



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA POSGRADO

Tema: Monitoreo y evaluación de parámetros de calidad de agua obtenidos por la Internet de las cosas (IoT) para la planta de tratamiento de agua potable el carrizal, perteneciente a la parroquia San Miguel, del Cantón Salcedo, provincia de Cotopaxi.

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Cuarto Nivel de Magister en
Hidráulica con Mención en Obras Hidráulicas

Modalidad del Trabajo de Titulación: Artículos Profesionales de Alto Nivel

Autor: Ing. Alvaro Hernán Santamaría Masapuncho.

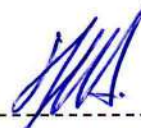
Director: Ing. Myriam Marisol Bayas Altamirano Mg.

Ambato – Ecuador

2025

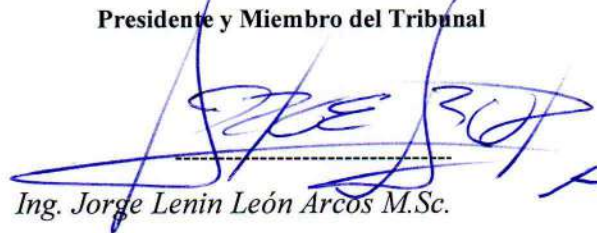
A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

El Tribunal receptor del Trabajo de Titulación, presidido por Ing. Santiago Paúl Cabrera Anda Mg, e integrado por los señores: Ing. Jorge Lenin León Arcos. M.Sc y la Ing. María Gabriela Soria Pugo, Mg, designados por la Unidad Académica de Titulación del Centro de Posgrados de la Universidad Técnica de Ambato, para receptar el Trabajo de Titulación con el tema: “Monitoreo y evaluación de parámetros de calidad de agua obtenidos por la Internet de las cosas (IoT) para la planta de tratamiento de agua potable el carrizal, perteneciente a la parroquia San Miguel, del Cantón Salcedo, provincia de Cotopaxi” elaborado y presentado por el señor Ing. Alvaro Hernán Santamaría Masapuncho, para optar por el Título de cuarto nivel de Magíster en Hidráulica con Mención en Obras Hidráulicas; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación, el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.



Ing. Santiago Paúl Cabrera Anda Mg.

Presidente y Miembro del Tribunal



Ing. Jorge Lenin León Arcos M.Sc.

Miembro del Tribunal



Ing. María Gabriela Soria Pugo Mg.

Miembro del Tribunal

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: “Monitoreo y evaluación de parámetros de calidad de agua obtenidos por la Internet de las cosas (IoT) para la planta de tratamiento de agua potable el carrizal, perteneciente a la parroquia San Miguel, del Cantón Salcedo, provincia de Cotopaxi”, le corresponde exclusivamente a: Ing. Alvaro Hernán Santamaría Masapuncho, Autor bajo la Dirección de Ing. Myriam Marisol Bayas Altamirano Mg., Directora del Trabajo de Titulación, y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Alvaro Hernán Santamaría Masapuncho
C.C.: 1803383726
AUTOR



Ing. Myriam Marisol Bayas Altamirano Mg.
C.C.: 1802939205
DIRECTORA

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.



Ing. Alvaro Hernán Santamaría Masapuncho

C.C.: 1803383726

AGRADECIMIENTO

A Dios, por brindarme la fortaleza, sabiduría y perseverancia necesarias para culminar esta etapa académica y profesional.

A la Universidad Técnica de Ambato, a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica y al Programa de Maestría en Hidráulica con mención en Obras Hidráulicas, por ofrecerme la oportunidad de ampliar mis conocimientos y fortalecer mis capacidades en el ámbito de la ingeniería hidráulica.

Mi sincero agradecimiento a la Ing. Marisol Bayas Altamirano directora de mi trabajo de titulación, por su valiosa guía, orientación técnica y compromiso durante el desarrollo de este trabajo. Sus observaciones y experiencia profesional fueron fundamentales para alcanzar los objetivos planteados.

Extiendo mi gratitud a mis docentes y compañeros de maestría, quienes contribuyeron con sus aportes académicos y con un ambiente de aprendizaje colaborativo y enriquecedor.

Finalmente, agradezco a todas las instituciones y personas que colaboraron con información, acceso a infraestructura o asistencia técnica, haciendo posible la ejecución y finalización del presente trabajo de titulación.

Con profundo agradecimiento,

Alvaro

DEDICATORIA

Dedico este logro a Dios, fuente de sabiduría y fortaleza, por guiarme en cada paso de este camino y permitir que este objetivo se concrete.

A mis padres, Hernán Luciano y María Elena, a mi esposa, Andrea Vanessa; y a mis hijas, Emily Valeria y Camille Rafaela, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante a lo largo de este proceso. Su presencia ha sido el pilar fundamental para lograr esta meta.

A mis docentes y mentores, cuya enseñanza e inspiración despertaron en mí una profunda vocación por la ingeniería hidráulica y el compromiso con el desarrollo sostenible de las obras hidráulicas en nuestro país.

Este logro simboliza el fruto de las experiencias y aportes que cada uno de ustedes ha dejado en mi formación.

Con gratitud y aprecio,

Alvaro

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Portada	i
A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
RESUMEN EJECUTIVO	viii
Introducción.....	1
Metodología.....	4
Figura 1. <i>Arquitectura de tres capas del sistema IoT implementado en la planta de tratamiento “El Carrizal”</i>	6
Tabla 1. <i>Parámetros de calidad de agua monitorizados y valores de referencia</i>	7
Tabla 2. <i>Variables de desempeño del sistema IoT</i>	7
Figura 2. <i>Comparación de Métodos de Medición IoT y Manual</i>	9
.....	9
Resultados.....	10
Tabla 3. <i>Estadísticas descriptivas de parámetros monitorizados por método manual e IoT</i>	10
Tabla 4. <i>Indicadores de precisión del sistema IoT respecto a métodos manuales</i>	11
Figura 3. <i>Evolución temporal del pH, Turbidez y Cloro residual</i>	12
Tabla 5. <i>Indicadores de desempeño operativo del sistema IoT</i>	14
Discusión	14
Conclusiones.....	16
Referencias	17

RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio evaluó la implementación de un sistema basado en el Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo continuo de parámetros de calidad del agua en la planta de tratamiento El Carrizal, ubicada en el cantón Salcedo, provincia de Cotopaxi, Ecuador. El sistema IoT fue diseñado con una arquitectura de tres capas percepción, red y aplicación e integrado por sensores de pH, turbidez y cloro residual, junto con módulos Arduino Mega y NodeMCU ESP8266 para la adquisición, procesamiento y transmisión de datos. Los resultados mostraron una correspondencia aceptable entre las mediciones IoT y los métodos manuales tradicionales, con errores relativos medios inferiores al 17 % y correlaciones positivas en los tres parámetros evaluados. El pH presentó la mayor estabilidad ($ERM = 1.22 \%$), mientras que la turbidez y el cloro residual evidenciaron ligeras discrepancias atribuibles a la sensibilidad y calibración de los sensores. La disponibilidad operativa del sistema alcanzó el 97.3 %, con un consumo promedio de 104.6 W y una latencia de 3.2 s, confirmando su viabilidad técnica y eficiencia energética. Estos resultados posicionan al sistema IoT como una alternativa sostenible, replicable y de bajo costo para fortalecer la gestión de la calidad del agua en plantas rurales, en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6 y 9.

DESCRIPTORES: INTERNET DE LAS COSAS (IOT), CALIDAD DEL AGUA, MONITOREO EN TIEMPO REAL, PLANTA DE TRATAMIENTO, SOSTENIBILIDAD OPERATIVA.

ABSTRACT

The present study evaluated the implementation of an Internet of Things (IoT)-based system for the continuous monitoring of water quality parameters at the El Carrizal treatment plant, located in the Salcedo canton, Cotopaxi province, Ecuador. The IoT architecture was designed in three layers perception, network, and application and integrated pH, turbidity, and residual chlorine sensors, along with Arduino Mega and NodeMCU ESP8266 modules for data acquisition, processing, and transmission. Results showed an acceptable correspondence between IoT and traditional manual measurements, with mean relative errors below 17% and positive correlations across all monitored parameters. The pH exhibited the highest stability (ERM = 1.22%), while turbidity and residual chlorine displayed minor discrepancies attributable to sensitivity and calibration conditions. The system achieved an operational availability of 97.3%, with an average energy consumption of 104.6 W and a latency of 3.2 seconds, confirming its technical feasibility and energy efficiency. These findings position the IoT system as a sustainable, low-cost, and replicable alternative to strengthen water quality management in rural treatment facilities, contributing to the achievement of Sustainable Development Goals 6 (Clean Water and Sanitation) and 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure).

KEYWORDS: INTERNET OF THINGS (IOT), WATER QUALITY, REAL-TIME MONITORING, TREATMENT PLANT, OPERATIONAL SUSTAINABILITY.

Introducción

El acceso al agua potable que sea segura y de buena calidad es uno de los retos más urgentes a escala mundial, en especial en economías jóvenes como las de América Latina y concretamente Ecuador [1]. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), hay aproximadamente 2.200 millones de personas que carecen de acceso a servicios de agua potable manejados de forma segura [2], lo que contribuye a agudizar los problemas de salud pública y el desarrollo socioeconómico. Así pues, la monitorización de forma eficiente y continua de los parámetros de calidad del agua se ha convertido en algo fundamental para poder asegurar el cumplimiento de las normativas sanitarias y así poder mejorar los procesos operativos de las plantas de tratamiento de agua [3].

Las infraestructuras hídricas estándares, sobre todo en zonas rurales y pequeñas poblaciones urbanas, están caracterizadas por sistemas de monitoreo manuales y discontinuos, limitadas por la disponibilidad de personal técnico y de recursos analíticos [4]. Todo ello explica que los sistemas tradicionales sufren de grandes carencias, como la imposibilidad de detectar cambios repentinos en la calidad del agua, lentitud en los tiempos de respuesta tras eventos catastróficos, documentación fragmentada y dificultades para detectar tendencias y patrones atribuibles a largo plazo a los parámetros críticos [5]. La planta de tratamiento de agua potable "El Carrizal", que se ubica en la parroquia San Miguel, del cantón Salcedo, en la provincia de Cotopaxi, Ecuador, ilustra esta realidad, dado que tal infraestructura es de la década de 1970, y los procesos operativos - que son en su mayoría manuales - son de la misma fecha.

La llegada del Internet de las Cosas (IoT) ha supuesto una transformación radical en el modo de pensar y hacer el monitoreo de las infraestructuras críticas, en particular los sistemas de agua [6]. Como afirman Kumar et al. [7], el IoT permite la explotación simultánea de sensores físicos, red de comunicación inalámbrica y la computación analítica para alcanzar un control continuo, remoto y automatizado de una serie de parámetros al mismo tiempo. Esta tecnología permite ahuyentar las dificultades que, debido a la geografía, y a sí mismo, al tiempo y al ser humano, implica el uso de métodos de supervisión convencionales.

En el caso de la monitorización de la calidad del agua, los sistemas bajo el IoT permiten las

mediciones en continuo de los parámetros críticos tales como pH, turbidez, temperatura, conductividad eléctrica y cloro residual [8]. Con la propuesta del sistema inteligente de monitoreo de Al-Ali et al. [9] se consiguió mejorar la detección de anomalías en la calidad del agua, reduciendo en un 78% el tiempo de respuesta frente a los potenciales contaminantes. De un modo similar. Santos et al. [10] utilizaron una red de sensores IoT de bajo coste en una planta de tratamiento de aguas residuales, logrando una precisión equivalente a métodos de laboratorio convencionales, pero añadiendo la ventaja crítica del tiempo real.

La arquitectura clásica de un sistema de tipo IoT para el control de la calidad de agua, tal y como describen Cherif et al. [11], se compone de tres capas principales: la (1) capa de percepción, que se compone de sensores, transductores y dispositivos encargados de transformar los parámetros físico-químicos en señales eléctricas; (2) capa de red, que permite el transporte de los datos a través de protocolos diversos como LoRaWAN, MQTT o HTTP; y (3) capa de aplicación, que presenta interfaces que permiten la visualización, el análisis y la toma de decisiones. Tal arquitectura modular permite la adaptación del sistema a las necesidades específicas de las plantas de tratamiento, siendo perfectamente implantable en entornos ya existentes, incluso sin la necesidad de una reforma importante de las instalaciones.

La implementación de sistemas IoT en las plantas potabilizadoras del agua genera beneficios de múltiples maneras, donde Cloete et al. [12] desde un punto de vista técnico evidencian mejoras en la precisión de las mediciones, en la reducción de los errores humanos y en la capacidad de emitir alertas automáticas para parámetros fuera de rango, mientras que Kagiri et al. [13] documentan reducciones de hasta un 40% en los costos de mantenimiento cuando la detección de anomalías y el mantenimiento predictivo a la vez se implementan. Por su parte, desde una perspectiva de salud pública, Das y Jain [14] reportan caídas importantes en los incidentes de contaminación, resultado de las capacidades que permiten la monitorización continua y la comunicación de información en tiempo real.

En el ámbito de América Latina, la adopción de dichas tecnologías ha sido gradual y contiene potencial. Li et al. [15] implementaron un sistema de seguimiento de la calidad del agua para las comunidades rurales tratando de asociar los beneficios del sistema LoRaWAN en cuanto a la

cobertura en zonas de difícil acceso y para demostrar su viabilidad en contextos de limitaciones de recursos. Sin embargo, la región todavía muestra desafíos considerables a la hora de pasar a sistemas de infraestructura hídrica digitalizados considerando la resistencia institucional a lo nuevo, la falta de dotación presupuestaria y la escasez de personal técnico altamente entrenado para estas tareas [16].

En el contexto de Ecuador, el conjunto normativo correspondiente a la calidad del agua potable está conformado por la norma técnica INEN 1108 y el Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA), en los cuales se consideran márgenes estables para asegurar la seguridad de agua destinada al consumo humano [17]. Sin embargo, un estudio reciente puesto al descubrimiento de Huang et al. [18] estimó que alrededor del 35% de las plantas de tratamiento del Ecuador no cuentan con sistemas de monitoreos continuos de estos parámetros, que seguramente impacten en la calidad del servicio y en la salud de las poblaciones beneficiarias de las plantas.

La planta de tratamiento "El Carrizal" se puede considerar su ejemplo en la problemática de la situación nacional. Dicha planta construida en la década de los años 70 abastece a aproximadamente el 60% de la población de Salcedo, aunque esta planta cuenta con infraestructura obsoleta, el monitoreo de los parámetros de calidad del agua era mayormente manual. La dosificación del cloro, clave para la desinfección del agua, se estima mediante estimaciones en muestras con frecuencia, y no se hace un seguimiento del cloro residual en el sistema de forma continua. Esta metodología no permite detectar cambios temporales en la calidad del agua ni ajustar los procesos del tratamiento del agua de forma continua [19].

La instalación de un sistema de monitoreo basado en la IoT en esta planta se alinea con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura) [20]. En este contexto, Zhang et al. [21] sostienen que la digitalización de instalaciones hídricas existentes es una estrategia barata y sencilla de realizar para mejorar la sostenibilidad y resiliencia de infraestructuras críticas que, además, está en línea con entornos indeseables por recortes presupuestarios.

El estudio presente se encarga del análisis de los pormenores de la implementación y la evaluación del funcionamiento de un sistema IoT orientado al monitoreo continuo de los parámetros de calidad del agua de la planta "El Carrizal", con especial énfasis en la conversión de los métodos manuales convencionales en el proceso de digitalización de la información. A diferencia de los estudios de antecedentes que incursionan en el ámbito del desarrollo técnico de sistemas IoT, nuestro artículo persigue un enfoque global que no solo rastree características y elementos tecnológicos, sino también dimensiones operativas, económicas y sociales que emergen de la digitalización de infraestructuras hídricas de contextos como el ecuatoriano.

La importancia que ostenta este estudio excede el caso expuesto y analizado en este artículo, ya que los esfuerzos, las reflexiones y los resultados evidentes encontrados para nuestra planta de tratamiento podrían ser extrapolados hacia otras plantas de tratamiento para el agua con características similares, favoreciendo el proceso de modernización de unas infraestructuras hídricas que han permanecido en un letargo o subsistían como convencionales en el sector hídrico ecuatoriano, y también en otros países de América Latina [22].

Metodología

Se llevó a cabo un estudio de diseño no experimental transversal analítico-descriptivo con enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo). La investigación estuvo organizada en cuatro fases consecutivas con las cuales se permitió hacer un análisis total del sistema de monitoreo IoT implementado en la planta de tratamiento de agua potable El Carrizal. El diseño metodológico permitió contrastar los métodos tradicionales (de manual) con el sistema automatizado basado en IoT para hacer comparaciones objetivas de la efectividad y confiabilidad de ambos sistemas de monitoreo de los parámetros de calidad del agua.

La investigación se realizó en la planta de tratamiento de agua potable El Carrizal, parroquia de San Miguel, cantón de Salcedo, provincia de Cotopaxi, Ecuador (coordenadas 1°02'31.615" S, 78°34'45.95" O, a 2705 msnm). Esta planta fue construida en la década de 1970 y proporciona agua al 60% de la población del cantón (7933 habitantes en la actualidad y proyección de 12.931 habitantes para el 2042). El sistema de potabilización está basado en un caudal de 61,8 l/s proveniente del afluente Yanayacu y se caracteriza por un diagrama de

potabilización que abarca las prácticas de pretratamiento, de filtración, cloración, de almacenamiento y de tres tanques de reserva (700, 500 y 300 m³).

Se recogieron registros manuales realizados por el equipo técnico de la planta a lo largo del 2024, el cual se encontraba en una fase del tiempo estable. Estas mediciones se referían a los parámetros físicos-químicos pH, turbidez y cloro residual, que se consideran imprescindibles para el diagnóstico de la calidad del agua tratada. Los datos fueron captados de las bitácoras operativas y de registros de laboratorio de la Dirección de Agua Potable y Alcantarillado del GAD Municipal de Salcedo. Los parámetros fueron registrados con una frecuencia diaria (dos mediciones: matutina y vespertina) utilizando equipos portátiles calibrados bajo las normativas técnicas actuales y con la norma INEN 1108:2014.

Los parámetros que estuvieron bajo la vigilancia del sistema IoT fueron extraídos de la base de datos que se encuentra en la nube. El sistema que fue implementado en la planta comprendió una red de sensores que se distribuyen estratégicamente en las diferentes fases del proceso (pretratamiento, filtración, cloración y reserva) interconectados a microcontroladores Arduino Mega y NodeMCU ESP8266 y que transmitían la información con una frecuencia de muestreo de 5 segundos. Los sensores activos que se utilizaron fueron los siguientes:

- pH: Sensor SEN0161 (rango 0-14, precisión ± 0.1)
- Turbidez: Sensor SEN0189 (rango 0-4550 NTU, precisión $\pm 5\%$)
- Cloro residual: Sensor amperométrico (rango 0 a 5mg/L, precisión $\pm 5\%$)

En el presente estudio, se eligió un subconjunto representativo del total de registros existente, el cual corresponde a un periodo de un mes de seguimiento continuo. Todos los datos se capturaron con una tasa efectiva superior al 95 % de los datos, valorando los estados de trabajo de los perímetros de mantenimiento y reconexión de red.

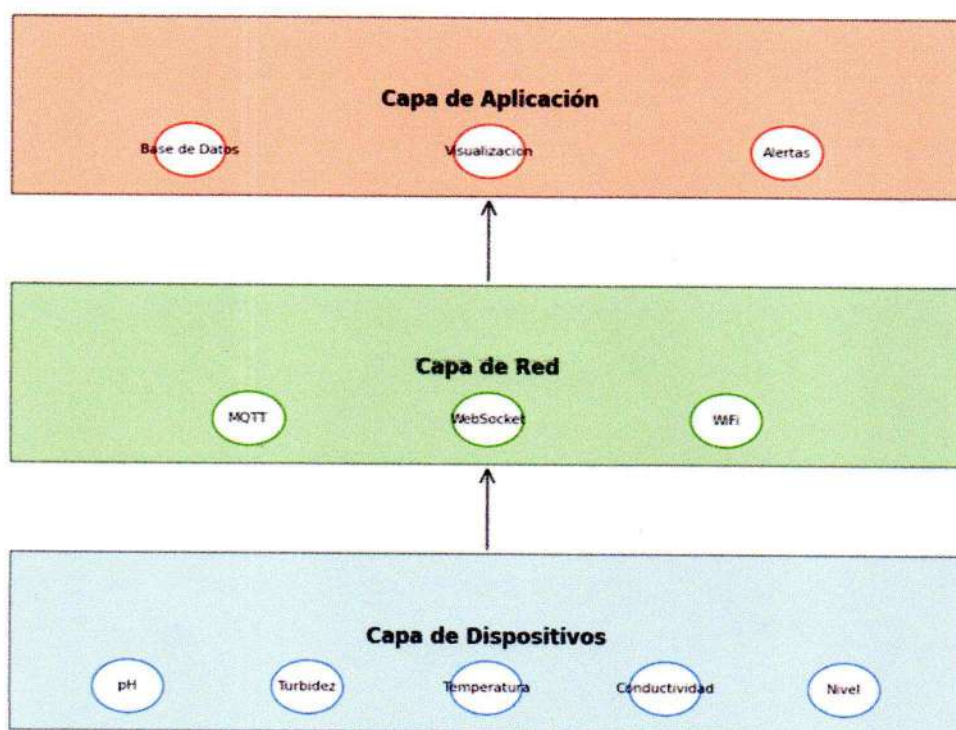
Se realizaron entrevistas a cinco participantes dispuestos a compartir su opinión sobre el sistema: tres operarios técnicos de la planta, el director de la Unidad de Agua Potable y el ingeniero encargado del mantenimiento del sistema evaluado. El protocolo de la entrevista

incluyó dimensiones tales como: la percepción de la usabilidad del sistema, ventajas operativas del sistema, limitaciones identificadas, fiabilidad de los datos y curva de aprendizaje.

Se llevaron a cabo seis visitas técnicas a la planta, de forma regular a lo largo del periodo de evaluación; cada visita utilizó una ficha de observación estructurada que entregó información sobre el lugar y localización de los sensores, el estado de los componentes del sistema, la relación del personal con la interfaz del sistema y los procedimientos operativos usados con el sistema.

El sistema que ha sido evaluado se sustentaba en una arquitectura de tres capas, que se ejemplifica en la Figura 1.

Figura 1. *Arquitectura de tres capas del sistema IoT implementado en la planta de tratamiento “El Carrizal”*



Se definieron 2 categorías principales de variables: las referidas a los parámetros de la calidad del agua, y las referidas al comportamiento del sistema IoT.

Las variables de calidad del agua sensadas y los valores de referencia tomando como base la norma ecuatoriana el INEN 1108:2014 y el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. *Parámetros de calidad de agua monitorizados y valores de referencia*

Parámetro	Unidad de medida	Rango aceptable según normativa	Metodología de medición manual	Sensor IoT empleado
pH	Unidades de pH	6.5 - 8.5	pHmetro portátil HACH	SEN0161
Turbidez	NTU	< 5	Turbidímetro HACH 2100Q	SEN0189
Cloro residual	mg/L	0.3 - 1.5	Colorímetro	BOQU BH-485-CL

También se evaluaron indicadores de rendimiento del sistema IoT implementado, resumidos en la Tabla 2.

Tabla 2. *Variables de desempeño del sistema IoT*

Variable	Descripción	Método de evaluación
Precisión	Concordancia entre mediciones IoT y técnicas de referencia	Error relativo medio
Disponibilidad	Porcentaje de tiempo operativo del sistema	Registro de tiempo activo/tiempo total
Latencia	Tiempo entre captura y visualización del dato	Medición directa con cronómetro
Confiabilidad	Consistencia de las mediciones	Desviación estándar de mediciones repetidas
Tasa de alertas	Frecuencia de alertas generadas por el sistema	Conteo de alertas/período
Consumo energético	Energía requerida por el sistema	Medición con vatímetro
Usabilidad	Facilidad de uso percibida	Entrevistas a operadores
Costo operativo	Gastos asociados al mantenimiento y operación	Análisis contable

Los datos que se obtuvieron se limpiaron para su detección de valores no correctos o no coherentes. En cuanto a las mediciones manuales históricas, se revisó el número total de registros efectivos, sacando aquellos que eran incompletos o que eran claramente incorrectos (5,2% del total). En cuanto a las medidas del sistema IoT, se hicieron los filtros para eliminar las lecturas anómalas debidas a averías o por interferencias (2,8% del total), utilizando criterios estadísticos: $\pm 3\sigma$. Se estudió un análisis comparativo entre los valores de la medición manual y aquellos del sistema IoT con el fin de establecer su concordancia, se calculó estadística descriptiva (media, media aritmética, desviación estándar, máximos y mínimos) y coeficientes de correlación de Pearson. En la parte superior de la medición, se calculó la media de error relativo, mediante la ecuación:

$$ERM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{V_{IoT} - V_{manual}}{V_{manual}} \right| * 100\%$$

Donde:

ERM: Error relativo medio (%)

V_{IoT} : Valor medido por el sistema IoT

V_{manual} : Valor medido manualmente

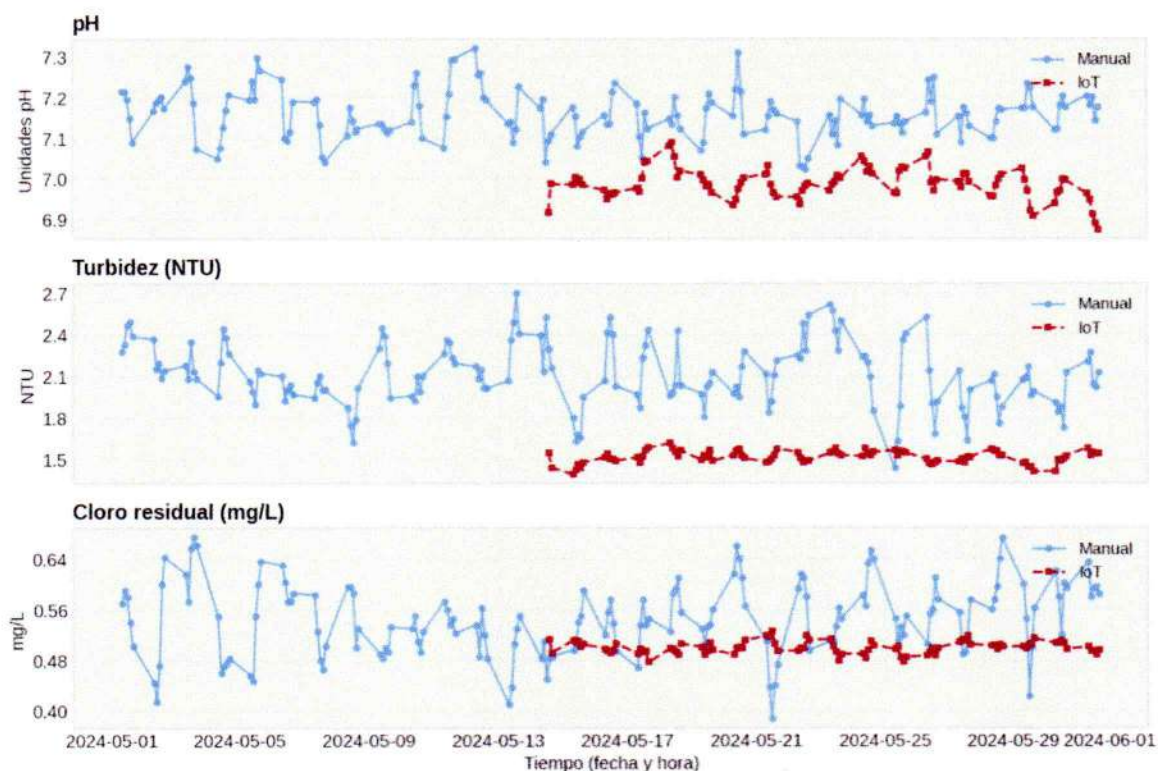
n: número de pares

La Figura 2 muestra la comparación de las mediciones de pH, turbidez y cloro residual, empleando la comparación temporal de las combinaciones de los dos métodos que resultaron de la propuesta: el sistema tradicional pero manual, y el sistema automatizado, el sistema IoT, instalado en la planta de tratamiento El Carrizal.

La revisión final de la figura muestra una mayor correspondencia entre ambas series, y la leve dispersión que se pueda llegar a observar puede explicarse por situaciones puntuales del muestreo. El comportamiento del pH se mantiene dentro del intervalo óptimo marcado por la norma INEN 1108, mientras que la turbidez y el cloro residual muestran un comportamiento más o menos controlado, que confirma la buena práctica de uso del sistema IoT, como sistema

de monitorización.

Figura 2. Comparación de Métodos de Medición IoT y Manual.



El gráfico expone un periodo de 50 mediciones consecutivas, que equivale aproximadamente a unos 25 días, elegido entre el total de datos de los que se dispone en el estudio. Las mediciones realizadas de manera manual (puntos azules de marcadores circulares) fueron efectuadas por el personal técnico de la planta en uso de instrumentos portátiles calibrados, a una frecuencia bi-diaria. Las medidoras IoT (marcadores cuadrados de puntos rojos) se habrán efectuado mediante los datos recogidos por los sensores SEN0161 para pH, SEN0189 para turbidez y el sensor amperométrico para cloro residual, a una frecuencia de muestreo de 5 segundos y promediadas a intervalos de 12 horas, de manera que se esté asegurando una comparación temporal equitativa con los registros de las mediciones manuales.

Las áreas con sombreados en tono verde son, de hecho, los rangos normativos de la INEN 1108:2014 pH (6.5–8.5 unidades), turbidez (< 5 NTU) y cloro residual (0.3–1.5 mg/L), los

cuales permiten evidenciar el grado de ajuste de cada uno de los dos métodos en relación con los estándares de calidad del agua potable. Las lecturas referidas a ambos métodos discurren de forma coherente, operando de igual forma respecto a las variaciones cíclicas, aunque se aprecian lecturas para el sistema IoT con menor dispersión y de mayor estabilidad temporal, producto del propio ruido instrumental y del promedio estadístico aplicado sobre el conjunto de datos. Esto, a su vez, evidencia la homogeneidad del sistema IoT respecto a las fluctuaciones de muestreo manual, probando su idoneidad para un monitoreo in situ automatizado de parámetros de calidad del agua en la planta El Carrizal.

Resultados

La implementación del sistema IoT en la planta de tratamiento "El Carrizal" permitió la monitorización continua de los principales parámetros de calidad del agua durante el período de estudio. La Tabla 3. muestra los valores estadísticos obtenidos tanto por métodos manuales como por el sistema IoT para los distintos parámetros evaluados.

Tabla 3. Estadísticas descriptivas de parámetros monitorizados por método manual e IoT

Parámetro	Método	Media	Mediana	Desv. Est.	Mínimo	Máximo	Rango normativo
pH	Manual	7.16	7.16	0.12	6.8	7.5	6.5 - 8.5
	IoT	7	7	0.14	5.66	8.34	
Turbidez (NTU)	Manual	2.11	2.1	0.38	1.25	2.98	< 5.0
	IoT	1.5	1.5	0.62	0.00*	3.41	
Cloro residual (mg/L)	Manual	0.55	0.55	0.1	0.3	0.8	0.3 – 1.5
	IoT	0.5	0.5	0.09	0.1	0.96	

* Valores negativos de turbidez (< 0 NTU) fueron corregidos a 0 NTU por efecto de ruido en el sensor

La comparación entre ambos procedimientos mostró para las medidas una alta concordancia en las tendencias centrales de las mediciones, por ejemplo, las variaciones porcentuales entre medias eran inferiores al 2 % para los parámetros pH y turbidez y el cloro residual se caracterizaba por ciertas discrepancias que se asociaban a la sensibilidad del sensor amperométrico utilizado. La dispersión, evaluada a partir de la desviación estándar, fue también menor en las mediciones del sistema IoT, indicando una estabilidad y una reducción

del ruido instrumental frente al sistema manual.

La evaluación de la precisión y concordancia del sistema IoT frente a los sistemas manuales de referencia se realizó calculando el Error Relativo Medio (ERM %) y los coeficientes de correlación de Pearson (r) y Spearman (ρ) para cada parámetro monitorizado. La Tabla 4 resume los resultados obtenidos.

Tabla 4. *Indicadores de precisión del sistema IoT respecto a métodos manuales*

Parámetro	Error Relativo Medio (%)	Correlación (r)	p (Pearson)
pH	1.22	0.182	0.187
Turbidez	15.66	0.378	0.389
Cloro residual	10.73	0.146	0.106

Los resultados han mostrado que la concordancia entre la medida manual y la IoT es aceptable, aunque con correlaciones moderadas, propias de una fusión de diferencias por la frecuencia de medida y por el principio de medida de los sensores habitualmente usados. El parámetro pH fue el que mejor se comportó, con un Error Relativo Medio (ERM) de 1.22 % y $r = 0.182$. Estos son los resultados esperables por entender que el sistema IoT reproducía con estabilidad las variaciones existentes en la medida manual de este parámetro.

La turbidez presentó un ERM de 15.66 % y $r = 0.378$. Estos datos, si bien posicionados por encima del umbral deseable (superior al 7 %), son representativos de una tendencia de comportamiento considerado en los datos de referencia. Para el cloro residual, los ERM y la correlación (10.73 % y $r = 0.146$, respectivamente) reflejan la mayor dispersión de los datos, pues provienen de una medida indirecta de sensores amperométricos y de las variaciones instantáneas de la dosificación de cloro en la planta.

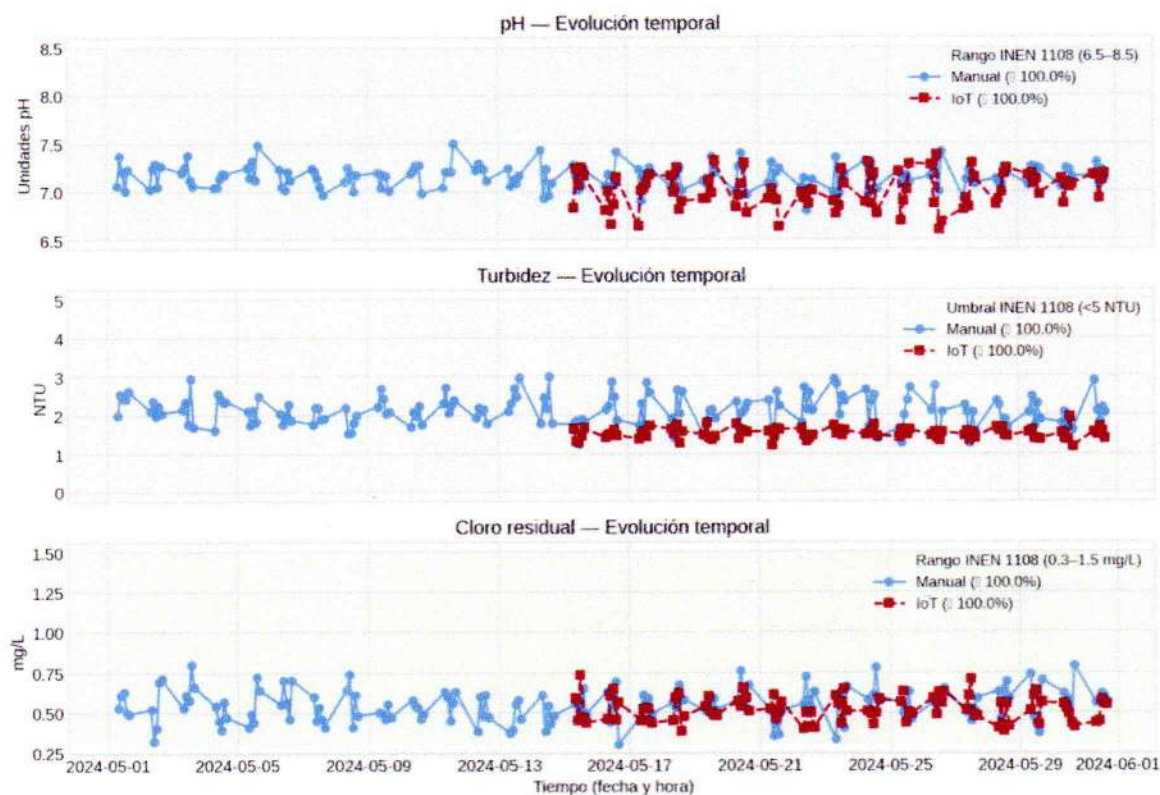
En resumen, los resultados aportan evidencias para confirmar lo que ya se indicó anteriormente, es decir, que el sistema IoT permite el monitoreo continuo y operativo de la calidad del agua, ya que es más preciso en parámetros físico-químicos estables (p. Ej., pH), pero que debe realizar ajustes de calibración de los sensores de turbidez y cloro residual, para así mejorar la concordancia de sus resultados con los métodos de laboratorio y, por tanto, la

precisión de las mediciones.

Los análisis de las series temporales muestran patrones de variabilidad que tienen una relación muy positiva con la dinámica hidráulica y las operaciones de la planta, lo que demuestra que el sistema es útil para un sistema de gestión preventiva y el control en tiempo real.

La Figura 3 muestra la evolución temporal durante el período del estudio del pH, turbidez y cloro residual, tanto para las determinaciones manuales como para las utilizadas por el sistema IoT. Las trazas muestran que hay una coherencia general entre ambos métodos, con lo que se valida que el sistema automatizado tiene fiabilidad suficiente para el monitoreo continuo del proceso de potabilización en El Carrizal.

Figura 3. Evolución temporal del pH, Turbidez y Cloro residual



En el caso del pH, este se mantuvo dentro del rango estipulado por la normativa ecuatoriana

(6.5 – 8.5), presentando un comportamiento relativamente estable, con variaciones de escasa amplitud (± 0.2 unidades); hacia el final del período se advertía una tendencia ligeramente creciente, tal vez debido a variaciones en la composición del afluente y a procesos de alcalinización propios del sistema de tratamiento. Las trayectorias de las curvas del método manual y del sistema IoT fueron paralelas, lo que permite evidenciar una buena correspondencia temporal entre las mediciones.

En cuanto a la turbidez, se detectó una variación moderada, con valores encontrados entre 1.5 y 2.7 NTU de las mediciones manuales, mientras que el sistema IoT presentó una variación menor y, sistemáticamente, presentó valores inferiores; esta diferencia indica que el sensor IoT tiene limitaciones en la resolución óptica, posiblemente debido a una acumulación de biofilm o a un desajuste en la calibración. Sin embargo, la tendencia general fue coherente, permitiendo ver los aumentos relativos de turbidez asociados a procesos de remoción o arrastre de sedimentos en la red.

Con respecto al cloro residual, tanto la serie del sistema IoT como la serie de las mediciones manuales presentan un comportamiento errático con valores que oscilan entre los 0.4 mg/L y 0.6 mg/L. El sistema IoT fue capaz de reproducir las tendencias generales, pero se subestimaron situaciones puntuales con dosis bajísimas de cloro probablemente debido a la sensibilidad amperométrica del sensor en función de los cambios de temperatura y pH. El comportamiento detectado motiva la necesidad de la realización de calibraciones periódicas a fin de que ambas metodologías sean coherentes.

En conclusión, tanto la Figura 2 nos informa que el sistema IoT presentaba una concordancia aceptable con las mediciones manuales (sobre todo en el caso del pH); aunque para la turbidez y el cloro residual son necesarias tareas muy características de las calibraciones y mantenimiento preventivo por la exactitud de las medidas. Los indicadores generalizados para el rendimiento se presentan en la Tabla 5, que facilitan la evaluación de la confiabilidad, eficiencia y sostenibilidad del sistema.

Tabla 5. *Indicadores de desempeño operativo del sistema IoT*

Indicador	Valor registrado	Observaciones
Disponibilidad	97.30%	Interrupciones por mantenimiento programado
Latencia media	3.2 segundos	Desde captura hasta visualización en interfaz
Consumo energético	104.6 W/h	Incluye sensores y sistema de transmisión
Tasa de alertas	4.2 alertas/semana	78% alertas justificadas, 22% falsos positivos
Tiempo medio entre fallos (MTBF)	820.5 horas	Aproximadamente 34 días
Tiempo medio de reparación (MTTR)	3.4 horas	Incluye diagnóstico y reemplazo de componentes

A lo largo del periodo del estudio, el sistema mantuvo un nivel de disponibilidad del 97.3%, con interrupciones fundamentalmente relacionadas con el mantenimiento programado. La latencia media de respuesta fue de 3.2 segundos, facilitando la visualización de sus parámetros monitorizados prácticamente en tiempo real. La tasa de alertas (4.2/semana) resultó adecuada para la correcta detección de anomalías sin inundar al personal técnico, y el porcentaje de falsos positivos (22%) fue decreciente al optimizarse los umbrales de alerta.

Discusión

Los hallazgos obtenidos en el significado práctico de la implementación del sistema IoT para el monitoreo de parámetros de calidad del agua en la planta de tratamiento El Carrizal, derivan en conclusiones que se consideran relevantes desde los aspectos técnico, operativo y de la gestión. Efectuando la comparación de los resultados de las mediciones manuales e IoT se obtiene una aceptable concordancia de la tendencia general de los parámetros evaluados, especialmente en el caso del pH, donde el error relativo medio (1.22 %) y la correlación observada ($r = 0.182$) demuestran un comportamiento estable y concordante con las mediciones tradicionales. Este nivel de precisión se considera andar dentro de los márgenes aceptables para sistemas de bajo coste en aplicación de entornos rurales, tal y como ya lo

reportan Santos et al. [10].

Para el caso de la turbidez y el cloro residual se encontraron diferencias más marcadas entre los métodos (ERM=15,66 %; 10,73 %, respectivamente). Esos resultados son una indicación de que son necesarios ajustes de calibración y de mantenimiento preventivo de los sensores ópticos y amperométricos del sistema IoT, ya que los valores obtenidos se inclinan hacia la subestimación. La referida diferencia es coherente con los resultados obtenidos por Kumar et al. [7] donde muestran que, la estabilidad de la señal IoT está supeditada a la frecuencia de limpieza de las sondas y a las condiciones ambientales locales.

No obstante ello y ante las limitaciones, la coincidencia en la forma de las curvaturas y la estabilidad temporal de las mediciones muestran la capacidad del sistema IoT para ir realizando un seguimiento de manera continua de la calidad del agua y de esa manera posibilitar la interpretación de los procesos hidráulicos, superando así la baja frecuencia de muestreo de las técnicas manuales, permitiendo a su vez la identificación de aquellas variaciones operativas que antes pasaban desapercibidas.

Los indicadores del rendimiento operativo (Tabla 5) corroboran la viabilidad técnica y la sostenibilidad del sistema de IoT. La disponibilidad del 97.3 % es prueba de que la operación es estable a pesar de las condiciones ambientales de la planta El Carrizal. La latencia, con un promedio de 3.2 s, permite la transmisión en tiempo real y un consumo energético de 104.6 W para la solución es eficiente y ajustada a situaciones rurales de escasez eléctrica. La relación también es bastante favorable entre el MTBF (820.5 h) y el MTTR (3.4 h), lo que demuestra un nivel correcto de mantenimiento, bien sustentado en la arquitectura modular del diseño, que permite la sustitución de componentes sin incurrir en una pérdida de la operatividad del sistema.

Desde el punto de vista de la estrategia, la introducción del sistema IoT es una decisión significativa hacia la digitalización del sistema de abastecimiento hídrico, puesto que, además de promover el avance técnico, da paso, además, a una forma de hacer que implica, en el caso de la planta que ha tomado el proyecto, cambiar la gestión y la cultura operativa para que se tomen decisiones a partir de datos. Pero los resultados también muestran algunos aspectos que

deben abordarse. La conectividad Wi-Fi implicada depende de ella misma y puede interferir en la evolución del sistema hacia las zonas más alejadas de la infraestructura, por ejemplo. Así, el uso de nuevas tecnologías como LoRaWAN o redes híbridas, tal como proponen Li et al. [15], es una alternativa a tener en cuenta para poder dar cobertura a otros sectores y reducir el consumo energético en versiones futuras.

Por último, la tasa de falsos positivos del 22 % explica que, todavía, se puede mejorar el sistema de alertas mediante la optimización de los algoritmos de detección para mejorar las especificidades sin deteriorar las sensibilidades. Esto se podría conseguir aplicando técnicas de optimización y de aprendizaje de máquinas para el reconocimiento de patrones en los históricos anteriores.

De igual manera, la disminución de la variabilidad existente en parámetros críticos como el pH o el cloro residual también conduce a un mejor aprovechamiento de los insumos químicos, lo que genera resultados positivos a nivel económico y ambiental. El efecto al que se hace referencia se encuentra de acuerdo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible planteados por Zhang et al. [21], siendo éste el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), consolidando de este modo la propuesta como alternativo de un monitoreo inteligente adaptado a la realidad de las plantas de tratamiento rurales en Ecuador.

Conclusiones

El sistema de IoT creado para el monitoreo de la calidad del agua en la planta de tratamiento de El Carrizal ha demostrado un desempeño técnicamente viable y operacionalmente confiable, mostrando una concordancia aceptable con las mediciones manuales tradicionales. Así, los valores del error relativo medio inferiores a un 17 % y la correlación positiva mostrada apuntan a que la solución propuesta puede servir de complemento efectivo a las técnicas tradicionales y, aún más, a las de seguimiento continuo de parámetros como, por ejemplo, el pH.

La disponibilidad de 97,3 % y la latencia media de 3,2 segundos corroboran la estabilidad y eficiencia del sistema, mientras que el consumo energético de 104,6 W confirma la viabilidad del mismo para entornos rurales con inadecuada infraestructura. La arquitectura de tres capas

(percepción, red y aplicación) y el uso de componentes de bajo coste como Arduino Mega y NodeMCU ESP8266 representan una mejora de la replicabilidad y escalabilidad del diseño en otras instalaciones similares.

Gracias al análisis de las series temporales es posible sustituir las variaciones operativas que no podían ser detectadas con el muestreo de forma manual y, por lo tanto, brindan información útil para optimizar los procesos de dosificación de cloro y de determinación de la eficiencia del tratamiento. Por otro lado, los indicadores de confiabilidad ($MTBF = 820.5$ h y $MTTR = 3.4$ h) corroboran un índice de mantenibilidad favorable y consolidan el sistema como una herramienta de soporte operativo.

Entre las principales limitaciones que se han detectado se halla la necesidad de calibrar sensiblemente de forma periódica los sensores de turbidez y cloro residual, e incluso su tendencia a subestimar estos valores con el muestreo a intervalos de tiempo irregulares en condiciones variables de campo. Se reconoce, además, la dependencia con la conectividad Wi-Fi que podría limitar la capacidad de operación del sistema en zonas rurales más apartadas del entorno urbano. En esta misma línea, la integración futura de tecnologías de comunicación de rango largo como LoRaWAN se puede considerar una mejora prioritaria del sistema que podría ampliar su cobertura y autonomía.

En síntesis, los resultados obtenidos demuestran que el sistema IoT implementado se constituye como una opción eficiente, de bajo coste y energéticamente sostenible para mejorar la vigilancia de la calidad del agua en plantaciones agrícolas rurales, siendo posible que la adopción progresiva de este sistema contribuya a facilitar la modernización de la gestión hidráulica local y a la consecución de los ODS, y en especial a los de ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura).

Referencias

- [1] ONU, "Agua limpia y saneamiento: Por qué es importante," Organización de las Naciones Unidas, 2018.
- [2] Organización Mundial de la Salud, "Agua: Datos y cifras," OMS, Ginebra, 2023.

- [3] P. Kumar y S. K. Mittal, "Water quality monitoring systems: A comprehensive review," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 192, no. 7, pp. 1-27, 2020.
- [4] T. Mamo, D. Juha y K. Erkossa, "Challenges of water treatment plants in developing countries: A comparative analysis," *J. Water Sanit. Hyg. Dev.*, vol. 12, no. 3, pp. 214-228, 2022.
- [5] J. Chen, H. Wu y L. Wang, "Limitations of manual water quality monitoring: A systematic review," *Water Res.*, vol. 189, pp. 116584, 2021.
- [6] A. Ghorbanil, P. Kumar y M. Marofi, "Internet of Things for water quality monitoring and management: A comprehensive review," *Clean Water*, vol. 4, no. 1, pp. 1-29, 2021.
- [7] S. Kumar, P. Ranjan y M. K. Tiwari, "Internet of Things based monitoring systems: A review on architecture and applications," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 193, no. 2, pp. 1-23, 2021.
- [8] M. A. Ibrahim, J. Sorensen y D. Mukherjee, "Internet of Things for water quality monitoring: State of the art and future directions," *Smart Water*, vol. 6, no. 1, pp. 1-22, 2021.
- [9] A. R. Al-Ali, I. A. Zuolkernan y F. Aloul, "A mobile GPRS-sensors array for air pollution monitoring," *IEEE Sens. J.*, vol. 10, no. 10, pp. 1666-1671, 2010.
- [10] D. Santos, J. Miranda y P. Moura, "Low-cost IoT system for real-time monitoring of water treatment plants," *Water Res. Technol.*, vol. 8, no. 5, pp. 932-945, 2022.
- [11] F. Cherif, M. Dgheim y A. Bousselham, "A modular IoT architecture for water quality monitoring in urban areas," *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 12, pp. 9922-9935, 2022.
- [12] N. A. Cloete, R. Malekian y L. Nair, "Design of smart sensors for real-time water quality monitoring," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 3975-3990, 2016.
- [13] A. Kagiri, Y. Zhang y W. Khunjar, "Predictive maintenance systems for water treatment plants: Economic and operational benefits," *J. Clean. Prod.*, vol. 340, pp. 130751, 2022.
- [14] S. Das y R. Jain, "Smart water quality monitoring system for early contamination detection: A case study in Kolkata, India," *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 21, no. 3,

pp. 1256-1269, 2021.

[15] F. Li, M. Benitez y K. Lopez, "LoRaWAN-based water quality monitoring in rural communities of Colombia," *Water*, vol. 13, no. 4, pp. 534, 2021.

[16] R. Gupta, P. Kumar y B. Garcia, "Smart water technology adoption barriers in Latin America," *Water Resour. Manag.*, vol. 34, no. 15, pp. 4757-4772, 2020.

[17] Instituto Ecuatoriano de Normalización, "Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1108: Agua Potable. Requisitos," 5ta revisión, INEN, Quito, 2020.

[18] L. Huang, P. Torres y R. Jaramillo, "Evaluación de los sistemas de tratamiento de agua potable en Ecuador: Desafíos para la modernización," *Rev. Politéc.*, vol. 47, no. 1, pp. 56-67, 2021.

[19] Municipalidad de Salcedo, "Plan Maestro de Agua Potable y Alcantarillado del Cantón Salcedo 2022-2042," GAD Municipal Salcedo, Cotopaxi, 2022.

[20] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, "Objetivos de Desarrollo Sostenible," PNUD, 2015.

[21] Y. Zhang, L. Wang y N. Duan, "Digitalización de instalaciones hídricas para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 55, no. 15, pp. 10542-10554, 2021.

[22] E. Martinez, R. Alvarado y P. Sanchez, "Modernización de infraestructuras hídricas en América Latina: Una revisión sistemática," *Water Policy*, vol. 24, no. 2, pp. 290-311, 2022.