por ciento durante todo el período de evaluación. Esta disponibilidad se ejecutó como la proporción de tiempo que el sistema pudo registrar datos de sensores y transmitir información a servidores *backend* de forma correcta y sin

pérdidas sustanciales. Las interrupciones documentadas se atribuyeron principalmente al mantenimiento programado de la infraestructura y del firmware en dispositivos que requerían actualizaciones temporales, así como a dos interrupciones del suministro eléctrico que duraron más de una hora y que sobrecargó las baterías de respaldo. Cabe destacar que, durante todo el período, no se detectaron problemas con el hardware, lo que demuestra la solidez del diseño de los componentes electrónicos y la eficacia de las medidas de protección introducidas.

Los patrones temporales de consumo, caracterizados mediante análisis estadístico de series temporales de consumo que típicamente indican comportamientos con usos marcadamente diferentes durante días laborables y fines de semana, mostraron picos de uso entre las 10 y las 14 horas. Estos correspondían a los períodos de máximo uso de las instalaciones, cuando se utilizaban simultáneamente funciones administrativas, de visitas y otras funciones. Los consumos de fines de semana registraron el nivel más bajo, a menudo menos de 100 litros de consumo diario, y sólo registraron las operaciones mínimas de mantenimiento y vigilancia. Una caracterización tan detallada permitió a la institución destinar gestores para comprender mejor la dinámica de utilización del recurso hídrico y reconocer el potencial de optimización.

La Tabla 3 presenta los datos consolidados del período de operación febrero–noviembre de 2024, organizados mensualmente con indicadores cualitativos del nivel de ocupación del edificio, el nivel relativo de consumo hídrico en días laborables y fines de semana, así como las observaciones operativas más relevantes de cada mes, incluyendo los tres eventos de detección de fugas.

**Tabla 3**

*Resumen de desempeño operativo mensual del sistema SMART-UABCS (febrero–noviembre 2024)*

Mes	Nivel de ocupación del edificio	Consumo días laborables	Consumo fin de semana	Observaciones / eventos
Febrero 2024	Inicio de operación	Variable	N/A	Período de estabilización del sistema
Marzo 2024	Normal	Moderado	Bajo	Operación estable; primeros patrones identificados
Abril 2024	Normal	Moderado	Bajo	-
Mayo 2024	Normal	Alto	Moderado	Inicio de temporada cálida; aumento gradual
Junio 2024	Alta demanda	Alto	Moderado	Alerta 1: fuga detectada en válvula de descarga
Julio 2024	Alta demanda	Muy alto	Moderado	Temperaturas máximas; correlación T-consumo evidente
Agosto 2024	Alta demanda	Muy alto	Moderado	Alerta 2: fuga en conexión corroída
Septiembre 2024	Alta demanda	Alto	Moderado	-

Mes	Nivel de ocupación del edificio	Consumo días laborables	Consumo fin de semana	Observaciones / eventos
Octubre 2024	Normal	Moderado	Bajo	Alerta 3: válvula semiabierta detectada
Noviembre 2024	Fin de operación	Bajo	Muy bajo	Cierre del período de evaluación

*Nota:* Los niveles de consumo (Bajo, Moderado, Alto, Muy alto) expresan estimaciones relativas basadas en el análisis de percentiles de la distribución de consumo diario durante el período. Mayor precisión en los datos no se pueden divulgar por confidencialidad del proyecto.

### 3.2 DETECCIÓN DE ANOMALÍAS, ANÁLISIS DE PRESIÓN Y CORRELACIONES AMBIENTALES

El sistema demostró capacidades prácticas para la detección temprana de anomalías operativas. Durante el período de evaluación, se reportaron tres alertas de aumentos esporádicos del consumo de agua en horas no diurnas, indicando fugas en las instalaciones hidráulicas. La verificación física realizada por el personal de mantenimiento confirmó en todos los casos la presencia de fugas efectivas en válvulas de descarga de inodoros, conexiones corroídas o válvulas semiabiertas que fallaban. Las rápidas composturas, realizadas en un plazo de 24 horas tras la generación de las alertas, evitaron la acumulación de reparaciones urgentes.

Las mediciones continuas de la presión de red proporcionaron datos valiosos sobre el comportamiento dinámico del sistema de distribución de agua. Se encontraron variaciones diurnas consistentes, con presiones máximas durante los períodos nocturnos de bajo consumo, cuando la demanda agregada municipal es menor, y presiones mínimas durante los picos matutinos de consumo, cuando la demanda del sector urbano periférico es máxima.

El análisis de correlación entre la temperatura ambiental y el consumo hídrico diario reveló patrones consistentes con los descritos en la literatura especializada: los coeficientes de correlación más elevados se concentraron en los meses de mayor temperatura, correspondientes a la temporada estival. El coeficiente de correlación de Pearson obtenido ( $r = 0.68$ ) indica una asociación moderada a fuerte, que explica aproximadamente el 46% de la varianza en el consumo diario ( $r^2 = 0.46$ ). El análisis de regresión asociado estima que, por cada incremento de  $1^\circ\text{C}$  en la temperatura máxima diaria, el consumo aumenta en promedio  $187 \pm 23$  L, lo que respalda cuantitativamente la magnitud de esta relación.

Para las pruebas de significancia, se adoptó un nivel  $\alpha = 0.001$ , más estricto que el umbral convencional de  $\alpha = 0.05$ . Esta decisión se justifica por el diseño longitudinal del estudio, que abarca 303 días de medición continua y más de 29,000 observaciones individuales. Esta elevada potencia estadística incrementa el riesgo de detectar como significativas diferencias de magnitud trivial (error de Tipo I). Un umbral más exigente mitiga ese riesgo y confiere mayor rigor a las inferencias. Si bien el estudio se circunscribe a un único edificio institucional, la densidad de la muestra temporal permite aplicar métodos de descomposición de series (STL) y obtener estimaciones con intervalos de confianza estrechos. El diseño longitudinal compensa la limitación del sitio único al capturar la variabilidad estacional completa del ciclo hídrico anual, aportando solidez interpretativa a los resultados.

## 4. CONCLUSIONES

El presente reporte técnico muestra el desarrollo, implementación práctica y procedimiento de validación de la funcionalidad de un diseño de sistema desarrollado con base en tecnologías de Internet de las Cosas. Esto permitió la micromedición de la continuidad y la telemetría en tiempo real del consumo de agua en infraestructura hidráulica de edificios institucionales.

La tecnología arquitectónica implementada, que integra dispositivos autónomos de medición, sistemas multicontador y protocolos de comunicación seguros con encriptación avanzada, junto con una plataforma avanzada de análisis, ha permitido ampliar las capacidades de generación de información y las posibilidades de interacción con los usuarios. Estos factores permitieron superar considerablemente las limitaciones que los sistemas tradicionales de medición han impuesto hasta ahora, como el alto nivel de eficiencia operativa del 95 por ciento. La confiabilidad de la infraestructura de comunicaciones, sumada a las capacidades de detección de anomalías, permitió detectar hasta tres eventos con fugas que, de otro modo, habrían resultado en el vertido aleatorio de más de 100,000 litros de agua. Los resultados demuestran que la inversión económica ya se ha compensado desde una perspectiva costo-beneficio.

El uso de tecnologías de código abierto y hardware libre fue una decisión estratégica que favoreció la autonomía tecnológica a medio y largo plazo y redujo la dependencia de proveedores gracias a la eliminación de los costos recurrentes de licencias. El costo total de implementación por dispositivo, aproximadamente un 60 por ciento inferior al de soluciones comerciales de calidad similar, demostró que las instituciones de educación superior pueden desarrollar sus propias soluciones tecnológicas competitivas mediante equipos interdisciplinarios bien coordinados y con la metodología adecuada.

Las colaboraciones interinstitucionales establecidas con organizaciones gubernamentales permitieron justificar el sistema en diversas condiciones de trabajo y demostraron su flexibilidad ante diversas situaciones en los institutos. Desde la perspectiva del ecosistema TIC universitario, el sistema SMART-UABCS aporta valor en tres dimensiones complementarias. En primer lugar, su integración con los directorios institucionales mediante protocolos LDAP y SAML lo hace directamente interoperable con la infraestructura TIC existente en instituciones de educación superior (IES), sin requerir desarrollos de autenticación paralelos. En segundo lugar, su construcción íntegra sobre tecnologías de código abierto, Laravel, MariaDB, ESP32-S3 y protocolos LoRa en banda libre, favorece que cualquier IES pueda replicar, adaptar y mantener el sistema sin dependencia de proveedores comerciales ni costos de licenciamiento, lo que lo posiciona como un activo tecnológico transferible dentro del ecosistema ANUIES. En tercer lugar, la gestión de datos generados por el sistema es plenamente compatible con las políticas institucionales de gobernanza de datos y con los marcos de TIC responsables que promueven la DGTIC de la UNAM y organismos afines, constituyendo así un modelo de gestión hídrica basada en evidencia replicable en el ámbito universitario nacional.

Las perspectivas de escalabilidad del sistema, desde una visión regional, son prometedoras debido a diversas circunstancias muy favorables. El interés, expresado por otras instituciones que conocieron el proyecto a través de las presentaciones realizadas en diversos foros académicos y gubernamentales, demuestra la necesidad de acceder a propuestas de sistemas de medición de agua de bajo costo.

Se sugieren reflexiones para realizar inversiones integrales que abarquen no sólo los aspectos relacionados con la medición de los suministros de agua, sino también otros componentes, como la capacitación del personal de instalación, mantenimiento y operación del sistema, el desarrollo de

políticas institucionales de gestión de datos que identifiquen la responsabilidad, y la elaboración de mecanismos de gobernanza que garanticen el uso eficaz de la información generada. El sistema SMART-UABCS presupone que las universidades, en primera instancia, pueden convertirse en agentes de cambio en sus áreas y crear tecnologías orientadas a soluciones, dependientes del contexto, que aborden problemáticas socioambientales, a la vez que generan capital especializado y producen conocimiento transferible. El proyecto propuesto es una clara representación del potencial transformador de la investigación orientada a resultados, cuando se adapta a las necesidades de la comunidad y se apoya en alianzas interinstitucionales basadas en la confianza mutua y el intercambio de competencias.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Baja California Sur, se agradece por el apoyo financiero recibido para el desarrollo del proyecto. Asimismo, se reconoce el apoyo activo del H. XVIII Ayuntamiento de La Paz, el Organismo Operador Municipal del Sistema de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de La Paz y la Comisión Estatal del Agua de Baja California Sur, quienes participaron con entusiasmo en la ejecución del trabajo técnico. Por último, los autores agradecen a los evaluadores de la convocatoria ANUIES-TIC 2023 que realizaron recomendaciones constructivas, las cuales enriquecieron el proyecto.

### Declaración de contribución de autoría

**Jesús Hernández Cosío:** Director y gestor del proyecto tecnológico y administrador de tecnologías de la información. Coordinó la elaboración de la estrategia y el enfoque del proyecto desde la perspectiva institucional, organizando los recursos tanto humanos como financieros y gestionando las colaboraciones interinstitucionales con las entidades gubernamentales. Supervisó los cumplimientos de los objetivos y los calendarios, así como condujo la postulación del proyecto. Además, se ocupó de la elaboración de los requerimientos técnicos en colaboración con los usuarios finales, la revisión de las especificaciones del diseño y la validación de los resultados operacionales. Por su parte, su experiencia profesional en dirección de proyectos tecnológicos complejos le otorgó los conocimientos necesarios para articular de manera óptima las capacidades técnicas del equipo con las necesidades institucionales y las expectativas de las entidades beneficiarias.

**María Z. Flores López:** Asesora en gestión, monitoreo y sostenibilidad tanto hídrica como hidrológica. Aportó experiencia técnica específica sobre problemáticas de gestión del agua en contextos de escasez de recursos, orientó el diseño del sistema en función de requerimientos reales de los tomadores de decisiones de instituciones públicas. Participó en la definición de indicadores de rendimiento, relevantes para la evaluación de eficiencia del agua, el diseño de protocolos de interpretación de los datos obtenidos y la formulación de recomendaciones operacionales a partir de análisis de la información. Favoreció las conexiones del proyecto con las iniciativas institucionales de sostenibilidad ambiental y la responsabilidad social universitaria. Contribuyó a la consecución de objetivos de conservación de los recursos hídricos de la región. También realizó la coordinación de las actividades de comunicación y sensibilización de la comunidad de usuarios

**Manuel Eduardo Villavicencio Álvarez:** Gestó técnicamente el proyecto y fue líder de desarrollo de hardware, especialista en innovación y desarrollo tecnológico. Intervino en el desarrollo de la arquitectura del hardware del sistema, llevando a cabo la selección de los componentes electrónicos, el diseño de los circuitos de acondicionamiento de señales, la programación de los microcontroladores y la implementación de los protocolos de comunicación de bajo nivel. Dirigió las actividades de calibración

de los sensores de flujo, presión y temperatura, describiendo los procedimientos y factores de corrección considerados. Llevó a cabo pruebas de laboratorio y de campo para la validación de la exactitud, fiabilidad y robustez de los dispositivos en condiciones de operación reales.

## REFERENCIAS

- Alcalá-Rodríguez, J., Barbosa-García, J. C., Contreras-Guzmán, M. J., Gudiño-Lau, J., Charre-Ibarra, S. M., & Vélez-Díaz, D. (2022). Sistema de monitoreo doméstico para consumo de agua. *XIKUA Boletín Científico de La Escuela Superior de Tlahuelilpan*, 10(19), 17-23. <https://doi.org/10.29057/xikua.v10i19.8049>
- Alshehri, M., Kumar, M., Bhardwaj, A., Mishra, S., & Gyani, J. (2021). Deep learning based approach to classify saline particles in water. *Water*, 13(9), 1251. <https://doi.org/10.3390/w13091251>
- Beal, C. D., Flynn, J., & Gurung, T. R. (2017). Understanding water end use and consumption patterns: An exploratory study using smart meter data. *Water Resources Research*, 53(7), 6053-6072. <https://doi.org/10.1002/2016WR020136>
- Comisión Nacional del Agua. (2024). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero La Paz, Estado de Baja California Sur*. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Corraliza, J. A., & Martín, R. (2000). Estilos de vida, actitudes y comportamientos ambientales. *Medio ambiente y comportamiento humano*, 1(1), 31-56. Recuperado de: [https://mach.webs.ull.es/PDFS/VOL1\\_1/VOL\\_1\\_1\\_c.pdf](https://mach.webs.ull.es/PDFS/VOL1_1/VOL_1_1_c.pdf)
- Haughian, B. (2018). *Design, launch, and scale IoT services* (1ª ed.). Springer Science+Business Media.
- Hessel, F., Almon, L., & Hollick, M. (2023). LoRaWAN security: An evolvable survey on vulnerabilities, attacks and their systematic mitigation. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 18(4), artículo 70, pp. 1–55. <https://doi.org/10.1145/3561973>
- Maddaus, W. O. (1984). *Residential water conservation projects: Summary report*. Brown and Caldwell.
- Mahajan, S. (2022). Design and development of an open-source framework for citizen-centric environmental monitoring and data analysis. *Scientific Reports*, 12, 14416. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18700-z>
- Okoli, N. J., & Kabaso, B. (2024). Building a Smart Water City: IoT Smart Water Technologies, Applications, and Future Directions. *Water*, 16(4), 557. <https://doi.org/10.3390/w16040557>
- Pruna, E., Andaluz, V., Molina, C., Lara, R., Naranjo, C., & Escobar, I. (2016). Medidor digital de agua potable con comunicación inalámbrica. *UTCiencia*, 3(2), 85-94.
- Ramos, H. M., McNabola, A., López-Jiménez, P. A., & Pérez-Sánchez, M. (2020). Smart Water Management towards Future Water Sustainable Networks. *Water*, 12(1), 58. <https://doi.org/10.3390/w12010058>
- Ren, J., Zhu, Q., & Wang, C. (2022). Edge computing for water quality monitoring systems. *Mobile Information Systems*, 2022, artículo 5056606. <https://doi.org/10.1155/2022/5056606>
- Rubio Jaramillo, C., García Cervantes, D., Barajas, M., Delgado Galván, X., & Mora Rodríguez, J. (2018). Validación de equipos de medición y control para el abastecimiento del agua. *Jóvenes en la Ciencia. Revista de Divulgación Científica*, 4(1), 2580-2584.

<https://doi.org/10.22201/dgtic.30618096e.2026.4.ESPECIAL.163>

Núm. especial, abril 2026, págs. 47 - 47

Sierra, D. H., Rojas, J. G., & García, Á. R. (2020). Sistemas inteligentes para el monitoreo y control del recurso hídrico. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 15(3), 234-247.

Stewart, R. A., Willis, R., Giurco, D., Panuwatwanich, K., & Capati, G. (2010). Web-based knowledge management system: linking smart metering to the future of urban water planning. *Australian Planner*, 47(2), 66-74. <https://doi.org/10.1080/07293681003767769>