



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**  
**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**TEMA:**

**“SISTEMA DE MONITOREO AMBIENTAL DE AFLUENTES HÍDRICOS  
HACIA LA LAGUNA DE YAHUARCOCHA BASADO EN TECNOLOGÍA  
LORAWAN”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera en  
Mecatrónica

**Línea de investigación:** Producción industrial y tecnología sostenible

**AUTOR:**

Anthony David Buitrón Ruales

**DIRECTOR:**

Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi

**Ibarra – Ecuador 2026**



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

#### A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Anthony David Buitrón Ruales
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“Sistema de monitoreo ambiental de afluentes hídricos hacia la Laguna de Yahuarcocha basado en tecnología LoRaWAN”
AUTOR:	Anthony David Buitrón Ruales
FECHA: DD/MM/AAAA	28/04/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	
ASESOR / DIRECTOR:	Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi MSc.Luz María Tobar Subía Contento

#### 2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 28 días del mes de abril de 2026

#### EL AUTOR:

---

Nombre: Anthony David Buitrón Ruales



Universidad Técnica del Norte  
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

## **Certificación del director del trabajo de integración curricular**

En mi calidad de director del trabajo de grado “Sistema de monitoreo ambiental de afluentes hídricos hacia la Laguna de Yahuarcocha basado en tecnología LoRaWAN”, presentado por el egresado Anthony David Buitrón Ruales, que opta por el título de ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra, a los 28 días del mes de abril de 2026

Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi

Director de Tesis



Universidad Técnica del Norte

Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

### **Aprobación del comité calificador**

El Comité Calificador del trabajo de Integración Curricular “Sistema de monitoreo ambiental de afluentes hídricos hacia la Laguna de Yahuarcocha basado en tecnología LoRaWAN”, elaborado por Anthony David Buitrón Ruales, previo a la obtención del título de ingeniero en Mecatrónica, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Ibarra, a los 28 días del mes de abril de 2026

Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi

Director de Tesis

MSc. Luz María Tobar Subía Contento

Asesor

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, el pilar fundamental que me permitió cumplir mis sueños. A mis padres, Jairo y Angélica, quienes impulsaron mis ganas de alcanzar mis objetivos y lucharon junto a mí, dejando de lado sus propias pasiones para que yo pudiera cumplir las mías; les amo profundamente. A mi hermano mayor, Richard, quien siempre ha sido la inspiración de la persona en la que busco convertirme. A mi hermana menor, Kamila, por motivarme a ser un ejemplo para ella y por estar ahí con un abrazo justo cuando más lo necesité. A mi abuela Inés, por sus oraciones constantes y sus consejos; estaré eternamente agradecido con la vida por permitirme caminar junto a ella. A mis abuelos que ya no están, Inés, Alfonso y Francisco, porque siempre supe que contaba con su preocupación genuina y su cariño. A mis tíos, a quienes quiero mucho y cuyo apoyo siempre he sentido cerca.

A mis amigos, quienes escucharon y me sostuvieron cuando el camino se tornó complicado. Gracias por regalarme sonrisas en los momentos tensos y por ser personas en las que puedo confiar plenamente; agradezco a la vida por haberlos cruzado en mi camino. Los amo.

Finalmente, dedico este trabajo a una persona que ha ocupado mi corazón. Aunque hoy no estés, te sigo sintiendo cerca y sé que siempre te preocupaste por mi y me quisiste. Estaré agradecido por siempre, esperando que el tiempo, en su debido momento, decida devolvernos.

## AGRADECIMIENTO

A la Universidad Técnica del Norte, por haber sido mi segundo hogar en mis años de formación y por proporcionarme los recursos que necesitaba para crecer como ingeniero.

A mi director de tesis, el Dr. Carlos Xavier Rosero, y a mi asesora, la MSc. Luz María Tobar Subía Contento, por su guía invaluable, su paciencia y por compartir sus conocimientos técnicos, los cuales fueron fundamentales para llevar este proyecto desde una idea hasta su implementación en la Laguna de Yahuarcocha.

A los Bomberos de Ibarra, por su apoyo logístico y apertura al posibilitar que el Gateway se instale en sus instalaciones, lo cual permite la conectividad necesaria para que este sistema de monitoreo tenga éxito. Asimismo, al GAD Municipal de Ibarra, por proporcionar la información técnica y los datos in situ que posibilitaron la validación de esta investigación.

A mis compañeros de carrera, con quienes compartí largas jornadas de laboratorio, pruebas de campo y desafíos técnicos; gracias por la amistad y el apoyo mutuo en este camino.

Finalmente, a todas las personas que, de manera directa o indirecta, aportaron con su granito de arena para que este trabajo de investigación llegara a su culminación con éxito.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>Certificación del director del trabajo de integración curricular</b>	<b>II</b>
<b>Aprobación del comité calificador</b>	<b>III</b>
<b>Dedicatoria</b>	<b>IV</b>
<b>Agradecimiento</b>	<b>V</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>X</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XIII</b>
<b>Resumen</b>	<b>XV</b>
<b>Abstract</b>	<b>XVII</b>
<b>I. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. General . . . . .	2
1.2.2. Específicos . . . . .	2
1.2.3. Alcance y delimitación . . . . .	2
1.2.4. Justificación . . . . .	3

<b>II. Marco Referencial</b>	<b>4</b>
2.1. Antecedentes . . . . .	4
2.2. Marco Teórico . . . . .	6
2.2.1. Laguna de Yahuarcocha . . . . .	6
2.2.2. Estado actual de la laguna . . . . .	8
2.2.3. Gestión ambiental y calidad del agua . . . . .	8
2.2.4. Sistemas de monitoreo de agua . . . . .	12
2.2.5. Tecnología LoRaWAN . . . . .	13
2.2.6. Plataformas de visualización y análisis de datos . . . . .	16
<b>III. Marco Metodológico</b>	<b>19</b>
3.1. Enfoque y tipos de investigación . . . . .	19
3.2. Diseño de la investigación . . . . .	19
3.2.1. Fase 1: Recopilación de información acerca de la laguna, los sensores y la tecnología LoRaWan . . . . .	20
3.2.2. Fase 2: Elaboración del sistema de recopilación de datos . . . . .	20
3.2.3. Fase 3: Validación del sistema creado . . . . .	21
<b>IV. Desarrollo</b>	<b>23</b>
4.1. Arquitectura . . . . .	23
4.1.1. Nodos finales . . . . .	24
4.1.2. Gateway . . . . .	31
4.1.3. Conexión con el servidor propietario . . . . .	31

4.1.4.	Servidor puente . . . . .	32
4.1.5.	Apache . . . . .	33
4.1.6.	PHP 8.0 . . . . .	33
4.1.7.	MySQL . . . . .	36
4.1.8.	Base de datos en tiempo real . . . . .	37
4.2.	Interfaz de usuario . . . . .	38
4.2.1.	Interfaz . . . . .	38
4.3.	Pruebas de funcionamiento . . . . .	41
4.3.1.	Calibración de los sensores en el campo . . . . .	41
4.3.2.	Recepción de datos en TTN . . . . .	45
4.3.3.	Envío de datos al servidor puente . . . . .	46
4.3.4.	Visualización de los datos . . . . .	46
4.4.	Validación de los datos . . . . .	49
4.4.1.	Análisis de error . . . . .	50
4.5.	Efectividad en la red de transmisión . . . . .	51
4.5.1.	Análisis de intensidad y calidad de señal . . . . .	52
4.5.2.	Gestión energética . . . . .	54
<b>v.</b>	<b>Conclusiones, recomendaciones y trabajo a futuro</b>	<b>56</b>
5.1.	Conclusiones . . . . .	56
5.2.	Recomendaciones . . . . .	57
5.3.	Trabajo a futuro . . . . .	57



# Índice de figuras

2.1. Departamento de Gestión Ambiental – GAD Municipal Ibarra [19]. . . . .	7
2.2. Departamento de Gestión Ambiental – GAD Municipal Ibarra [20]. . . . .	7
2.3. LoRa Alliance [39]. . . . .	14
2.4. La Red de las Cosas [40]. . . . .	14
2.5. La Red de las Cosas [40]. . . . .	15
2.6. La Red de las Cosas [40]. . . . .	15
2.7. Nodos Finales LoRaWAN: análisis de seguridad y eficiencia energética [41]. . .	16
2.8. Sistema de monitoreo mediante Firebase [47]. . . . .	17
4.1. Arquitectura de red. . . . .	24
4.2. Pines y etiquetas del RS485-LB. . . . .	24
4.3. Funcionamiento de los nodos finales. . . . .	26
4.4. Funcionamiento del código de caracterización de datos y respuestas. . . . .	27
4.5. Sensor de pH SKU FIT0348. . . . .	29
4.6. Sensor de conductividad eléctrica SKU DFR0300. . . . .	30
4.7. Payload decodificado. . . . .	32

4.8. Configuración del servidor Apache. . . . .	33
4.9. Configuración de PHP 8.0. . . . .	34
4.10. Configuración de PHP para la conexión. . . . .	35
4.11. Diagrama de bloques del Insert PHP. . . . .	36
4.12. SQL script. . . . .	37
4.13. Flujo de datos. . . . .	38
4.14. Interfaz de usuario. . . . .	39
4.15. Funcionalidad el código de recepción de datos para las gráficas. . . . .	40
4.16. Datos de referencia de calibración de sensor de conductividad eléctrica. . . . .	41
4.17. Datos obtenidos en la calibración de sensor de conductividad eléctrica. . . . .	42
4.18. Datos de referencia de calibración de sensor de conductividad eléctrica. . . . .	43
4.19. Datos obtenidos en la calibración de sensor de conductividad eléctrica. . . . .	43
4.20. Datos obtenidos en la medición de calibración con tiras de pH por color . . . . .	44
4.21. Datos obtenidos en la medición de calibración de pH. . . . .	45
4.22. Payload con datos. . . . .	45
4.23. Datos almacenados y enviados. . . . .	46
4.24. Datos unificados de la acequia El Quince. . . . .	47
4.25. Datos unificados de la afluyente Polo Golo. . . . .	48
4.26. Datos unificados de la afluyente Manzana-Huaico. . . . .	49
4.27. Puntos de referencia de toma de datos. . . . .	51
4.28. Intensidad y calidad de señal de la acequia El Quince. . . . .	52
4.29. Intensidad y calidad de señal de la afluyente Polo Golo. . . . .	53

4.30. Intensidad y calidad de señal de la afluyente Manzana-Huaico. . . . .	53
4.31. Dispositivos del sistema de monitoreo. . . . .	54
B.1. Datos medidos de pH. . . . .	66
B.2. Datos medidos de conductividad eléctrica. . . . .	66
C.1. Datos medidos de pH. . . . .	67
C.2. Datos medidos de conductividad eléctrica. . . . .	67
D.1. Datos medidos de pH. . . . .	68
D.2. Datos medidos de conductividad eléctrica. . . . .	68
E.1. Trabajos en las tuberías de las afluentes. . . . .	69
E.2. Trabajos en la zona superior de las afluentes. . . . .	70
E.3. Señalización de los trabajos en la zona. . . . .	71
E.4. Trabajo en la afluyente. . . . .	72

# Índice de tablas

2.1. Resultados del informe de calidad del agua [15]. . . . .	5
2.2. Datos fisicoquímicos de los caudales de la Laguna de Yahuarcocha – noviembre 2024 [16]. . . . .	6
2.3. Datos fisicoquímicos de los caudales de la Laguna de Yahuarcocha – diciembre 2024 [16]. . . . .	6
2.4. Índice de calidad del agua y su clasificación [26]. . . . .	11
2.5. Sensores de pH [33]. . . . .	12
4.1. Configuraciones iniciales del nodo RS485-LB. . . . .	25
4.2. Configuraciones iniciales del microcontrolador. . . . .	25
4.3. Comandos AT para comunicación. . . . .	28
4.4. Comandos AT para configuración. . . . .	28
4.5. Sensores implementados. . . . .	29
4.6. Valores de los voltajes para el pH [58]. . . . .	30
4.7. Configuración del Gateway. . . . .	31
4.8. Configuración del Webhook. . . . .	32

4.9. Configuración del servidor puente. . . . .	33
4.10. Comandos de calibración de sensores. . . . .	42
4.11. Datos in situ [61]. . . . .	50
4.12. Comparativa de datos. . . . .	50
4.13. Consumo energético individual. . . . .	55
4.14. Consumo energético individual. . . . .	55

## Resumen

La Laguna de Yahuarcocha es un recurso hídrico esencial en la provincia de Imbabura que se encuentra en una condición crítica de eutrofización a causa de factores antropogénicos, tales como el vertido de residuos y la deficiente infraestructura de alcantarillado en su microcuenca. Con respecto a este problema, el estudio actual desarrolla un sistema de monitoreo ambiental en tiempo real para sus afluentes más importantes, utilizando tecnología LoRaWAN. El sistema fue desarrollado con una arquitectura distribuida, incorporando nodos de adquisición a través del convertidor Dragino RS485-LB con sensores industriales de pH y conductividad eléctrica (Ec). La solidez del protocolo LoRaWAN en ambientes naturales complejos se evidencia a través de los resultados de la validación técnica, que mantiene comunicaciones estables con valores SNR variables entre  $-9.5 \text{ dB}$  y  $5.25 \text{ dB}$ . Se identificaron alteraciones significativas durante la etapa de seguimiento, que los muestreos manuales convencionales no registran y que se deben a intervenciones físicas en los cauces y al transporte de sedimentos. El análisis de gestión de energía muestra que el consumo del sistema es en su mayoría estático ( $85.0 \text{ mA}$ ), determinado por la constante operación del hardware de sensado, lo cual limita la autonomía a 9.4 horas con baterías estándar de  $1000 \text{ mAh}$ . El sistema puesto en marcha es una herramienta tecnológica efectiva para la gestión del agua, ya que ofrece información de elevada resolución temporal, lo

cual posibilita establecer decisiones políticas y técnicas para la recuperación y conservación del ecosistema de Yahuarcocha.

***Palabras clave:*** LoRaWAN, Monitoreo Ambiental, Yahuarcocha, Sensores Industriales, Eutrofización, Internet de las Cosas (IoT).

## Abstract

Yahuarcocha Lake is an essential water resource in the province of Imbabura, currently facing a critical state of eutrophication due to anthropogenic factors such as waste disposal and deficient sewage infrastructure within its micro-basin. To address this issue, the present study develops a real-time environmental monitoring system for its major tributaries using LoRaWAN technology. The system was designed with a distributed architecture, incorporating acquisition nodes through the Dragino RS485-LB converter integrated with industrial pH and electrical conductivity (EC) sensors. The robustness of the LoRaWAN protocol in complex natural environments was evidenced through technical validation results, which maintained stable communications with SNR values ranging from  $-9.5\text{ dB}$  to  $5.25\text{ dB}$ . Significant alterations were identified during the monitoring stage that conventional manual sampling fails to record; these are attributed to physical interventions in the watercourses and sediment transport. Energy management analysis showed that the system's consumption is predominantly static ( $85.0\text{ mA}$ ), determined by the continuous operation of the sensing hardware, which limits autonomy to

9.4 hours with standard 1000 *mAh* batteries. The implemented system serves as an effective technological tool for water management, providing high-temporal-resolution data that enables the formulation of political and technical decisions for the restoration and conservation of the Yahuarcocha ecosystem.

***Keywords:*** LoRaWAN, Environmental Monitoring, Yahuarcocha, Industrial Sensors, Eutrophication, Internet of Things (IoT).

# Capítulo I

## Introducción

### 1.1. Planteamiento del problema

La Laguna de Yahuarcocha atraviesa un proceso avanzado de deterioro ambiental, evidenciado por una coloración oscura en sus aguas y una elevada concentración de nutrientes que favorecen la proliferación excesiva de algas. Según lo reportado en [1], la laguna presenta un alto grado de eutrofización, mientras que [2] advierte que su estado actual la sitúa al borde de una condición hipereutrófica, lo que compromete gravemente su equilibrio ecológico.

El origen de este fenómeno es multifactorial. Se identifican causas físicas como la presencia de un lecho de arena limosa que obstaculiza la circulación subterránea del agua, y causas antrópicas relacionadas con el vertido de aceites, grasas, residuos orgánicos e inorgánicos por parte de habitantes y turistas [3]. Además, la precipitación intensa incrementa los flujos superficiales contaminados, arrastrando materia orgánica hacia la laguna [4]. A esto se suma la descarga continua de aguas residuales domésticas y agrícolas sin tratamiento previo, que enriquecen el ecosistema acuático con nutrientes como nitrógeno y fósforo, acelerando la eutrofización [5].

La situación se agrava por las características geográficas de la microcuenca. El Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del GAD Ibarra señala que las pendientes pronunciadas, la acumulación de residuos durante la estación seca y el uso exclusivo del recurso hídrico por resi-

dentes de zonas altas para fines agrícolas y ganaderos incrementan la vulnerabilidad del sistema hídrico ante procesos de escorrentía [6]. Asimismo, el Plan de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la zona es limitado en cobertura, por lo que varias viviendas descargan sus aguas negras directamente en la laguna [6].

Ante este escenario, el pronóstico es negativo si no se implementan medidas correctivas. La degradación de la calidad del agua pone en riesgo los ecosistemas asociados, la salud pública, el desarrollo turístico y la sostenibilidad de las actividades productivas locales. En este contexto, se plantea como solución la implementación de un sistema de monitoreo ambiental que permita registrar en tiempo real los parámetros críticos que influyen en los afluentes de la laguna. Mediante el uso de sensores distribuidos con tecnología LoRaWAN, se podrá disponer de datos clave para orientar decisiones técnicas, ambientales y políticas orientadas a la conservación, rehabilitación y uso sostenible de Yahuarcocha.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. General**

Monitorear los parámetros ambientales que influyen en los afluentes de la Laguna de Yahuarcocha mediante sensores distribuidos con tecnología LoRaWAN.

### **1.2.2. Específicos**

- Determinar estudios previos sobre los parámetros ambientales de Yahuarcocha y el uso de tecnología LoRaWAN en entornos naturales.
- Diseñar un sistema de recolección de datos con sensores de bajo consumo y comunicación remota.
- Validar el sistema de monitoreo distribuido en puntos estratégicos de los afluentes de la laguna.

### **1.2.3. Alcance y delimitación**

El fin de esta investigación es monitorear los distintos parámetros ambientales que influyen en las entradas de agua de la laguna de Yahuarcocha, la cual se ha visto afectada debido al crecimiento demográfico de la zona circundante, y los tratamientos aplicados previamente, junto

con el proceso natural que conlleva esta zona de protección ambiental.

Para comenzar, se realiza una investigación profunda acerca de los aspectos que afectan a la laguna de Yahuarcocha y sus afluentes, cómo funciona la tecnología LoRaWAN y los sensores que se implementarán para la medición de los datos. Luego se diseñará un sistema para captar los datos requeridos con ayuda de la tecnología de sensores LoRaWAN, tomando en cuenta los factores anteriormente investigados.

Finalmente, se implementa un sistema para hallar variaciones o patrones en los datos generados que ayuden a entender los acontecimientos en la laguna, concluyendo con la validación del sistema de monitoreo.

#### **1.2.4. Justificación**

La Laguna de Yahuarcocha constituye un recurso estratégico para la provincia de Imbabura, tanto por su valor ambiental como por su impacto en el turismo, la economía local y las actividades agrícolas. Sin embargo, enfrenta un progresivo deterioro debido al crecimiento urbano desordenado, la contaminación por vertidos domésticos y comerciales, y la alteración de sus afluentes. Ante esta situación, el monitoreo de los parámetros ambientales en sus entradas de agua se vuelve esencial para establecer medidas preventivas y proponer alternativas sostenibles de conservación.

Para el futuro ingeniero en mecatrónica, este proyecto representa una oportunidad concreta para aplicar conocimientos en electrónica y desarrollo de sistemas embebidos con un enfoque en sostenibilidad ambiental. Además, aporta a la comunidad al generar información útil para la toma de decisiones sobre el manejo de la laguna, mejorando la calidad de vida de quienes dependen de este ecosistema.

Desde el punto de vista de la ingeniería, la aplicación de tecnologías como LoRaWAN, caracterizada por su bajo consumo energético y amplio alcance, permite desarrollar soluciones robustas en entornos sin infraestructura de red tradicional. El proyecto no solo promueve la adopción de tecnologías emergentes, sino que fortalece la articulación entre innovación técnica y compromiso social.

# Capítulo II

## Marco Referencial

### 2.1. Antecedentes

La Laguna de Yahuarcocha, ubicada en la provincia de Imbabura, es uno de los principales cuerpos hídricos de la región, con una superficie de 187,5 hectáreas y una profundidad máxima de 8 metros. Es, además, un destino turístico relevante a nivel nacional e internacional [7].

Durante la última década, su estado ambiental ha sufrido un deterioro progresivo, principalmente por la presencia de varios asentamientos poblacionales dentro de su microcuenca, como Priorato, Aloburo, Cachipamba, San Francisco Yuracruz, Yuracucito, Bellauro, El Olivo Alto y San Miguel de Yahuarcocha [6]. Estas poblaciones han contribuido al proceso acelerado de eutrofización, asociado a descargas de aguas residuales, prácticas agrícolas, ganaderas y actividades turísticas no reguladas. Este fenómeno incrementa la concentración de nutrientes como nitrógeno y fósforo, promoviendo el crecimiento desmedido de algas y afectando la calidad del agua [8].

El desvío de afluentes para riego agrícola ha reducido el caudal natural hacia la laguna, generando una disminución en su nivel de agua [9]. La eutrofización puede ser causada tanto por factores naturales como antropogénicos. Entre los naturales se destacan las lluvias intensas que arrastran fertilizantes y materia orgánica, mientras que entre los antropogénicos sobresalen las aguas residuales sin tratamiento, ricas en materia orgánica y detergentes [10].

Parámetros ambientales como temperatura y humedad también influyen significativamente en el equilibrio del ecosistema. La temperatura media anual en la zona varía entre 5°C en las regiones altas y 25°C en las bajas [5]. La humedad relativa está directamente relacionada con

la probabilidad de precipitaciones y, por ende, con los volúmenes de escorrentía que arrastran contaminantes hacia la laguna [6].

La medición precisa de estos parámetros permite generar alertas y planificar acciones correctivas. Para ello, resulta clave implementar un sistema basado en sensores conectados mediante tecnologías de bajo consumo energético y gran cobertura, como las redes LPWAN (Low Power Wide Area Network) [11]. Dentro de estas, LoRaWAN destaca por su eficiencia, capacidad de transmisión a largas distancias y operación en entornos sin infraestructura de red convencional [12].

La versatilidad de LoRaWAN ha sido demostrada en aplicaciones agrícolas, sanitarias, urbanas y ambientales, lo que la convierte en una opción idónea para el monitoreo ecológico de Yahuarcocha [13]. Su efectividad, sin embargo, depende de la correcta elección de sensores. Para la medición de lluvia, se recomienda el uso de pluviómetros de balancín, como el modelo TB3 de HyQuest Solutions, con precisión del  $\pm 2\%$  y resolución de 0.01 pulgadas [14].

El Departamento de Gestión Ambiental del GAD Municipal de Ibarra se ha encargado de realizar mediciones de los parámetros fisicoquímicos de la laguna (mostrados en las Tablas 2.1, 2.2 y 2.3), estas mediciones se realizan periódicamente y muestran concentraciones elevadas de nitritos y fosfato, un pH y temperatura normal y una conductividad alta que podría sugerir una acumulación de sales o contaminantes [15].

Tabla 2.1: Resultados del informe de calidad del agua [15].

Variables	Canal Tahuando		Manzano-Huaico			Polo Golo		
Fechas	18	24	10	17	24	10	17	24
Hora	9h20	15h45	10h18	2h51	16h05	10h10	2h40	15h58
Temperatura	15.9	18.7	12.9	14	14	15	15	16
Oxígeno Disuelto %	46.2	28.3	71.7	72.1	72	71.6	70.4	71.9
Conductividad	224.4	243.3	136.8	144.4	148.5	113.9	96.9	156.8
pH	7.38	6.91	7.62	7.77	7.73	7.58	7.4	7.98
Clorofila	2.3	20.58	2.37	2.05	1.13	6.07	3	1.9
Ficocianina	0.01	0.92	0.02	0.01	0	1.76	0.07	0

Tabla 2.2: Datos fisicoquímicos de los caudales de la Laguna de Yahuarcocha – noviembre 2024 [16].

NOVIEMBRE								
Variables	Canal Tahuando				Polo Golo			
	5-nov 10h23	12-nov 16h16	18-nov	25-nov	5-nov 10h40	12-nov 16h33	18-nov 15h30	25-nov 15h15
Temperatura	S/C	17.6	S/C	S/C	15.7	17.8	S/C	S/C
Oxígeno disuelto %	S/C	69.8	S/C	S/C	71.4	69.3	S/C	S/C
Conductividad	S/C	208.8	S/C	S/C	190.2	217.7	S/C	S/C
pH	S/C	7.98	S/C	S/C	7.78	8.02	S/C	S/C
Clorofila	S/C	3.8	S/C	S/C	2.48	6.29	S/C	S/C
Ficocianina	S/C	0.41	S/C	S/C	0.01	0.5	S/C	S/C

Tabla 2.3: Datos fisicoquímicos de los caudales de la Laguna de Yahuarcocha – diciembre 2024 [16].

DICIEMBRE						
Variables	Canal Tahuando		Polo Golo		Manzano huaico	
	9-dic 16h23	16-dic 15h35	9-dic 16h28	16-dic 15h12	9-dic 16h32	16-dic 15h04
Temperatura	S/C	15.6	S/C	17.3	S/C	17
Oxígeno disuelto %	S/C	70.8	S/C	68.1	S/C	69.1
Conductividad	S/C	100	S/C	116.1	S/C	101.3
pH	S/C	7.38	S/C	7.68	S/C	7.68
Clorofila	S/C	6.56	S/C	7.85	S/C	3.8
Ficocianina	S/C	0.41	S/C	0.56	S/C	0.03

## 2.2. Marco Teórico

### 2.2.1. Laguna de Yahuarcocha

#### Ubicación y Características

La laguna de Yahuarcocha es una de las veintisiete lagunas que se encuentran en la provincia de Imbabura, se encuentra a una altitud de 2185 metros sobre el nivel del mar y ocupa un área de 187.5 hectáreas, cuenta con una profundidad de entre 6 y 8 metros, su temperatura fluctúa entre los 11°C, y alberga cerca de 12,7 millones de metros cúbicos de agua, su edad es de 12.000 años, es decir, existe desde el Pleistoceno [17].

## Afluentes y Efluentes

En [18] se describe que los afluentes que desembocan en la laguna pertenecen a sitios nombrados Polo Golo, Manzano Huaico y acequia El Quince mostradas en las Figs. 2.1 y 2.2.

Afluente acequia El Quince.



Fig. 2.1 Departamento de Gestión Ambiental – GAD Municipal Ibarra [19].

Afluentes Polo Golo y Manzana-Huaico.



Fig. 2.2 Departamento de Gestión Ambiental – GAD Municipal Ibarra [20].

## **2.2.2. Estado actual de la laguna**

### **Identificación de las principales fuentes de contaminación**

La laguna sufre de la contaminación en sus aguas debido al mal manejo de las aguas residuales de las actividades antrópicas aledañas como el comercio, agricultura y turismo que generan aguas organolépticas, es decir, agua con olor, color, sabor y aspecto de turbidez. Otro problema es la mala disposición de los desechos sólidos generados por la localidad, estos terminan en las entradas de agua a la laguna fomentando el mal estado de esta. La destrucción de la cobertura vegetal junto a la disminución del espejo de agua y los problemas antes mencionados han fomentado que la laguna entre en un estado de eutrofización, alterando así el ecosistema existente en la laguna [6].

Las redes de desagües sufren una extrema deposición de aceites quemados y grasas producto de la preparación de alimentos que se registra en la zona, además, el faenamiento y lavado de pescado que de igual manera es depositado en los desagües provocan taponamientos e los lugares que tiene una baja pendiente generando que así estos residuos lleguen a la red PTAR y los residuos sólidos tapan los sumideros [18].

## **2.2.3. Gestión ambiental y calidad del agua**

### **Fuentes de contaminación**

Debido a las aguas residuales, servidas locales y residuales industriales, la laguna presenta una contaminación elevada de sedimentos y materiales suspendidos que terminan creando esta turbidez y dificultad de desarrollo natural de la laguna al obstruir sitios de desove de peces y canales de entrada y salida agua. Los desechos y componentes orgánicos que son arrastrados por las aguas servidas, de igual manera son bioacumulables y ocasionan efectos adversos en el ambiente [6].

El barrio de Yahuarcocha dispone de su PTAR que descarga su efluente en la laguna de Yahuarcocha con un total del 0.08 % del caudal [6].

Las precipitaciones varían mucho a lo largo del año, siendo la época más mojada del 15 de noviembre al 23 de mayo con una probabilidad de más del 40 %, mientras que la temporada más seca es del 23 de mayo al 15 de noviembre con un promedio de 3,8 días con al menos 1 milímetro de precipitación [17].

## **Tipos de contaminantes**

Los residuos sólidos están compuestos en su gran mayoría por agentes contaminantes derivados de las actividades cotidianas y domésticas que generan un efecto negativo en los ecosistemas [21].

Normalmente, la actividad humana genera un exceso de materia orgánica que son introducidas a las fuentes hídricas, un exceso de nutrientes y productos químicos sintéticos como pesticidas y herbicidas de la actividad agrícola, productos de aseo personal y aceites tales como hidrocarburos o poli aromáticos [22].

## **Eutrofización**

Los lagos andinos han presentado un oscurecimiento y eutrofización debido a las actividades humanas, disminuyendo así la calidad del agua [23]. Un cuerpo de agua se encuentra en estado de eutrofización cuando contiene niveles de nutrientes más altos que los normales, puede producirse de manera natural, sin embargo, la actividad humana influye en gran medida para que este proceso degradante incremente, la presencia de nitrógeno y fósforo por desechos aumentan la proliferación de algas en los ecosistemas acuáticos [24].

## **Impactos de la contaminación hídrica en ecosistemas y salud humana**

Las fuentes de agua situadas en la superficie terrestre son de suma importancia para la población humana, ya que son la fuente principal de agua para el consumo y también son el medio de eliminación de residuos por excelencia [25].

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente especifica que más del 80 % de las aguas residuales son vertidas sin tratar al medio ambiente [26].

La contaminación que sufren los recursos hídricos del planeta ya sea por desechos de las industrias o simplemente por los residuos no tratados afectan a los ecosistemas, la flora y la fauna además de la calidad del agua potable para las zonas aledañas [27].

La contaminación hídrica es parte de la contaminación ambiental, en [21] , se indica que alrededor de 7 millones de personas al año mueren por este problema y que para el 2050 la temperatura mundial habrá aumentado en 2°C, acarreando consecuencias tales como el deshielo de la región ártica y que las personas tengan que vivir en entornos desérticos.

## **Importancia del monitoreo en la gestión ambiental**

El agua es un recurso importante para la humanidad y su debido monitoreo es crucial para la salud humana y de los ecosistemas, siendo este un problema global. Su calidad se evalúa mediante parámetros estandarizados en los Índices de Calidad del Agua (ICA) que facilitan la gestión de las fuentes de agua al ser un recurso indispensable [26].

El monitoreo constante de la calidad del agua permite obtener información clara y precisa sobre lo que acontece y los desastres asociados además de la detección temprana de floraciones de algas nocivas (FAN), lo que brinda la oportunidad de atenuar los impactos ambientales, de índole económica y problemas sanitarios adversos [28].

La evaluación del agua post monitoreo son los prerequisites indispensables para el cuidado ambiental y el tratamiento de la contaminación [22].

## **Parámetros de la calidad del agua a monitorear**

La conductividad eléctrica es la medida de las cargas iónicas que se encuentran dentro del agua, nos permite saber la concentración de sales e iones presentes en el agua [15].

El potencial de hidrógeno o mejor conocido como pH, es la intensidad de la acidez que se encuentra, sin embargo, no indica la cantidad de compuestos ácidos o alcalinos, sino la fuerza que tienen estos iones [15].

## **Métodos y técnicas de muestreo y análisis del agua**

Cuando los datos son recopilados por los sensores se representan como series temporales que es básicamente una secuencia de puntos discretos que fueron registrados en un orden cronológico. Existen varios enfoques estadísticos, pero normalmente se emplea dos: el análisis funcional de datos (FDA) que trata los datos obtenidos como si fuesen funciones continuas, permitiendo explorar su estructura subyacente; por otro lado, el análisis de series temporales se enfoca en el modelado de patrones repetitivos para determinar tendencias y características importantes [29].

El filtro de media móvil funciona calculando el promedio de un grupo de muestras consecutivas para atenuar la señal resultante. Este procedimiento utiliza una ventana deslizante de  $M$  elementos que se mueve a través de toda la serie de datos en orden cronológico. Su punto más

importante es que puede disminuir el ruido aleatorio e impredecible sin afectar la integridad de las alteraciones bruscas en la señal, lo que la convierte en una herramienta esencial para procesar datos en el dominio temporal [30].

### **Normativas nacionales e internacionales relacionadas con la calidad del agua y el monitoreo ambiental**

Los valores de ICA permiten clasificar la calidad del agua como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Índice de calidad del agua y su clasificación [26].

<b>Índice de calidad del agua</b>	<b>Clasificación</b>
>300	Agua no apta para beber
Entre 200 y 300	Muy mala calidad
Entre 100 y 200	Mala calidad
Entre 50 y 100	Buena calidad
<50	Excelente calidad

Elaboración propia con base a los datos de la calidad del agua y su clasificación.

### **Marcos legales para la protección de cuerpos de agua y ecosistemas lacustres**

En el Código Orgánico del Ambiente [31], artículo 191 se estipula que, del monitoreo de la calidad del aire, agua y suelo. La Autoridad Ambiental Nacional o el Gobierno Autónomo Descentralizado competente, en coordinación con las demás autoridades competentes, según corresponda, realizarán el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, agua y suelo, de conformidad con las normas reglamentarias y técnicas que se expidan para el efecto.

También, en el artículo 260 se expresa que los ríos, lagos, lagunas, moretales, bosques inundables y otros ecosistemas afines, serán considerados como ecosistemas de importancia para la conservación y manejo de la biodiversidad dulceacuícola [31]. En estos ecosistemas queda prohibido:

a) Todo tipo de actividad pesquera que altere los ecosistemas dulceacuícolas, especialmente la pesca de arrastre de cualquier tipo y trasmallo de fondo. La Autoridad Ambiental Nacional, en coordinación con la Autoridad Científica Pesquera regulará las pesquerías, artes y aparejos de pesca.

b) El uso de biocidas o cualquier otro sistema o arte dañino de pesca.

c) Verter residuos sólidos y líquidos de forma directa o indirecta.

d) La instalación de infraestructura, excepto aquella que sirva para mitigar el impacto del anclaje y que cuente con la evaluación ambiental respectiva aprobada por la Autoridad Ambiental Nacional.

e) Las actividades turísticas, de recreación y de formación no autorizadas por las autoridades competentes.

## 2.2.4. Sistemas de monitoreo de agua

### Tipos de sensores para medición de parámetros de calidad del agua

En [32], se menciona que, para una medición inalámbrica precisa de parámetros de la calidad del agua como el pH, DO, conductividad, turbidez, entre otros; colocados a diferentes profundidades se requiere crear una red de sensores distribuidos inalámbricamente, estos podrían ser sensores en miniatura, de estados sólido que son económicos.

El pH puede ser medido colorimétricamente o potenciométricamente utilizando la selectividad de iones  $H^+$  de superficies de vidrio [33]. Además, se presentan algunos tipos de sensores en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5: Sensores de pH [33].

Rango de pH	Principio de detección	Comentarios
5 ... 9	Electroquímico (potenciométrico)	$WO_3$
3 ... 11	Electroquímico (potenciométrico)	Grafeno
6 ... 9	Eléctrico (químico-resistivo)	Hidrogel conductivo
3 ... 11	Eléctrico (OFET)	DDFTTF

Para medir la conductividad eléctrica se puede utilizar dos tipos de métodos, el contacto galvánico directo o la inducción electromagnética, en ambas situaciones muestran el paso de la electricidad dependiendo sus propiedades [34].

## **Principios de funcionamiento y calibración**

Un quimio-resistor basado en nanotubos de carbono o CNT tan solo requiere de la medición de la resistencia de la red de nanotubos en función de la concentración iónica permitiendo que no se haga uso de un electrodo de referencia [35].

Para medir la conductividad eléctrica, se utiliza un ánodo y un cátodo que cuantifica el paso de la corriente eléctrica que se coloca in situ [36].

Los sensores acuáticos que se exponen al ambiente suelen presentar derivas en sus mediciones, por esto requieren calibración regular según los estándares. Para la calibración y corrección de la desviación se implementa funciones que imitan flujos de trabajo manual además de una revisión de datos y comparación con registros de campo [37].

## **2.2.5. Tecnología LoRaWAN**

### **Modulación LoRa**

Es una red de área amplia de largo alcance que tiene una baja potencia, es de los mejores sistemas de comunicación inalámbrica para aplicaciones IoT, permite transmitir pequeños paquetes de datos de sensores consumiendo muy poca energía a grandes distancias de hasta incluso 45 km en áreas rurales abiertas. El protocolo LoRaWAN es bidireccional y permite la comunicación de enlace ascendente y descendente en dispositivos finales (End-devices) [38].

### **Arquitectura de red LoRaWAN**

La arquitectura de red LoRaWAN ocupa una topología de estrella de estrellas, las puertas de enlace retransmiten mensajes entre los End-devices y un servidor de red central que están conectadas mediante conexiones IP estándar [39], como se muestra en la Fig. 2.3.

## Arquitectura LoRaWAN

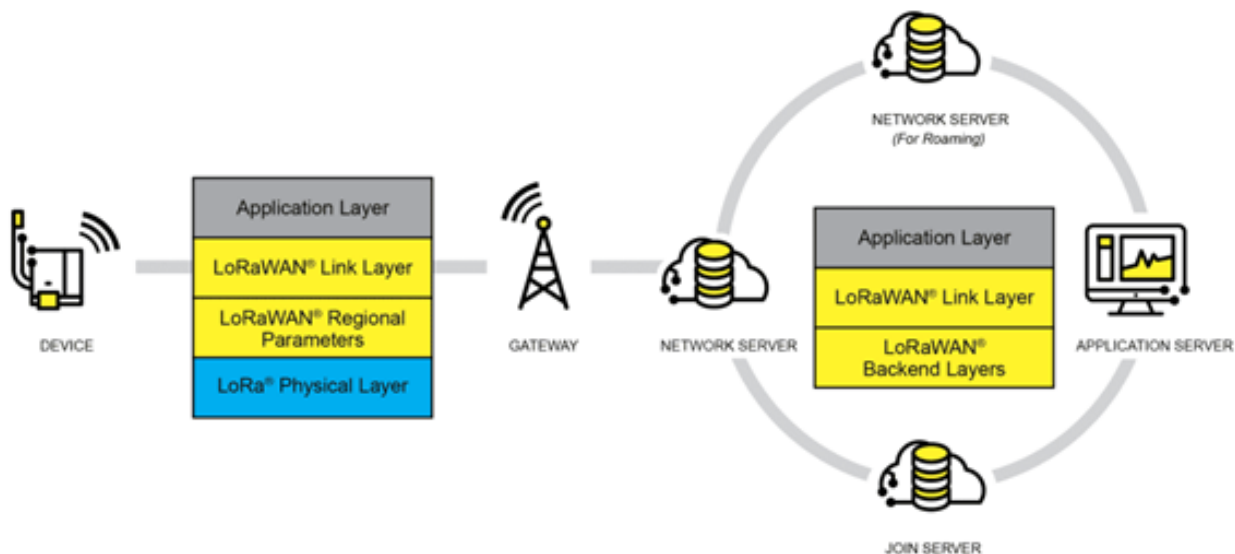


Fig. 2.3 LoRa Alliance [39].

### Clases de dispositivos LoRaWAN

Los dispositivos LoRaWAN pueden dividirse en tres clases principales: End-devices bidireccionales, End-devices bidireccionales con ranuras de recepción programadas y End-devices bidireccionales con ranuras de recepción máximas [39] (véase las Figs. 2.4, 2.5 y 2.6).

#### Conexión de dispositivos LoRaWAN de clase A.

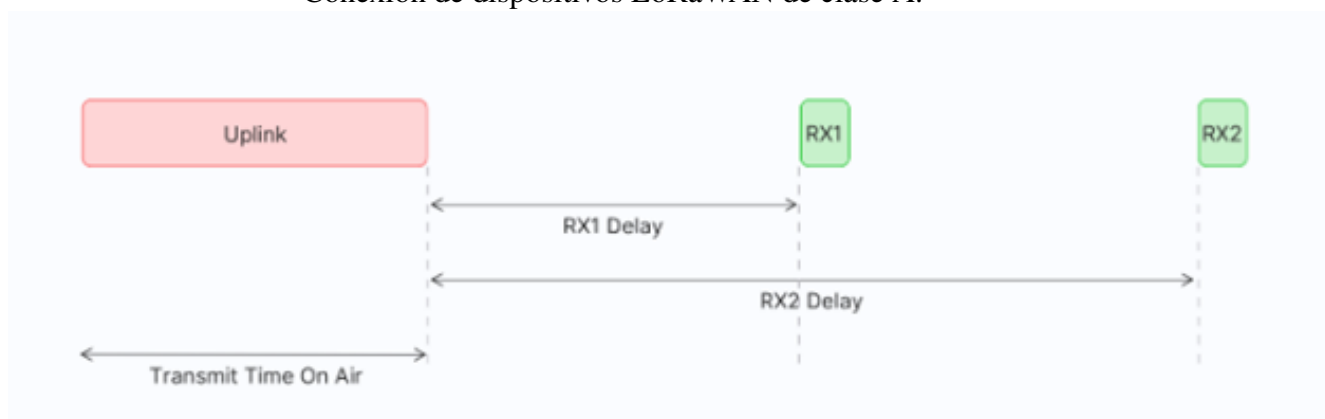


Fig. 2.4 La Red de las Cosas [40].

### Conexión de dispositivos LoRaWAN de clase B.

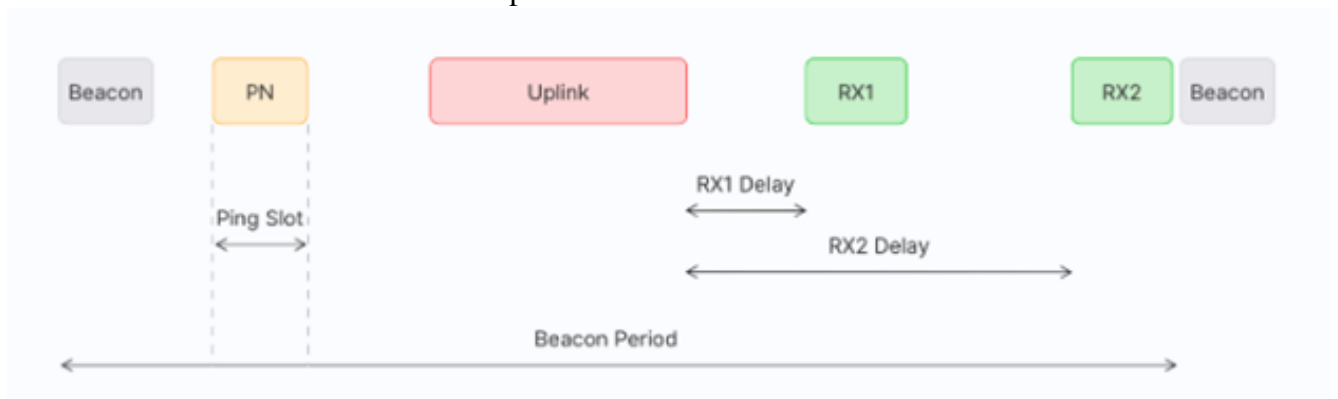


Fig. 2.5 La Red de las Cosas [40].

### Conexión de dispositivos LoRaWAN de clase C.

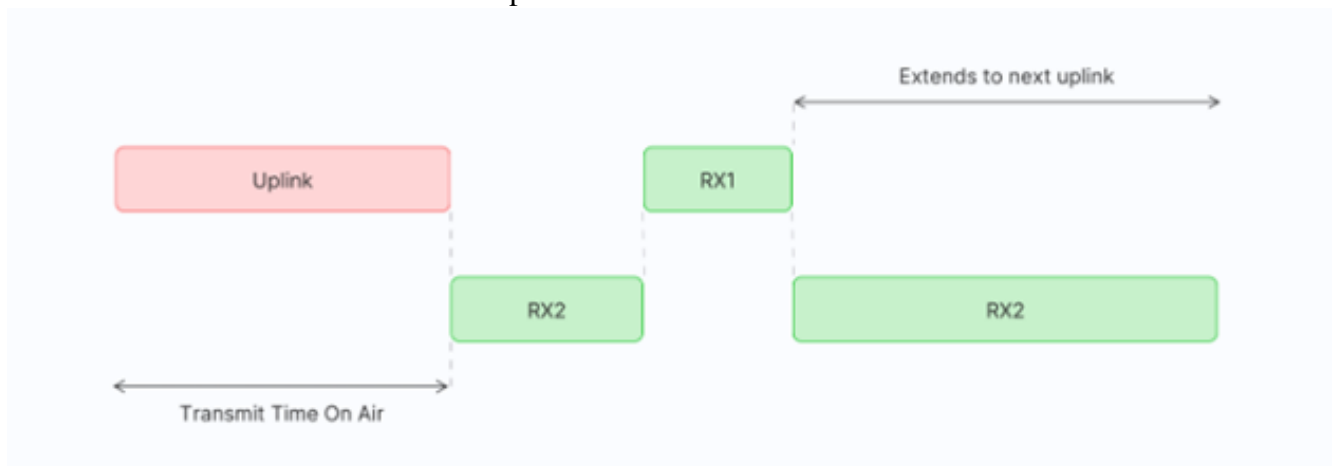


Fig. 2.6 La Red de las Cosas [40].

## Seguridad en LoRaWAN

LoRaWAN diseñó su seguridad con algoritmos estándar y poca eficacia probada, una protección de extremo a extremo y criptografía simétrica como se muestra en la Fig. 2.7. Utiliza dos niveles de seguridad, la autenticidad del dispositivo que es la capa de red y la capa de aplicación, siendo las principales características de seguridad junto con la autenticación mínima, y la confidencialidad [41].



Fig. 2.7 Nodos Finales LoRaWAN: análisis de seguridad y eficiencia energética [41].

## 2.2.6. Plataformas de visualización y análisis de datos

### Sistemas IoT

El internet de las cosas (IoT) ha crecido notablemente e impulsado que las redes de sensores a gran escala en diversos campos, se generalice; siendo aplicable en ciudades inteligentes, automatización industrial y monitorización ambiental [42].

### Arquitecturas de sistemas IoT para monitoreo

Los dispositivos IoT se conectan a End-devices mediante comunicación inalámbrica, estos a su vez, se conectan a puertas de enlace también conocidas como Gateways, estas se conectan al servidor de red que se enlaza con servidores de aplicaciones mediante conexión IP [43].

El IoT funciona en 4 fases: la recolección de datos por sensor, el almacenamiento de datos en la nube, el análisis de datos enviando su resultado de nuevo al dispositivo y finalmente, el dispositivo ejecuta una respuesta dependiendo de los datos que recibió [44].

### Tipos de bases de datos y su aplicación en IoT

Las bases de datos almacenan sus datos mediante tablas que representan un formato de cuadrícula de filas y columnas, permitiendo una facilidad al usuario al consultar u obtener los datos mediante lenguajes de consulta estructurados (SQL) mediante un lenguaje natural (NL) con base en codificadores y decodificadores [45].

Las bases de datos NoSQL proporcionan alta disponibilidad de datos, confiabilidad del servicio y una flexibilidad para administrar el Big Data. NoSQL es una base de datos relacional

de código abierto que no usa la interfaz SQL. Este sistema realiza automáticamente la tarea de asignar subconjuntos de los datos a cada nodo o procesador de la red, gracias a esto es la mejor herramienta para satisfacer las necesidades de requieren los entornos relacionados con IoT [46].

Las bases de datos en tiempo real están alojadas en nubes que podrían utilizar Firebase, luego estos datos pueden redistribuirse para la accesibilidad de cualquier usuario mediante aplicaciones móviles [47] (véase la Fig. 2.8).

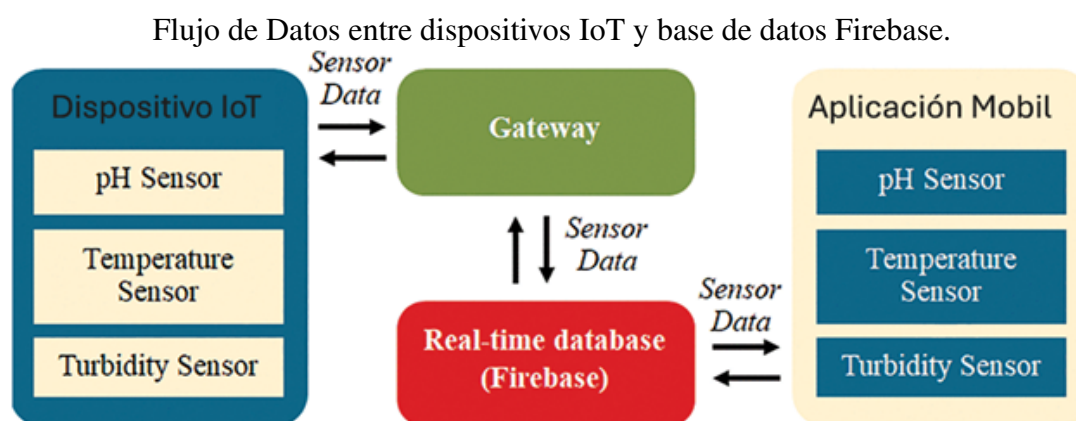


Fig. 2.8 Sistema de monitoreo mediante Firebase [47].

## Servidores Web

Un servidor web es un software creado para responder a las solicitudes de los navegadores y proporcionarles el contenido que requieren. Este procedimiento se realiza a través del protocolo estándar HTTP o, en caso de que una conexión protegida y cifrada sea necesaria, por medio del protocolo HTTPS [48].

El protocolo HTTP es la base del funcionamiento de los servidores web. Este protocolo, situado en la capa de aplicación del modelo TCP/IP (Protocolo de Control de Transmisión/Protocolo de Internet), es esencial para que la Web opere. HTTP define las reglas y el formato que deben seguir los navegadores al pedir objetos específicos y los servidores al procesar y enviar esos objetos de vuelta [49].

El conjunto de protocolos TCP/IP, se rige por las pautas del modelo OSI, tiene como propósito principal facilitar la transferencia de datos entre dispositivos variados. Estos protocolos son fundamentales para crear la comunicación a través de una o varias redes interconectadas [50].

Apache es un servidor modular, estable y configurable que tiene la capacidad de operar en varios sistemas operativos y de adecuarse con versatilidad a diferentes demandas operativas. Uno de sus beneficios es que almacena en archivos de bitácora (log) todos los eventos de su servicio, lo que resulta fundamental para que el administrador pueda elaborar estadísticas y tomar decisiones fundamentadas. Asimismo, contiene elementos de seguridad que, si se configuran de manera correcta, mejoran el control de acceso a los recursos web que los navegadores piden a través de HTTP [49].

El servidor HTTP Apache debe ejecutarse con privilegios de administrador (root) para poder establecer la configuración de red. Esto es esencial para que el servidor pueda vincularse (conectarse) al puerto 80, que es el puerto estándar empleado para escuchar y recibir las solicitudes de conexión de los clientes [51].

### **Tecnologías para la creación de interfaces de usuario**

Una interfaz gráfica de usuario (GUI) es una forma de simplificar el manejo de cualquier programa informático por medio de botones u otros apartados. Hoy en día existen varios lenguajes de programación que permiten el desarrollo de estas GUI y aplicaciones independientes para códigos propios para una ejecución sencilla [52].

# Capítulo III

## Marco Metodológico

### 3.1. Enfoque y tipos de investigación

El presente trabajo de integración curricular se desarrolla desde el enfoque ingenieril desde una investigación aplicada, puesto que está focalizada en resolver problemas concretos con los conocimientos obtenidos anteriormente en situaciones prácticas [53].

Se implementa la investigación de campo debido a que se estudia el entorno donde se suscitan los fenómenos que son de importancia para obtener datos reales [53]. Como lo es la observación y las encuestas a personal entendido en la problemática de la laguna.

También se efectúa una investigación documental puesto que se analiza documentos para conseguir la información correspondiente [54]. Para este caso se toma bases de datos de artículos indexados.

Además, se toma la investigación descriptiva puesto que es necesario describir las características de lo que ocurre con nuestra problemática y sus variables [55]. En este caso la descripción de los problemas de la laguna y el detalle de lo que se realiza para la medición de los datos.

### 3.2. Diseño de la investigación

La presente investigación se desarrollará con una estructura descompuesta en tres fases principales. La primera fase tomará datos relevantes para la estructuración del tema y su solución, que sucede en la laguna, qué se puede medir, cómo se va a medir, que sensores usar y cómo

funciona la tecnología LoRaWan. La segunda fase consta del desarrollo y pruebas del sistema diseñado, mientras que la tercera fase consta de la implementación en campo del sistema.

### **3.2.1. Fase 1: Recopilación de información acerca de la laguna, los sensores y la tecnología LoRaWan**

Se realiza una búsqueda documental del estado de la laguna, que parámetros son factibles para realizar una medición, y cómo funciona la tecnología LoRaWan.

#### **Actividad 1.1: Búsqueda de información documental acerca del estado actual de la laguna**

Se toma la información de fuentes confiables acerca del estado de la laguna y su problemática, causas, efectos e investigaciones anteriores.

#### **Actividad 1.2: Búsqueda de información documental acerca de los parámetros a medir**

Se investiga acerca de los parámetros medibles en la laguna y sus afluentes, su complejidad de medición y su importancia en esta investigación.

#### **Actividad 1.3: Investigación acerca de la información sobre de los sensores utilizados y la tecnología LoRaWan**

Se investiga que dispositivos utilizar para la medición de los parámetros anteriormente establecidos, además, cómo funciona la tecnología LoRaWan y cómo establecer las conexiones pertinentes con el sistema.

### **3.2.2. Fase 2: Elaboración del sistema de recopilación de datos**

Se desarrolla un sistema de recolección de datos basado en tecnología LoRaWan, luego de la respectiva búsqueda de información acerca de las plataformas de recolección de datos. Posteriormente se realiza la conexión de los sensores para las respectivas pruebas de funcionamiento.

#### **Actividad 2.1: Búsqueda de información sobre las plataformas de recolección de datos**

Se realiza una investigación acerca de las mejores plataformas para la recolección de datos, su funcionamiento, consumo y coste.

### **Actividad 2.2: Selección de la plataforma de recolección de datos**

Se toma los datos obtenidos acerca de lo que son las plataformas de datos y se escoge la que más provecho nos provea.

### **Actividad 2.3: Selección de sensores**

Se realiza una investigación de los sensores disponibles en el mercado y se selecciona los que más se adecúen a nuestros requerimientos.

### **Actividad 2.4: Programación del servidor para la base de datos**

Se desarrolla la programación del servidor para la recolección de datos.

### **Actividad 2.5: Programación de la plataforma para recolección de datos**

Se realiza las programación de la plataforma para la recolección de datos.

### **Actividad 2.6: Programación de los dispositivos**

Se configuran y programan los sensores de acuerdo a su manual de usuario.

### **Actividad 2.7: Pruebas de funcionamiento**

Se realizan pruebas de funcionamiento del sistema de monitorización.

## **3.2.3. Fase 3: Validación del sistema creado**

Luego de tener los sistemas listos, se procede a colocar en la laguna, probando su funcionamiento y validando que sean correctos, posteriormente se toma los datos se concluye con el manejo de datos y escritura de los resultados.

### **Actividad 3.1: Colocación de la antena**

Se implementan la antena para la recolección de datos desde la laguna

### **Actividad 3.2: Colocación del sistema**

Se realiza la colocación de los dispositivos para la recolección de datos.

**Actividad 3.3: Toma de datos**

Se recopila los datos emitidos por los sensores.

**Actividad 3.4: Rectificación de posibles fallos**

Si se presentan fallos, se corrige para luego ponerlos nuevamente en funcionamiento.

**Actividad 3.5: Manejo de los datos**

Se toma los datos y se los presenta de manera ordenada para que sean fáciles de interpretar.

**Actividad 3.6: Escritura de trabajo de integración curricular**

Se realiza la escritura de los resultados obtenidos.

# Capítulo IV

## Desarrollo

El propósito principal de este capítulo es describir el desarrollo de una puerta de enlace con tecnología avanzada, esencial para garantizar la visualización exacta de los datos sobre calidad del agua que los nodos finales recogen en los afluentes que desembocan en la laguna de Yahuarcocha, lo cual resulta vital para un monitoreo ambiental efectivo. Para esto, se analiza la elección de los parámetros de calidad más importantes y comunes, seguido de una explicación detallada del proceso que consiste en conectar e instalar adecuadamente el hardware y el software. Esta investigación exhaustiva tiene como objetivo ofrecer una solución tecnológica que no solo sea eficaz en la recolección de datos, sino también en la optimización de la administración de este recurso hídrico crucial para la provincia.

### 4.1. Arquitectura

A partir del marco teórico y a la selección de las herramientas adecuadas, en la Fig. 4.1 se muestra la arquitectura de red propuesta para resolver este caso.

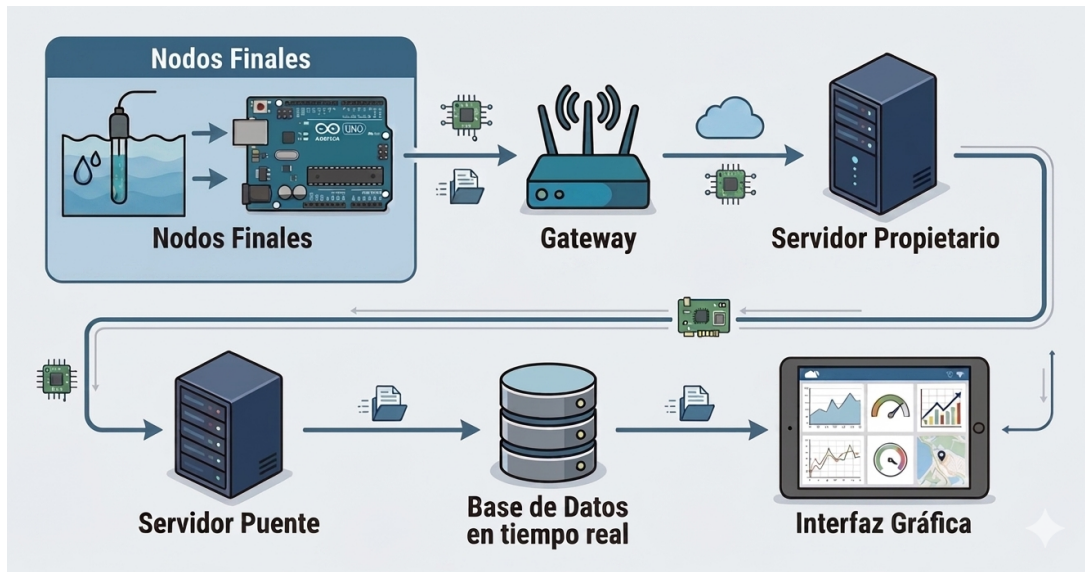


Fig. 4.1 Arquitectura de red.

#### 4.1.1. Nodos finales

El conversor Dragino RS485/UART a LoRaWAN LB es un puente de comunicación diseñado para incorporar sensores industriales RS485 o UART en ecosistemas IoT que se basan en LoRaWAN. Su función principal consiste en la captura sistemática de variables medidas por el sensor, las cuales se procesan y envían sin cables a servidores centralizados para su gestión posterior. [56]. Se elige este dispositivo por su versatilidad para tomar datos de varios sensores y enviarlos mediante LoRaWan. Los pines de la placa se muestran en la Fig. 4.2.

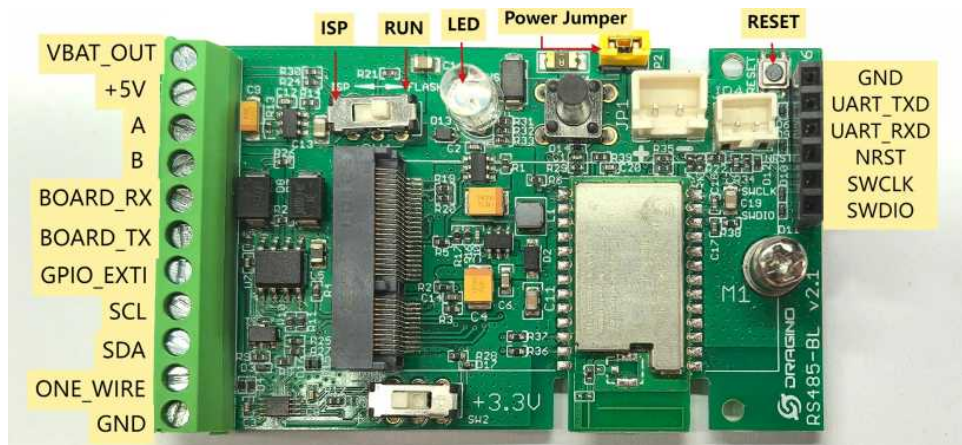


Fig. 4.2 Pines y etiquetas del RS485-LB.

## Configuración

El dispositivo final se configura con parámetros básicos de acuerdo al plan de frecuencias del dispositivo elegido como se muestra en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Configuraciones iniciales del nodo RS485-LB.

<b>Campo</b>	<b>Configuración</b>
DevEUI	A84041B55C5C6862
ID del dispositivo	draginoyahuarcocha
Plan de frecuencia	United States 902-928 MHz
Versión LoRaWAN	1.0.3
Tiempo de transmisión de los datos	DDFTTF

## Funcionamiento

El sistema maneja un disparador de flanco descendente, el microcontrolador se encuentra en una constante toma de datos de los sensores, los caracteriza y cada 15 segundos (tiempo establecido solo para pruebas) envía una señal por el pin 11 que despierta al RS485-LB mediante el pin GPIO\_EXTI para que comience una cadena de comandos AT hacia el microcontrolador que emite los datos solicitados en orden. La configuración base del microcontrolador se expresa en la Tabla 4.2, mientras que el funcionamiento de los nodos se explica en la Fig. 4.3.

Tabla 4.2: Configuraciones iniciales del microcontrolador.

<b>Campo</b>	<b>Configuración</b>
Tiempo de muestreo	100 ms
Intervalo de envío (pruebas)	15000 ms (15 segundos)
Intervalo de envío (campo)	21600000 ms (6 horas)
Disparador	Pin 11
Serial 2	8 y 9

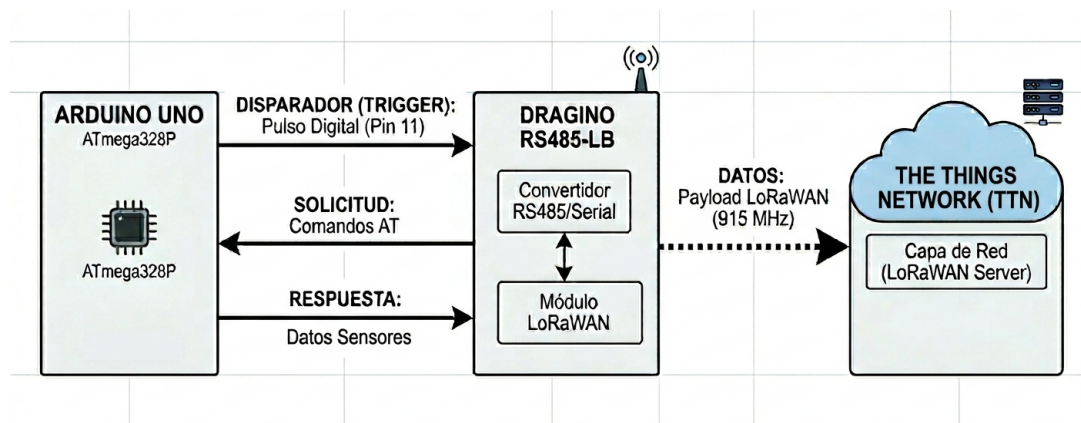


Fig. 4.3 Funcionamiento de los nodos finales.

El modo de funcionamiento para la transferencia de datos es el de maestro-esclavo, que se activa con un pulso el cual es enviado por el Arduino, que funciona como esclavo mientras que el conversor RS485-LB funciona como maestro.

Para no interferir con los datos del monitor serial, se asigna mediante librerías otros puertos seriales, en este caso los pines digitales 8 y 9, además de la configuración de 9600 baudios.

### Caracterización

Se elige el Arduino Uno como microcontrolador para realizar la caracterización de los datos. Es un dispositivo sumamente versátil y muy sencillo de encontrar en el mercado por su bajo costo.

La caracterización se realiza con el fin de analizar los datos obtenidos con los sensores y enviar los datos correctos. Constantemente se están ejecutando las funciones de `readSensorPH` y `readSensorEc`. Para el pH, el sistema realiza un muestreo constante mediante un filtro de mediana de 10 muestras. Para la conductividad eléctrica se establece una medida de temperatura de 25 grados cuando no existe un sensor de temperatura [57].

Los datos finales obtenidos se envían a través del puerto serial asignado con las librerías, donde cada una de estas puede ser consultada mediante los comandos AT específicos, lo que permite que el dispositivo maestro los reciba para su posterior trabajo de datos. El código se encuentra almacenado en un repositorio público en la plataforma GitHub en <https://github.com/Tonyvossabes/Sistema-de-Monitoreo-Yahuarcocha> nombrado como `codesensores` que trabaja con las librerías `DFRobot_EC.cpp` y `DFRobot_EC.h`.

El funcionamiento del código se muestra en la Fig. 4.4.

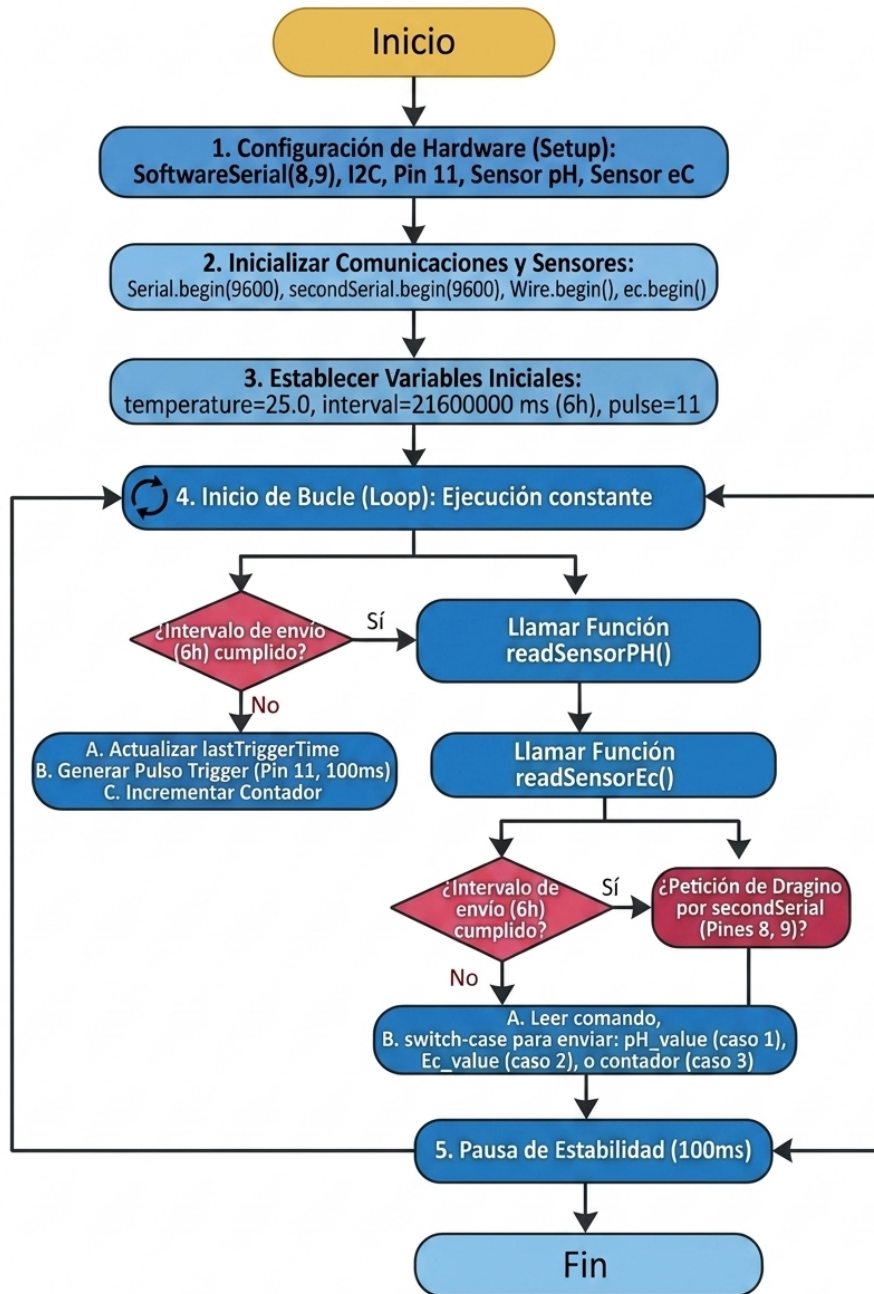


Fig. 4.4 Funcionamiento del código de caracterización de datos y respuestas.

## Configuración básica

El conversor RS485-LB permite al usuario configurar sus parámetros mediante Bluetooth con la aplicación móvil `Devices.tool` disponible para Android, en la Tabla 4.3 se muestran los comandos utilizados para la configuración de comunicación de maestro-esclavo.

Tabla 4.3: Comandos AT para comunicación.

Comando AT	
AT+COMMAND1=31, 0	AT+SEARCH1=0, 0
AT+DATA CUT1=10, 2, 1~10	AT+CMDDL1=0
AT+COMMAND2=32, 0	AT+SEARCH2=0, 0
AT+DATA CUT2=10, 2, 1~10	AT+CMDDL2=0
AT+COMMAND3=33, 0	AT+SEARCH3=0, 0
AT+DATA CUT3=10, 2, 1~10	AT+CMDDL3=0
AT+COMMAND4=34, 0	AT+SEARCH4=0, 0
AT+DATA CUT4=10, 2, 1~10	AT+CMDDL4=0

## Cambio de plan de frecuencias

El dispositivo adquirido maneja un plan de frecuencias de AU915 y se requiere la actualización de firmware a US915, para ello se necesita de un conector de TTL a USB como hardware y `TremoProgrammer` y `Dragino_Sensor_Manager_UTILITY` como software para la actualización. El proceso completo de cambio de firmware y los software necesarios se encuentran en el Anexo A.

Para culminar la debida actualización de firmware, se necesita configurar algunos parámetros por comandos AT, los cuales se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Comandos AT para configuración.

Comando AT
AT+DEUI=A8 40 41 B5 5C 5 68 62
AT+APPEUI=A8 40 41 00 00 00 01 01
AT+APPKEY=9C 91 D1 CD 3A 6E 95 F9 FF EF FE
AT+PASSWORD=123456
AT+INTMOD=2
AT+MOD=2
ATZ
AT+UUID=666666666666

El comando `AT+UUID` se debe colocar al final de toda la actualización para que el error `Invalid credentials` deje de aparecer y permita el funcionamiento de la antena del End-device.

## Sensores

Además, el sistema cuenta con el uso de los siguientes sensores encargados de medir los datos de la calidad del agua: pH y conductividad eléctrica; como se muestra en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Sensores implementados.

Sensor	Uso
SKU FIT0348	Medición de pH
SKU DFR0300	Medición de conductividad eléctrica

Los sensores implementados se detallan a continuación:

### Electrodo de pH industrial SKU FIT0348

Este electrodo combinado de pH, fabricado con una membrana de vidrio sensible con escasa impedancia, asegura mediciones exactas y confiables. Posee rasgos operativos superiores, como una estabilidad térmica importante y una velocidad de respuesta alta. Es un instrumento confiable con alta reproducibilidad, que resiste la degradación por hidrólisis y prácticamente elimina el error relacionado con las soluciones alcalinas. El voltaje de salida y el pH medido (0-14) guardan una relación lineal estricta [58]. Véase la Fig. 4.5.



Fig. 4.5 Sensor de pH SKU FIT0348.

### Medidor de conductividad eléctrica analógico SKU DFR0300

Está diseñado para controladores Arduino, garantizando una conexión y un funcionamiento intuitivos. Cuando se ha configurado de acuerdo con las instrucciones y empleando el software

adecuado [57]. Véase la Fig. 4.6.



Fig. 4.6 Sensor de conductividad eléctrica SKU DFR0300.

### Calibración de sensores

El proveedor del sensor SKU DFR0300 nos ofrece una tabla guía de datos que se deberían obtener al momento de calibrar su dispositivo, el cual cuenta con un método de dos puntos, en primero se realiza con una solución de  $1413 \mu s/cm$  mientras que para el segundo punto se toma de base una solución de  $12.88 ms/cm$ .

El sensor SKU FIT0348 funciona transformando la entrada analógica en valores de pH, el proveedor otorga una tabla con valores de referencia (véase la Tabla 4.6).

Tabla 4.6: Valores de los voltajes para el pH [58].

Voltaje (mV)	Valor en pH	Voltaje (mV)	Valor en pH
414.12	0.00	-414.12	14.00
354.96	1.00	-354.96	13.00
295.80	2.00	-295.80	12.00
236.64	3.00	-236.64	11.00
177.48	4.00	-177.48	10.00
118.32	5.00	-118.32	9.00
59.16	6.00	-59.16	8.00
0.00	7.00	0.00	7.00

### 4.1.2. Gateway

El DLOS8N es un Gateway LoRaWAN de código abierto que está hecho para ser utilizado al aire libre. Su función fundamental consiste en actuar como un puente, enlazando redes LoRa sin hilos con infraestructuras IP mediante diversas alternativas, tales como 3G, 4G, Ethernet o WiFi. El uso de la tecnología LoRa es crucial porque posibilita que los datos sean transmitidos a distancias muy largas, aun usando velocidades bajas [59].

#### Configuración

La configuración del Gateway correcta permite la emisión de datos mediante un ancho de banda en el que opera la red, estos valores o parámetros vienen dados por la zona geográfica y el fabricante, como se muestra en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Configuración del Gateway.

Parámetro	Configuración
Gateway EUI	A84041FFFF29DC52
Plan de frecuencia	United States 902-928 MHz
Plan de subfrecuencia	FSB 2

### 4.1.3. Conexión con el servidor propietario

The Things Stack de The Things Network se utiliza como servidor propietario esencial para recibir y transmitir variables desde un Gateway hasta un servidor puente posterior, esta plataforma contiene pestañas específicas para la administración y verificación de los dispositivos que se conectan a su plataforma.

The Things Stack funciona como un sistema completo para manejar redes LoRaWAN a nivel industrial. No solo unifica las funciones de Network y Application Server de acuerdo con los estándares oficiales, sino que también ofrece una infraestructura sólida creada para manejar dispositivos en ambientes productivos de manera segura y masiva [60].

#### End-Devices

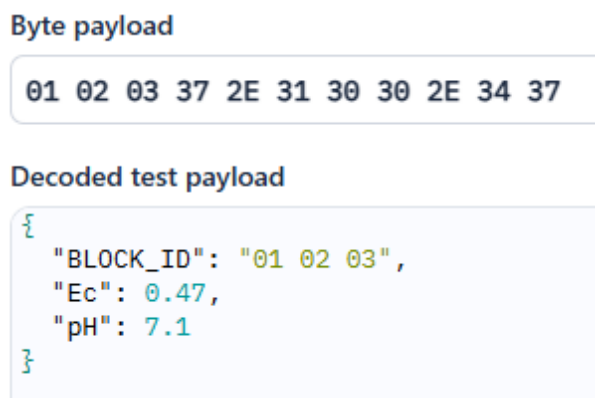
En esta sección, en el servidor propietario se introducen los nodos finales con los datos y configuraciones antes mencionadas en la Tabla 4.1.

## Gateway

El Gateway utilizado es el DLOS8N con la configuración mostrada en la Tabla 4.7.

## Payload

Una vez los datos son enviados por el End-device, en The Thing Stack se requiere decodificar los datos entregados, la plataforma espera valores ASCII. El código permite un bloque de información de 3 dígitos antes de tomar el primer valor para decodificarlo, este dato tiene una longitud de 4 caracteres debido a que las medidas de los sensores no superan esta distancia. La funcionalidad del código de decodificación del Payload se muestra en la Fig. 4.7.



The screenshot shows two sections. The first section, titled "Byte payload", contains a rounded rectangular box with the hexadecimal string "01 02 03 37 2E 31 30 30 2E 34 37". The second section, titled "Decoded test payload", contains a light blue box with a JSON object: {"BLOCK\_ID": "01 02 03", "Ec": 0.47, "pH": 7.1}.

Fig. 4.7 Payload decodificado.

## Webhook

En esta instancia se especifica la ruta a donde se envía los datos alojados en un servidor público con base de datos MySQL detallada a continuación en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Configuración del Webhook.

Parámetro	Configuración
Webhook ID	yahuarwebhook
Webhook format	JSON
Base URL	http://[2803:2540:17c:4000:ec28:2453:9a7d:ac20]/insert_Yhr.php
Request authentication	Autenticación Básica

### 4.1.4. Servidor puente

Se accede remotamente al servidor a través de REAL VNC, una máquina virtual con los requerimientos del proyecto de monitoreo mostrados en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Configuración del servidor puente.

Parámetro	Configuración
Nombre	xibernetiq-U55
Dirección	G6NEJ9-T6QzZ-QMtYxJ
Tipo	Instancia
Estado	Activa
Arquitectura	x84-64
Plataforma de CPU	Intel Broadwell
Versión	Ubuntu 20.04, Linux 5.15.0 U55

### 4.1.5. Apache

En la consola de la máquina virtual se instala el sistema operativo del servidor Apache como se muestra en la Fig. 4.8.

```
xibernetiq@xibernetiq-U55: ~
● apache2.service - The Apache HTTP Server
   Loaded: loaded (/lib/systemd/system/apache2.service; enabled; vendor prese
   Active: active (running) since Mon 2026-02-09 15:32:18 -05; 6h ago
     Docs: https://httpd.apache.org/docs/2.4/
   Main PID: 156089 (apache2)
    Tasks: 11 (limit: 9281)
   Memory: 7.2M
   CGroup: /system.slice/apache2.service
           └─156089 /usr/sbin/apache2 -k start
             └─156090 /usr/sbin/apache2 -k start
               └─156091 /usr/sbin/apache2 -k start
                 └─156092 /usr/sbin/apache2 -k start
                   └─156094 /usr/sbin/apache2 -k start
                     └─156095 /usr/sbin/apache2 -k start
                       └─156098 /usr/sbin/apache2 -k start
                         └─156101 /usr/sbin/apache2 -k start
                           └─156102 /usr/sbin/apache2 -k start
                             └─156117 /usr/sbin/apache2 -k start
                               └─156298 /usr/sbin/apache2 -k start

feb 09 15:32:18 xibernetiq-U55 systemd[1]: Starting The Apache HTTP Server...
feb 09 15:32:18 xibernetiq-U55 apachectl[156088]: AH00558: apache2: Could not r
feb 09 15:32:18 xibernetiq-U55 systemd[1]: Started The Apache HTTP Server.
log file: [ ]
xibernetiq@xibernetiq-U55: ~
```

Fig. 4.8 Configuración del servidor Apache.

### 4.1.6. PHP 8.0

La integración de Apache con el gestor PHP-FPM resulta fundamental para maximizar la eficiencia operativa del servidor. Esto garantiza una interacción estable y de alto desempeño entre las aplicaciones y el servidor Apache, esta configuración se verifica en la Fig. 4.9.

```
xibernetiq@xibernetiq-U55: ~  
● php8.0-fpm.service - The PHP 8.0 FastCGI Process Manager  
  Loaded: loaded (/lib/systemd/system/php8.0-fpm.service; enabled; vendor preset: enabled)  
  Active: active (running) since Mon 2026-02-02 16:06:14 -05; 1 weeks 0 days ago  
    Docs: man:php-fpm8.0(8)  
 Main PID: 882 (php-fpm8.0)  
  Status: "Processes active: 0, idle: 3, Requests: 22588, slow: 0, Traffic: 0req/sec"  
   Tasks: 4 (limit: 9281)  
  Memory: 30.4M  
  CGroup: /system.slice/php8.0-fpm.service  
          └─ 882 php-fpm: master process (/etc/php/8.0/fpm/php-fpm.conf)  
             └─ 93281 php-fpm: pool www  
                └─ 96624 php-fpm: pool www  
                   └─ 103159 php-fpm: pool www  
feb 02 16:06:12 xibernetiq-U55 systemd[1]: Starting The PHP 8.0 FastCGI Process Manager...  
feb 02 16:06:14 xibernetiq-U55 systemd[1]: Started The PHP 8.0 FastCGI Process Manager.  
--  
--  
--  
--
```

Fig. 4.9 Configuración de PHP 8.0.

Se necesita configurar el inicio de sesión en la base de datos, para esto se escribe un código en php que se encuentra detallado en un diagrama de bloques en la Fig. 4.10.

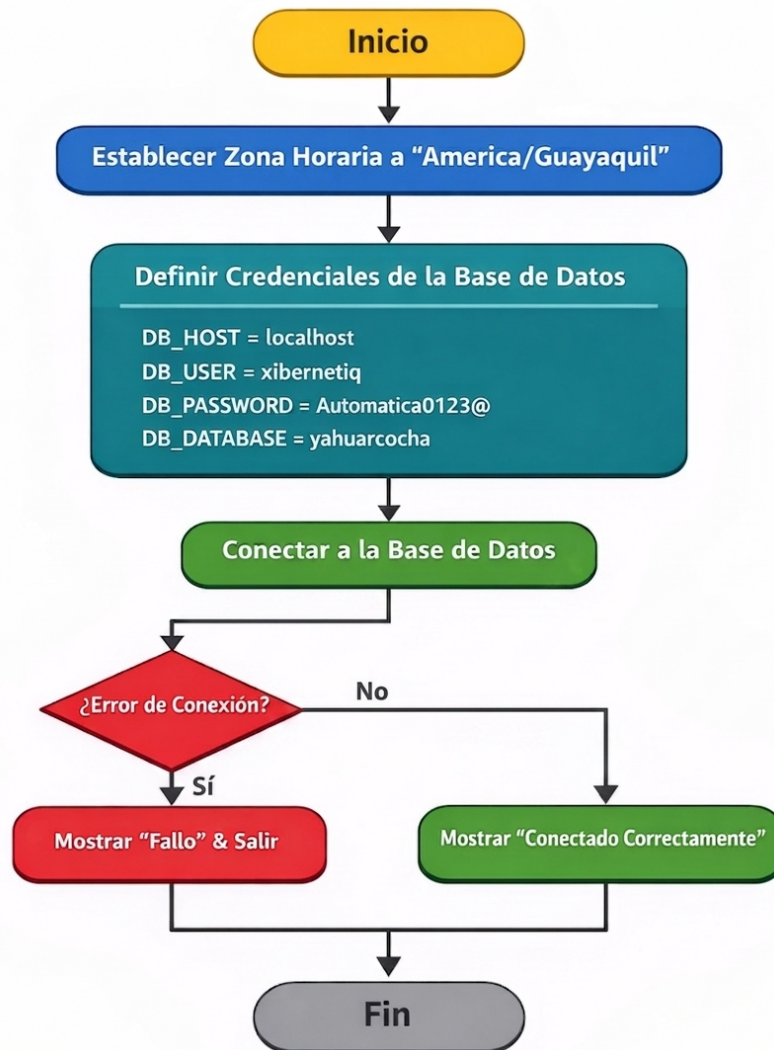


Fig. 4.10 Configuración de PHP para la conexión.

A través del protocolo estándar JSON, The Things Network transmite paquetes de información estructurada vía Internet. Para procesar este flujo, se emplea una herramienta de programación específica llamada `insert`, la cual se encarga de traducir el contenido codificado y gestionar su incorporación en el repositorio de datos correspondiente. Básicamente, este script analiza la estructura JSON, selecciona los parámetros de interés y asegura que se registren de forma organizada y confiable en la base de datos final, código que se muestra desglosado en diagrama de bloques en la Fig. 4.11.

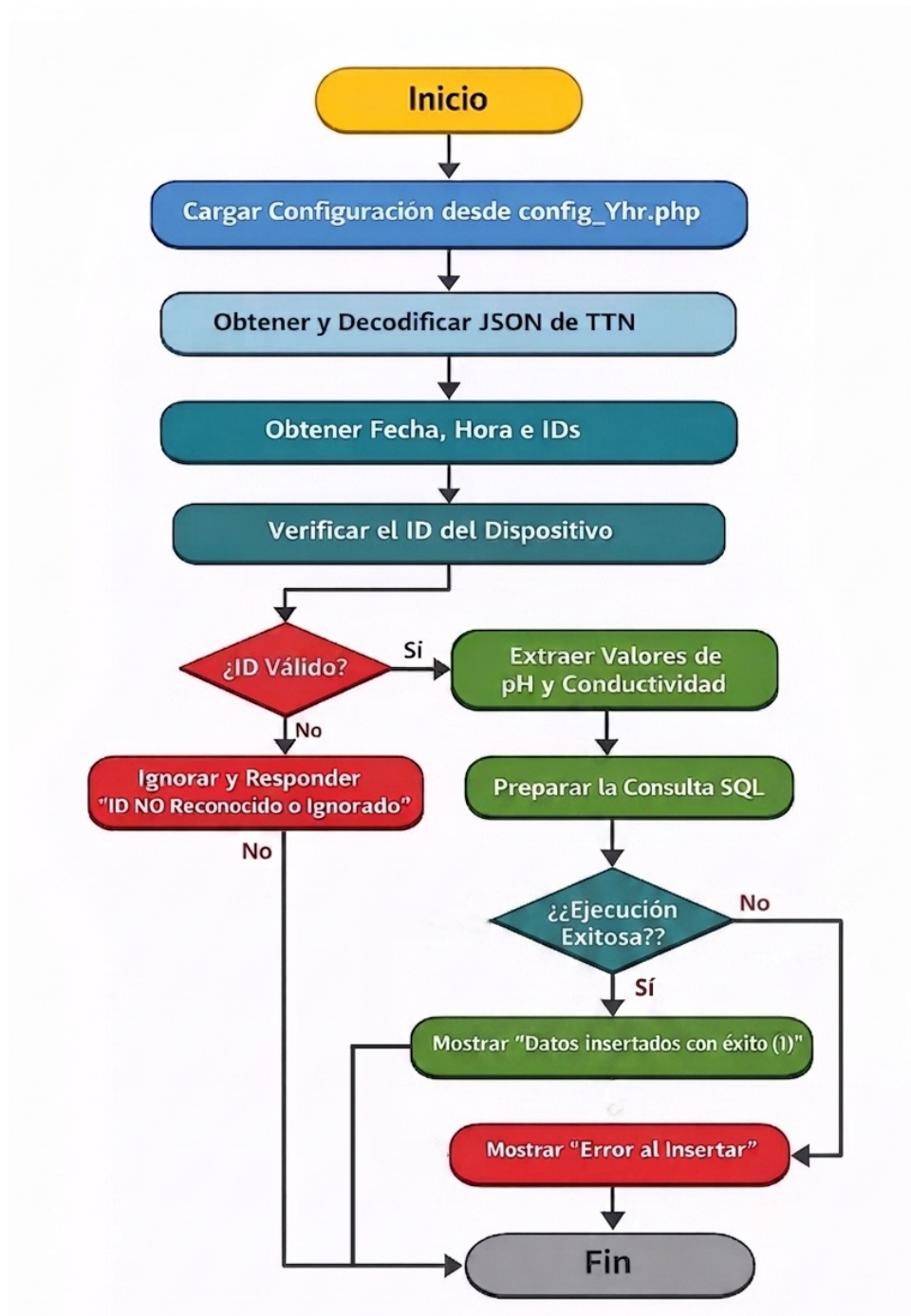


Fig. 4.11 Diagrama de bloques del Insert PHP.

#### 4.1.7. MySQL

Se instala la base de datos usando las líneas de comando. Luego se crea otra base de datos llamada "yahuarcocha" con una tabla con todos los campos necesarios para recibir los datos

que se almacenan de los sensores enviados por medio del End-device, código mostrado en la Fig. 4.12.

```
1 CREATE TABLE "yahuarcocha" (  
2     "id"    INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,  
3     "device_id" TEXT,  
4     "pH"   REAL,  
5     "Ec"   REAL,  
6     "BatV" REAL  
7 );
```

Fig. 4.12 SQL script.

#### 4.1.8. Base de datos en tiempo real

Para poder mejorar la capacidad de respuesta en el seguimiento ambiental, es esencial trasladar la información a una base de datos que se actualice instantáneamente, como Firebase. Esta transición es esencial para conseguir una representación gráfica precisa y dinámica de los parámetros adquiridos. La integración se realizará a través de la creación de scripts en Python los cuales funcionarán como el vínculo principal para procesar y sincronizar automáticamente los datos en la nube. El código se encuentra en Github en el apartado `sinc_Yhr`.

La arquitectura en Firebase Realtime Database se basa en la organización de un nodo central, que ha sido creado para almacenar de manera específica los parámetros esenciales del seguimiento ambiental. Esta entidad digital se sincroniza de forma inmediata cada vez que recibe información desde los nodos sensores, asegurando así un flujo de datos constante y automatizado.

La máquina virtual, en la que se lleva a cabo la lógica principal, es el elemento fundamental del sistema. A través de la utilización de Python y su conjunto de bibliotecas especializadas, se conecta con una base de datos remota. Para esto, se emplea el DNS que Firebase asigna como punto de acceso para gestionar la información. Este componente se encarga de gestionar la interconectividad entre las bases de datos, extrayendo selectivamente la información producida por los dispositivos desde MySQL. Se asegura que solo la información más relevante se transfiera a Firebase al eliminar automáticamente los registros obsoletos. No solo organiza la información esta transición, sino que también permite su consumo y manipulación en un ambiente de acceso simplificado. Este flujo de datos se detalla en la Fig. 4.13.

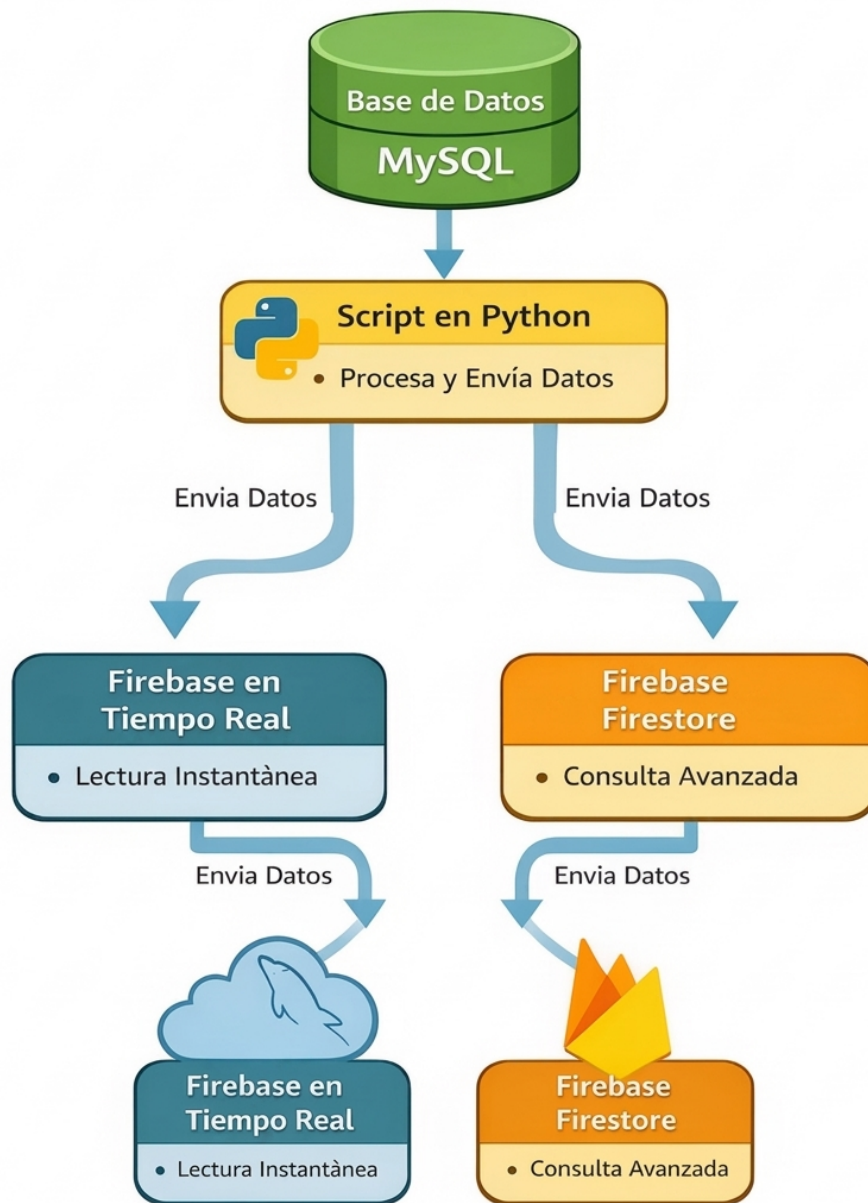


Fig. 4.13 Flujo de datos.

## 4.2. Interfaz de usuario

### 4.2.1. Interfaz

Tkinter es una biblioteca de Python para realizar interfaces gráficas de usuario (GUI) como se muestra en la Fig. 4.14.



Fig. 4.14 Interfaz de usuario.

Esta biblioteca permite crear una ventana con botones que permitan el acceso a las gráficas de datos de las variables medidas mientras que a la par corre el programa que recibe datos de Firebase. El script de python se encuentra en el link de Github catalogado como `Interfaz_Yhr` y su funcionalidad se explica en la Fig. 4.15.

El código toma los últimos 40 registros de la base de datos y reajusta los límites en el eje *y* para una mejor visualización de los cambios en los valores. Cada 15 segundos vuelve a consultar el último valor registrado de la base de datos y actualiza la tabla.

La interfaz permite el análisis individual de cada dato y también incorpora un botón para el análisis conjunto, además se muestra en un label separado el último valor recogido, el pico máximo y el promedio de los datos recopilados.

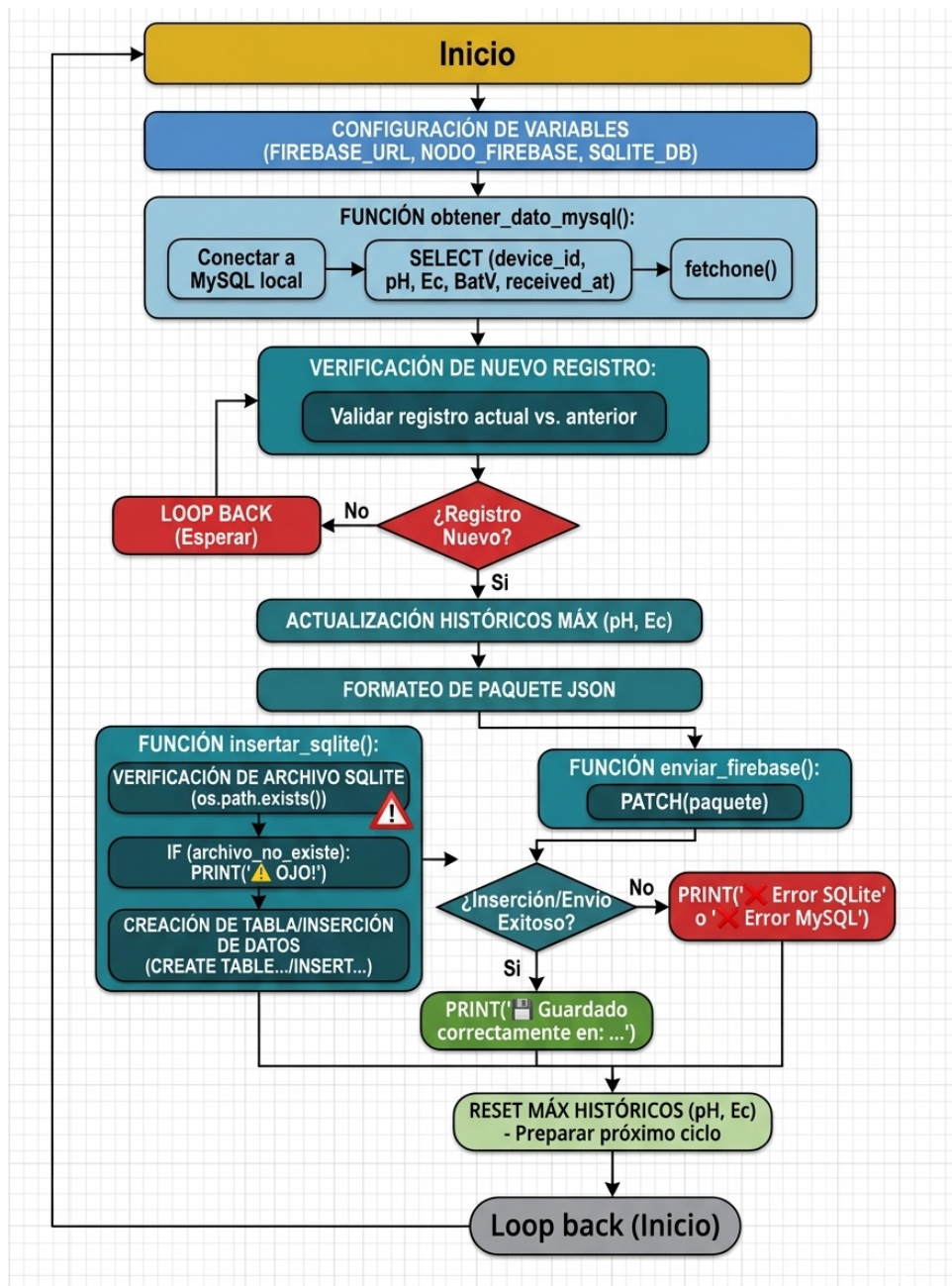


Fig. 4.15 Funcionalidad el código de recepción de datos para las gráficas.

## 4.3. Pruebas de funcionamiento

### 4.3.1. Calibración de los sensores en el campo

#### Sensor de conductividad eléctrica SKU DFR0300.

Los datos de referencia del primer punto se muestran en la Fig. 4.16, los datos obtenidos en la calibración del primer punto se muestran en la Fig. 4.17.

Datos de muestra para la calibración de sensor SKU DFR0300 (primer punto).

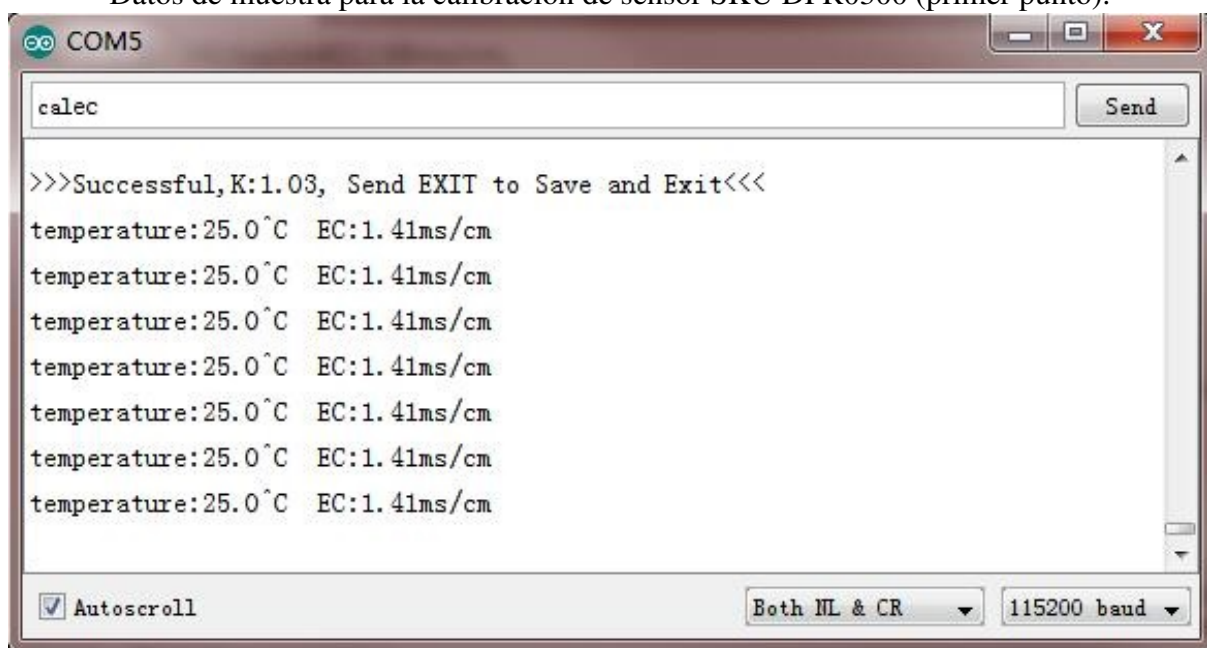


Fig. 4.16 Datos de referencia de calibración de sensor de conductividad eléctrica.

Datos obtenidos en la calibración de sensor SKU DFR0300 (primer punto).

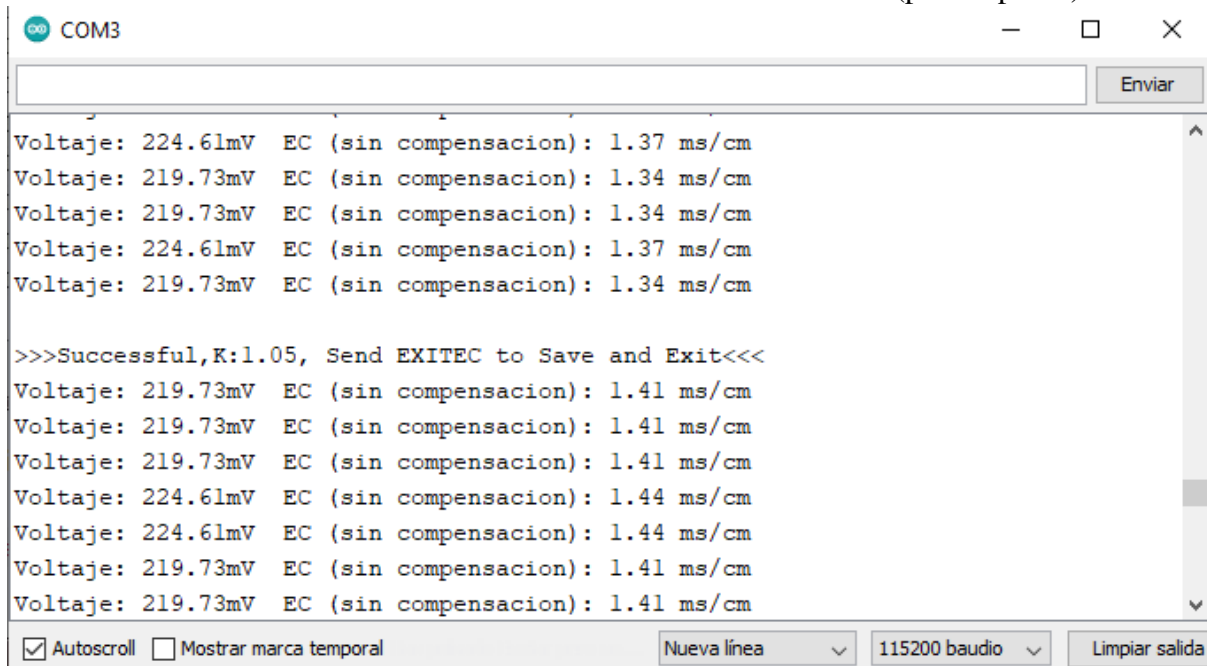


Fig. 4.17 Datos obtenidos en la calibración de sensor de conductividad eléctrica.

La calibración del primer punto reflejaba un pequeño desbalance corregido luego con los comandos preestablecidos para la calibración otorgados por el proveedor, indicados en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10: Comandos de calibración de sensores.

Comando	Función
enterec	Ingresa al modo de calibración
calec	Inicia la calibración
exitec	Guarda los parámetros relevantes y sale del modo de calibración

Los datos de referencia del segundo punto se muestran en la Fig.4.18, los datos obtenidos en la calibración del segundo punto se muestran en la Fig. 4.20.

Datos de muestra para la calibración de sensor SKU DFR0300 (segundo punto).

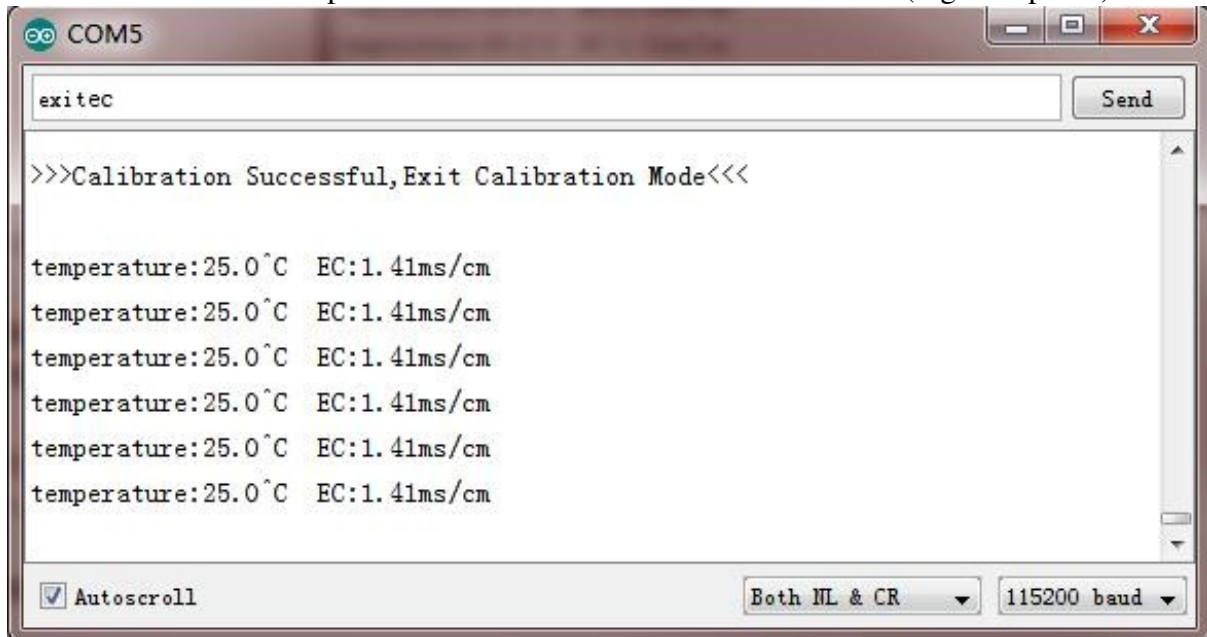


Fig. 4.18 Datos de referencia de calibración de sensor de conductividad eléctrica.

Datos obtenidos en la calibración de sensor SKU DFR0300 (segundo punto).

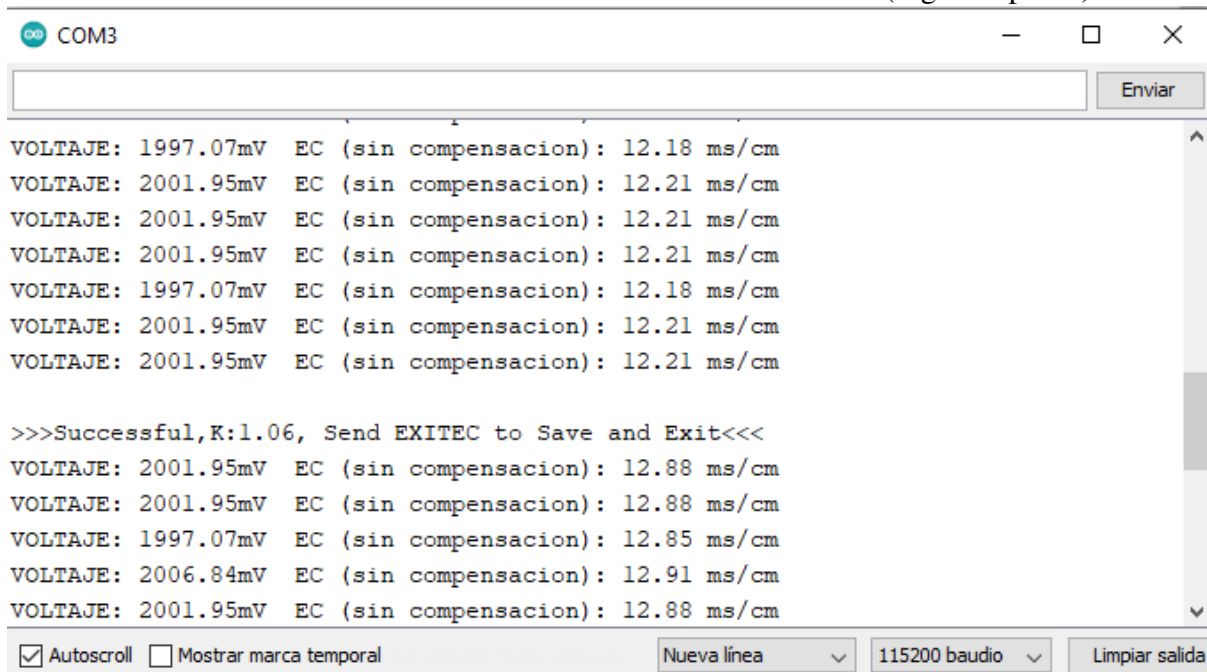


Fig. 4.19 Datos obtenidos en la calibración de sensor de conductividad eléctrica.

### Sensor SKU FIT0348

Este sensor funciona transformando la entrada analógica en valores de pH, el proveedor nos otorga una tabla con valores de referencia (ver Tabla 4.6), sin embargo, para la confirmación de los datos correctos, se realiza la medición mediante tiras de pH por color como se muestra en la Fig. 4.20.



Fig. 4.20 Datos obtenidos en la medición de calibración con tiras de pH por color

La tira de medición muestra un valor similar a 7, con la escala de precisión de las tiras compradas, una vez realizada la conexión del sensor de pH, se toma las medidas mostradas en la Fig.4.21.

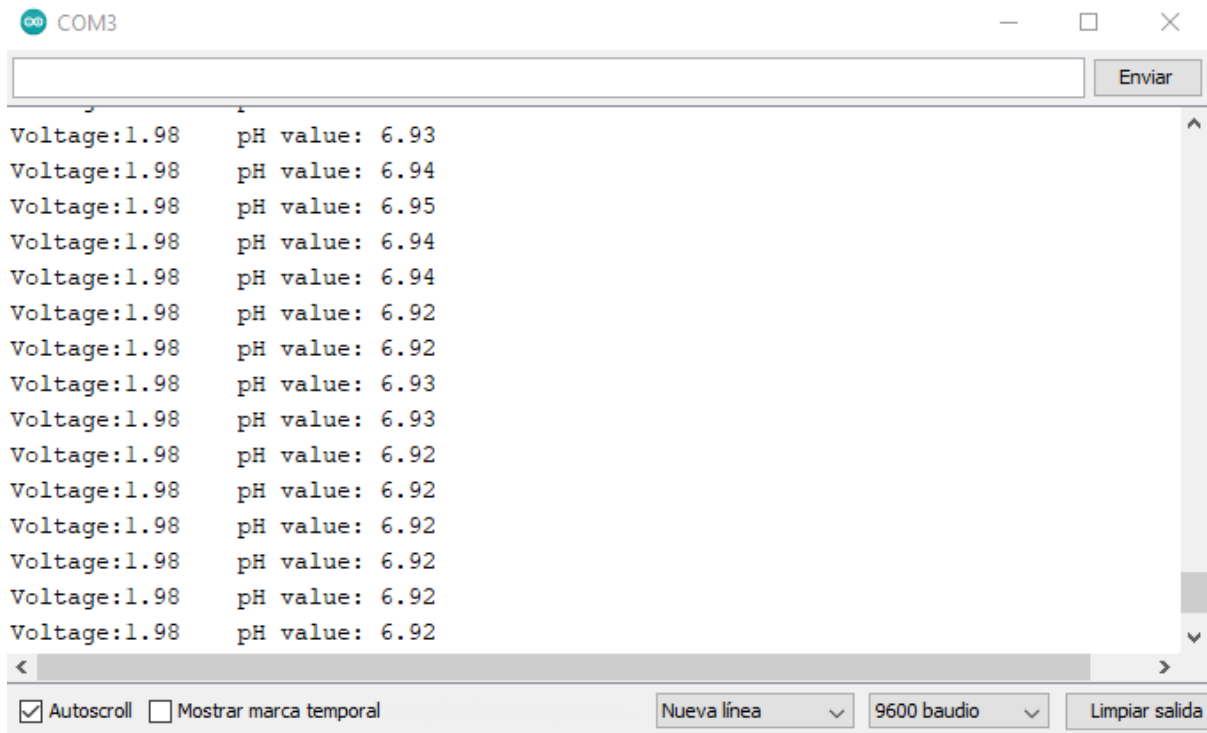


Fig. 4.21 Datos obtenidos en la medición de calibración de pH.

### 4.3.2. Recepción de datos en TTN

El convertor RS485-LB se conecta a TTN enviando 3 datos de información en BLOCK\_ID y luego los datos de Ec y pH en ese orden como se puede verificar en la Fig. 4.22.

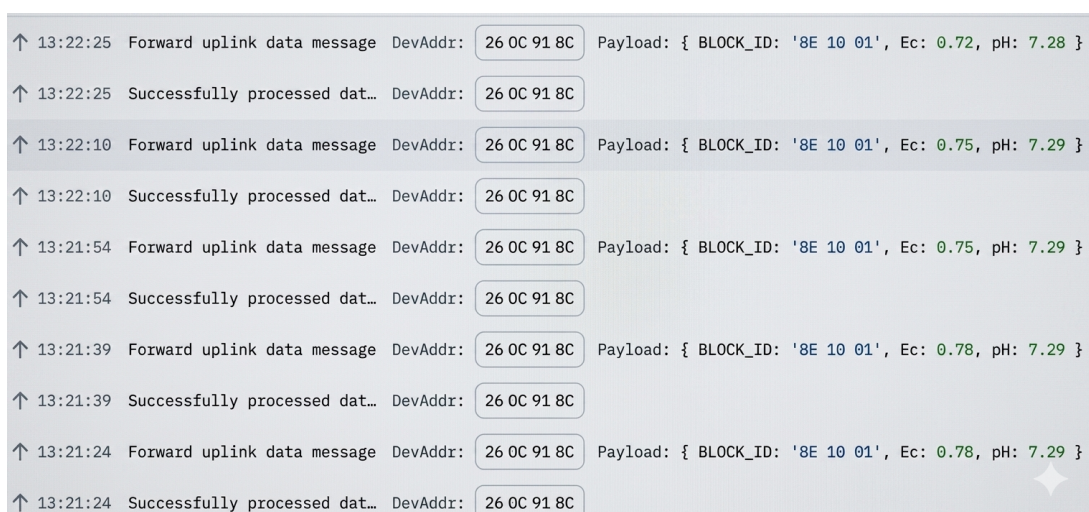
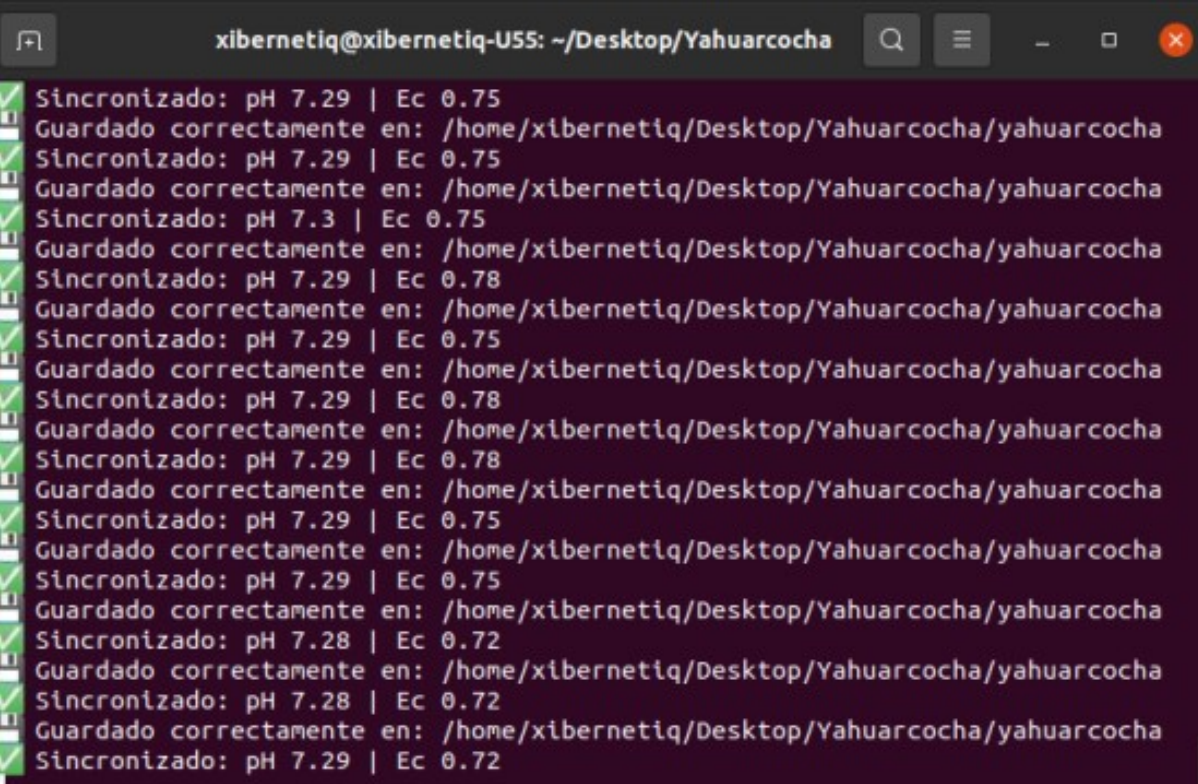


Fig. 4.22 Payload con datos.

### 4.3.3. Envío de datos al servidor puente

Los datos recibidos por el servidor puente son enviados automáticamente mediante webhooks a una IP pública, esta pieza funciona como un buffer intermedio, cuya responsabilidad es recibir y almacenar la información de manera temporal. Después, un script hecho en Python se encarga de procesar y reenviar esta información a la base de datos Firebase Realtime Database. Esta integración posibilita una administración de datos más centralizada y rápida, lo que hace más fácil su visualización y consumo en tiempo real. En la Fig. 4.23 se puede observar como los datos fueron enviados y almacenados en el servidor puente. Como el servidor se encuentra en un VNC server se puede realizar cualquier configuración desde cualquier dispositivo que tenga la cuenta propietaria del servidor mencionado.



```
xibernetiq@xibernetiq-U55: ~/Desktop/Yahuarcocha
✓ Sincronizado: pH 7.29 | Ec 0.75
✓ Guardado correctamente en: /home/xibernetiq/Desktop/Yahuarcocha/yahuarcocha
✓ Sincronizado: pH 7.29 | Ec 0.75
✓ Guardado correctamente en: /home/xibernetiq/Desktop/Yahuarcocha/yahuarcocha
✓ Sincronizado: pH 7.3 | Ec 0.75
✓ Guardado correctamente en: /home/xibernetiq/Desktop/Yahuarcocha/yahuarcocha
✓ Sincronizado: pH 7.29 | Ec 0.78
✓ Guardado correctamente en: /home/xibernetiq/Desktop/Yahuarcocha/yahuarcocha
✓ Sincronizado: pH 7.29 | Ec 0.75
✓ Guardado correctamente en: /home/xibernetiq/Desktop/Yahuarcocha/yahuarcocha
✓ Sincronizado: pH 7.29 | Ec 0.78
✓ Guardado correctamente en: /home/xibernetiq/Desktop/Yahuarcocha/yahuarcocha
✓ Sincronizado: pH 7.29 | Ec 0.78
✓ Guardado correctamente en: /home/xibernetiq/Desktop/Yahuarcocha/yahuarcocha
✓ Sincronizado: pH 7.29 | Ec 0.75
✓ Guardado correctamente en: /home/xibernetiq/Desktop/Yahuarcocha/yahuarcocha
✓ Sincronizado: pH 7.29 | Ec 0.75
✓ Guardado correctamente en: /home/xibernetiq/Desktop/Yahuarcocha/yahuarcocha
✓ Sincronizado: pH 7.28 | Ec 0.72
✓ Guardado correctamente en: /home/xibernetiq/Desktop/Yahuarcocha/yahuarcocha
✓ Sincronizado: pH 7.28 | Ec 0.72
✓ Guardado correctamente en: /home/xibernetiq/Desktop/Yahuarcocha/yahuarcocha
✓ Sincronizado: pH 7.29 | Ec 0.72
```

Fig. 4.23 Datos almacenados y enviados.

### 4.3.4. Visualización de los datos

En el servidor se ejecuta el script de python que toma los datos desde SQLite y genera una tabla para la visualización de los datos de cada afluente tomada. El servidor se encuentra activo

todo el tiempo por lo cual permite el registro de datos y el acceso a estos en cualquier momento.

En la Fig.4.24 se presentan los datos unidos de la acequia El Quince, para una visualización individual se presentan las gráficas en el Anexo B.

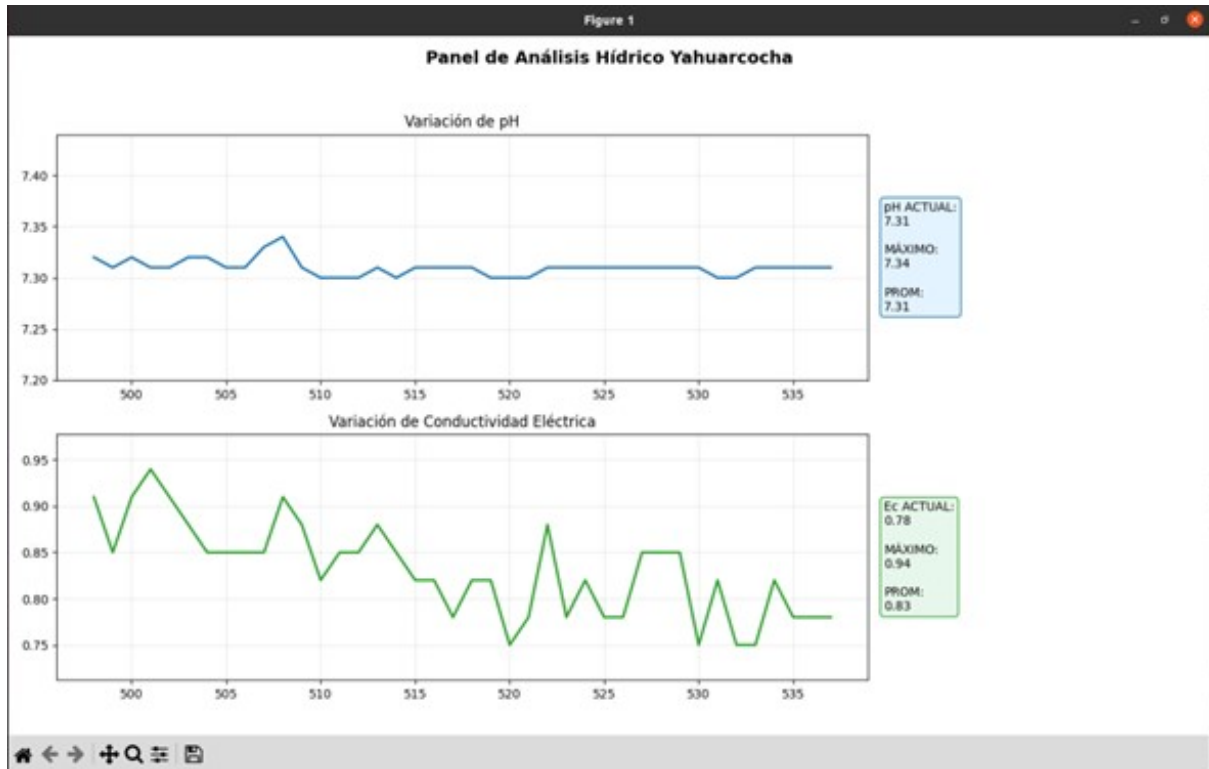


Fig. 4.24 Datos unificados de la acequia El Quince.

En la Fig. 4.25 se muestran los datos conjuntos de la afluyente Polo Golo, para una visualización individual se presentan las gráficas en el Anexo C.

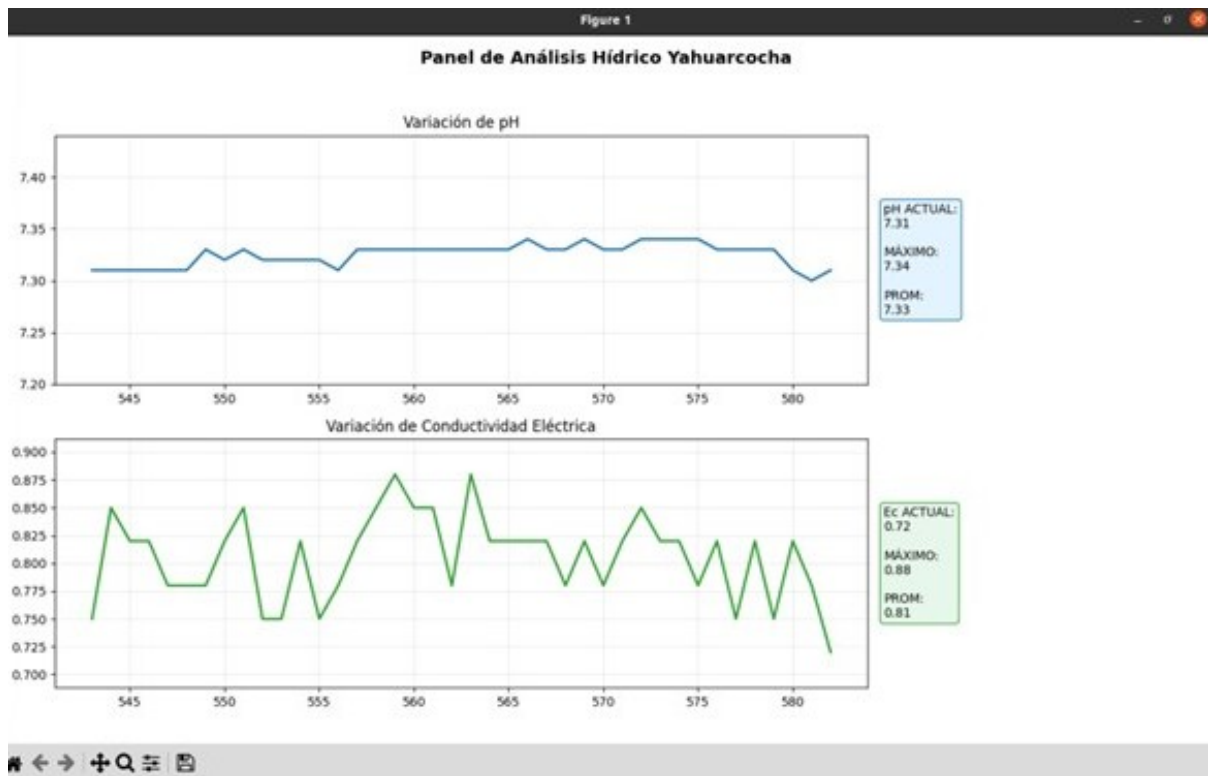


Fig. 4.25 Datos unificados de la afluente Polo Golo.

En la Fig. 4.26 se plasman los datos conjuntos de la afluente Manzana-Huaico, para una visualización individual se presentan las gráficas en el Anexo D.

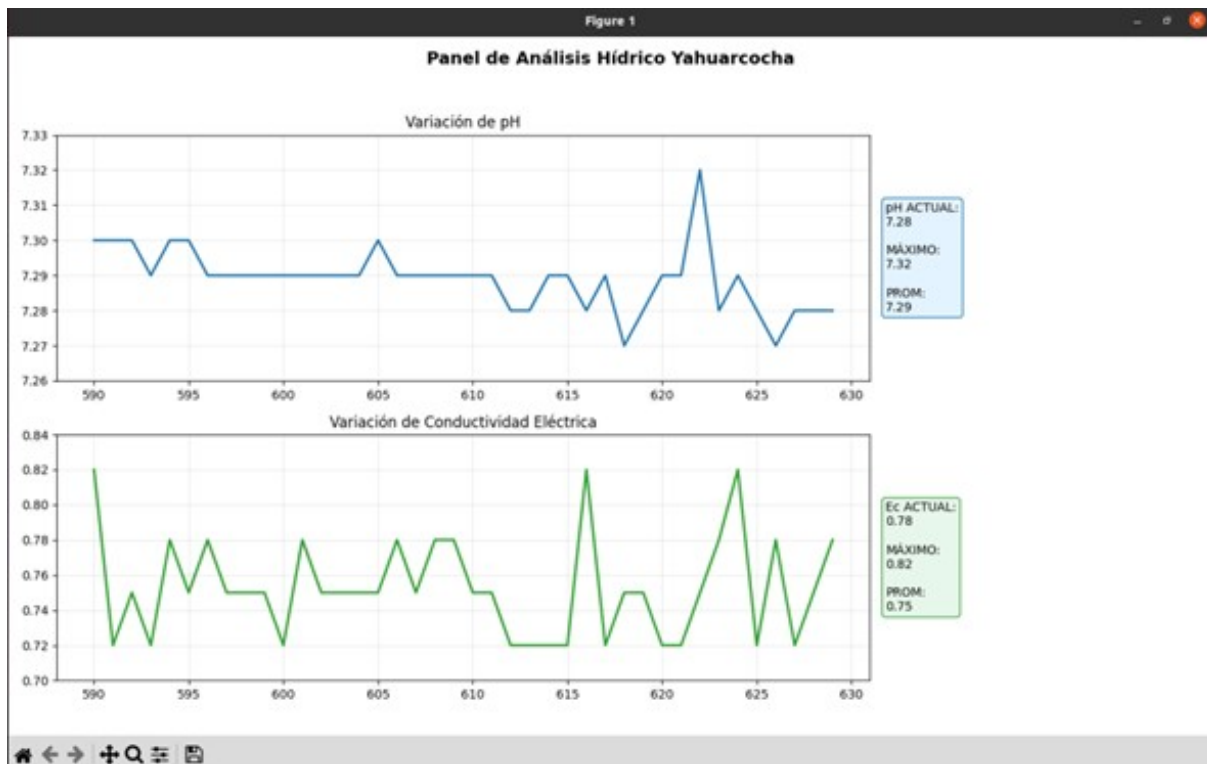


Fig. 4.26 Datos unificados de la afluente Manzana-Huaico.

El sistema es capaz de detectar cambios ambientales sutiles, validando su uso como una herramienta de alerta temprana para la gestión municipal de Ibarra.

#### 4.4. Validación de los datos

El municipio de la ciudad de Ibarra realiza mediciones in situ programadas cada semana de los valores de cada afluente, en la Tabla 4.11 se muestran los datos obtenidos de las mediciones de junio y julio de 2025.

Tabla 4.11: Datos in situ [61].

Junio												
Variable	Acequia El Quince				Polo Golo				Manzana-Huaico			
Fecha	6	13	20	27	6	13	20	27	6	13	20	27
Ec $mS/cm$	0.68	0.68	0.66	0.7	0.65	0.66	0.64	0.71	0.7	0.7	0.64	0.61
pH	8.12	8.06	7.95	8.05	8.03	7.88	7.82	7.84	7.99	8.19	8.14	8

Julio												
Variable	Acequia El Quince				Polo Golo				Manzana-Huaico			
Fecha	4	11	18	25	4	11	18	25	4	11	18	25
Ec $mS/cm$	1.1	0.75	0.71	0.68	s/c	s/c	s/c	s/c	0.67	0.6	s/c	s/c
pH	8.08	8.01	8.11	8.12	s/c	s/c	s/c	s/c	8.12	8.16	s/c	s/c

Elaboración propia con base a los datos físico-químicos.

Los valores registrados de cada afluente in situ se comparan con los valores medios obtenidos por el sistema de monitoreo en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12: Comparativa de datos.

Valor	Promedio datos in situ		Promedio datos sistema de monitoreo	
Dato físico-químico	pH	Ec $mS/cm$	pH	Ec $mS/cm$
Acequia El Quince	8.06	0.75	7.31	0.83
Polo Golo	7.89	0.67	7.33	0.81
Manzana-Huaico	8.10	0.65	7.29	0.75

En comparación con los datos de 2025, se observa una conducta inversa entre la conductividad eléctrica y el potencial de hidrógeno. La conductividad aumentó un 24.6 % mientras que el pH disminuyó un 9.3 %.

#### 4.4.1. Análisis de error

Los datos obtenidos en el período junio-julio del año 2025 fueron realizados con equipos de laboratorio de mano cada semana. Los datos obtenidos por el sistema de monitoreo son tomados continuamente y se puede programar su envío para que se haga cada segundos, minutos u horas permitiendo así el análisis de picos en las mediciones.

En la etapa de recolección de datos, se detectaron intervenciones humanas en los ríos que desembocan en la laguna; en particular, trabajos de reparación de estructuras hídricas (ver Anexo E). La creación de embalses temporales y la presencia de materiales para la construcción

como cemento y agregados que modificaron el curso natural del agua. La elevación de la conductividad eléctrica, por el aporte de sólidos disueltos de los materiales de obra, y la reducción del pH, a causa de la acumulación del agua y la liberación de ácidos orgánicos del lecho removido, son explicados por estos factores externos.

## 4.5. Efectividad en la red de transmisión

Durante las pruebas de cobertura, se identificó que la topografía limitaba el alcance del Gateway principal hacia los afluentes debido a que se encuentra a más de 2 km de distancia. En la Fig. 4.27 se detalla la distancia y los puntos importantes como la localización de los puntos de muestreo, la estación de transmisión final y temporal. Se puso en funcionamiento una estación receptora intermedia como solución de ingeniería durante la fase de validación. Este descubrimiento es crucial porque habilita la sugerencia de instalar en el sector La Dolorosa del Priorato un nodo repetidor o un segundo Gateway para implementaciones futuras.

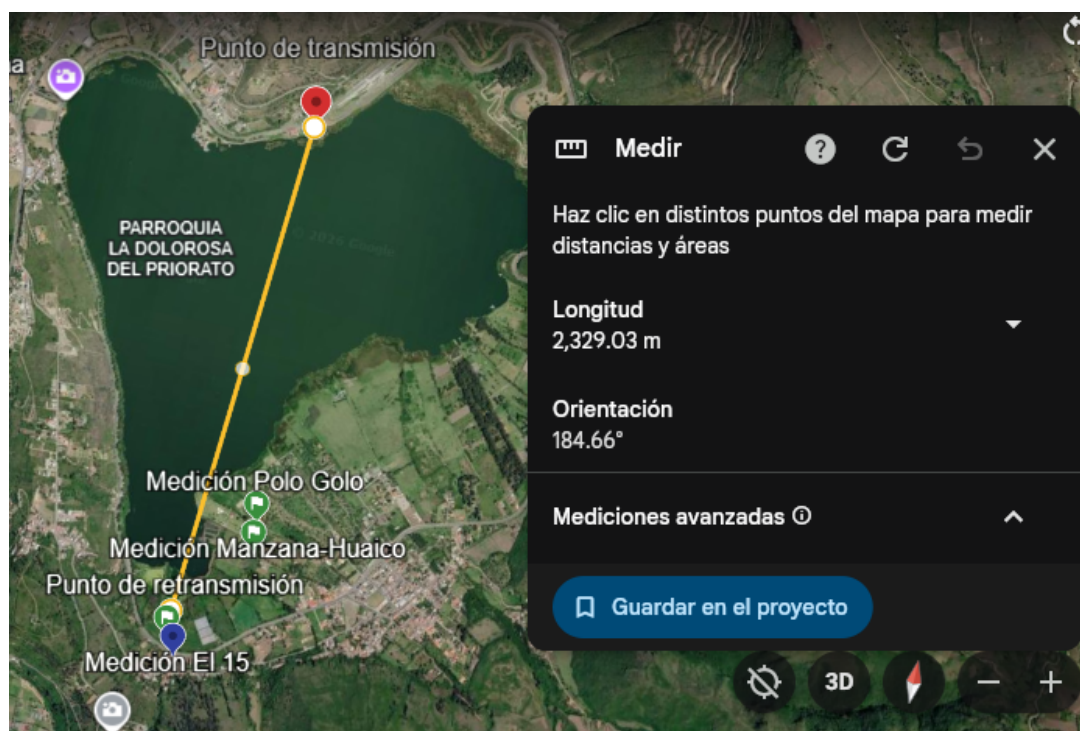


Fig. 4.27 Puntos de referencia de toma de datos.

### 4.5.1. Análisis de intensidad y calidad de señal

Los niveles de señal registrados fueron distintos para cada afluente medida. El RSSI (Indicador de fuerza de señal) y el SNR (relación señal-ruido) de las mediciones enviadas desde la acequia El Quince se muestran en la Fig. 4.28.

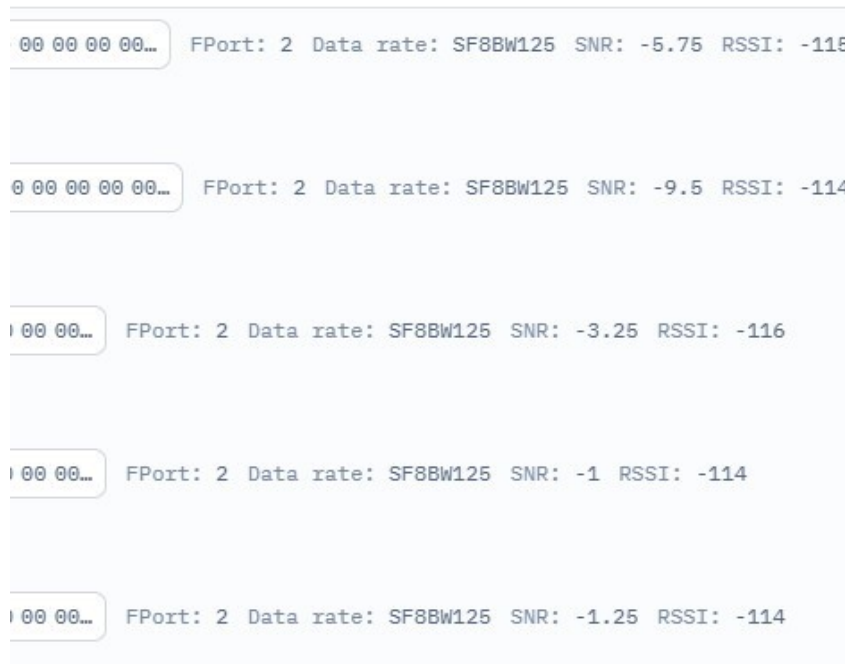


Fig. 4.28 Intensidad y calidad de señal de la acequia El Quince.

EL RSSI y SNR de la afluente Polo Golo se muestra en la Fig. 4.29.

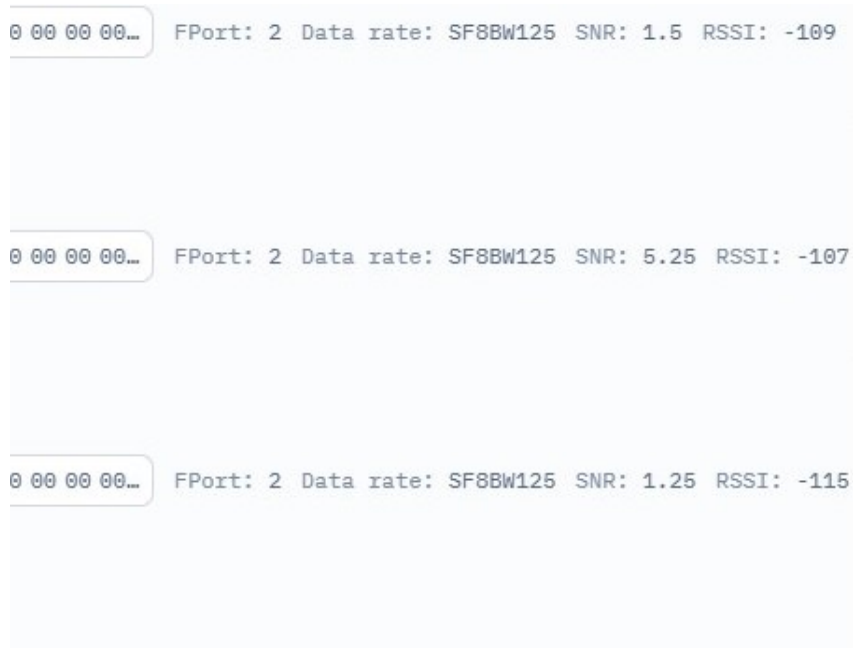


Fig. 4.29 Intensidad y calidad de señal de la afluyente Polo Golo.

El RSSI y SNR de la afluyente Manzana-Huaico se muestra en la Fig. 4.30.

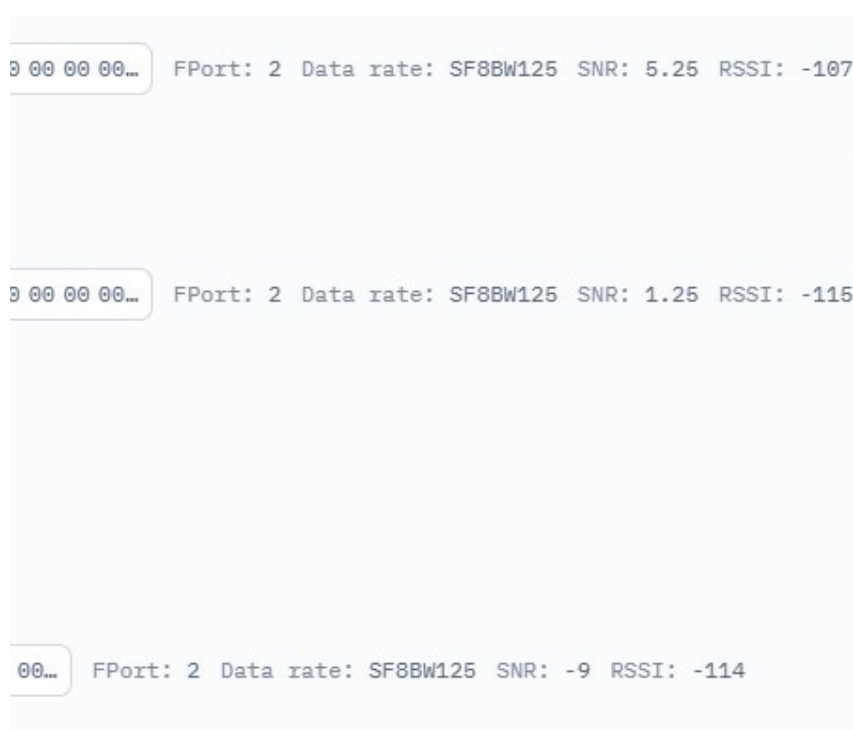


Fig. 4.30 Intensidad y calidad de señal de la afluyente Manzana-Huaico.

Los valores para todas las afluentes de RSSI oscilan entre  $-107$  y  $-115$   $dBm$ . Pese a que en otras tecnologías se podrían considerar reducidos estos valores, en LoRaWAN son suficientes para mantener una comunicación estable gracias a su elevada sensibilidad de recepción.

La variación del SNR entre  $-9.5$   $dB$  y  $5.25$   $dB$  quedó reflejada en el análisis de la calidad del enlace. La existencia de valores negativos respalda la fortaleza del protocolo LoRaWAN para operar con el umbral de ruido en situaciones topográficas desfavorables, mientras que los valores mínimos próximos a  $-10$   $dB$  explican la instalación temporal del Gateway donde se indicó.

#### 4.5.2. Gestión energética

El convertor Dragino RS485-LB operó con una eficiencia energética de grado industrial, donde su batería interna no representa un limitante para la frecuencia de muestreo.

El sistema implementado consta de los dispositivos mostrados en la Fig. 4.31.

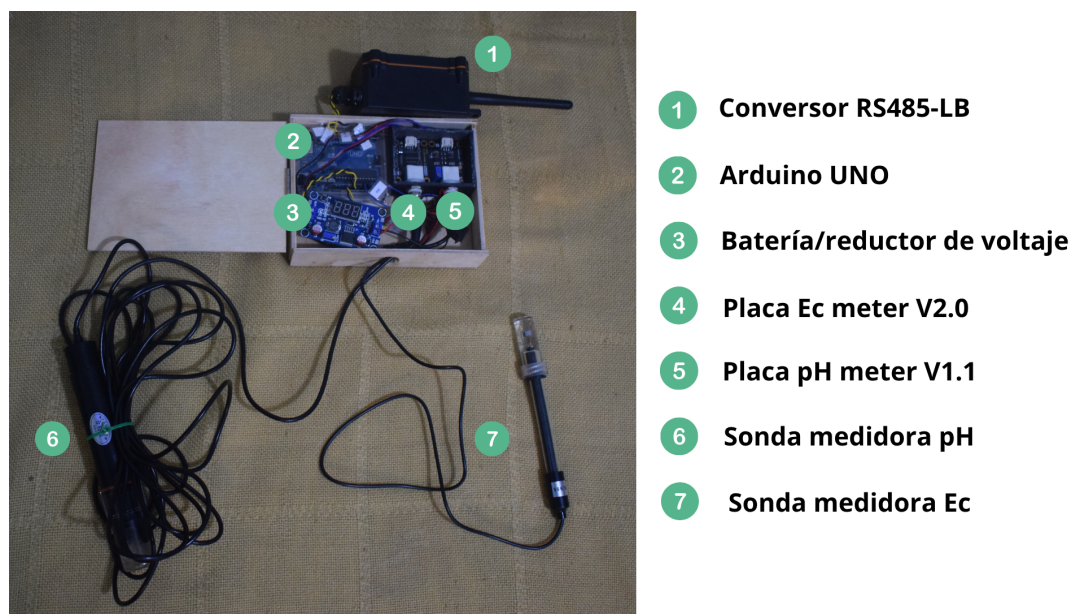


Fig. 4.31 Dispositivos del sistema de monitoreo.

Los sensores permanecen activos constantemente, generando un consumo energético significativo, limitando su autonomía a casi 9,4 horas de monitoreo continuo cuando el sistema está alimentado con una batería de 9V a 1000  $mAh$ . El consumo detallado se encuentra en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13: Consumo energético individual.

<b>Componente</b>	<b>Estado</b>	<b>Consumo (<math>mA</math>)</b>
Arduino Uno	Siempre encendido	0.45
Sensor pH (DFR0300)	Siempre encendido	0.10
Sensor EC (FIT0348)	Siempre encendido	0.30
Total	Carga constante	0.85

Se establecen 2 configuraciones de red: de campo que envía cada 6 horas y de pruebas que envía cada 15 segundos. El consumo se muestra en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14: Consumo energético individual.

<b>Componente</b>	<b>Estado</b>	<b>Consumo (<math>mA</math>)</b>
Frecuencia de envío	Consumo promedio $mA$	Autonomía estimada ( $h$ )
Cada 15 segundos	92.0	8.7
Cada 6 horas	85.0	9.4

La escasa diferencia en la autonomía de 42 minutos entre un muestreo de baja frecuencia y otro de alta frecuencia demuestra que el consumo es mayormente estático. Esto confirma que la red LoRaWAN es muy eficaz; sin embargo, el hardware de sensado necesita una fase de manejo de potencia o Deep Sleep para usos prolongados.

# Capítulo V

## Conclusiones, recomendaciones y trabajo a futuro

### 5.1. Conclusiones

Se determinó que el sistema de monitoreo ambiental basado en tecnología LoRaWAN logró con éxito la meta de documentar y comunicar los parámetros más importantes de los afluentes de la Laguna de Yahuarcocha. La implementación de una arquitectura de sensores distribuidos hizo posible que se superaran las restricciones de los muestreos manuales tradicionales, al ofrecer una red para la adquisición de datos con alta resolución temporal y capacidad para penetrar en áreas topográficas difíciles. La validación del sistema evidenció que es factible mantener un monitoreo continuo de la conductividad eléctrica y del pH, detectando alteraciones en la calidad del agua causadas por factores externos a tiempo. Esto establece esta solución tecnológica como una herramienta eficaz y viable para el manejo y conservación de los ecosistemas lacustres.

Gracias a la revisión de campo y bibliográfica, se pudo determinar que los afluentes Acequia El 15, Polo Golo y Manzana-Huaico tienen una dinámica físico-química muy sensible a la intervención humana. Se demostró que, a pesar de que existen mediciones municipales in situ, el empleo de tecnología LoRaWAN es la mejor solución para cubrir los terrenos de la cuenca, asegurando una presencia de señal mayor que los métodos convencionales en ambientes naturales.

Se creó un sistema para recolectar datos que incorpora el convertidor Dragino RS485-LB y sensores de tipo industrial. A pesar de que el protocolo LoRaWAN mostró un consumo mínimo, el estudio energético expuso que el hardware de sensado de pH y Ec funciona con una carga

invariable de 85.0 *mA*, lo cual permitió establecer que la autonomía del nodo está restringida por el gasto estático de los sensores y no por cuántas veces se envían los paquetes de datos.

En los puntos críticos de Yahuarcocha, la validación del sistema reveló que, en el tiempo de monitoreo, la conductividad eléctrica aumentó en un 24.6 % y que el pH se redujo en un 9.3 %. Estos hallazgos confirmaron que el sistema distribuido es eficaz, ya que detectó variaciones provocadas por obras de infraestructura como la reparación de estructuras hídricas que los muestreos manuales semanales no habrían podido reflejar de una manera precisa y e tiempo real.

## **5.2. Recomendaciones**

Para lograr la distancia de cobertura en el área y garantizar que se reciban todos los paquetes desde los afluentes más lejanos, se recomienda colocar el Gateway a una altura más elevada o utilizar un nodo repetidor en el sector La Dolorosa del Priorato.

El empleo de circuitos para la gestión de potencia o Sleep Mode, que desconecten los sensores de pH y Ec entre cada periodo de muestreo, es esencial para futuras implementaciones. Esto posibilitaría disminuir el consumo de los actuales 85 *mA* a niveles de microamperios, lo que alargaría la autonomía de horas a varios meses.

Se recomienda crear un protocolo mensual de limpieza para las sondas de los sensores, ya que la biopelícula y los sedimentos que se acumulan en los afluentes de la laguna pueden alterar la exactitud de las lecturas eléctricas en términos de conductividad a largo plazo.

## **5.3. Trabajo a futuro**

Incorporar paneles solares fotovoltaicos en cada nodo de monitoreo con el fin de suprimir la dependencia de baterías que tienen una duración corta y posibilitar un despliegue constante en campo.

Ampliar la red para evaluar indicadores como el nivel de caudal, la turbidez y los nitratos, lo que posibilitará un examen más detallado de la eutrofización de la laguna.

Crear un panel de control en tiempo real que, a través de algoritmos de detección de picos, emita alertas automáticas a las autoridades municipales de Ibarra si se identifican vertidos contaminantes o irregularidades en los afluentes.

# Bibliografía

- [1] D. E. Norte, “Yahuarcocha: más allá de una posición política,” 11 2022.
- [2] E. Comercio, “La laguna de yahuarcocha presenta un deterioro de la calidad del agua; un plan de conservación de lagos se aplicará,” 12 2020.
- [3] A. y. P. M. M. d. A. Ganadería, “La política agropecuaria ecuatoriana hacia el desarrollo territorial rural sostenible (2015 - 2025),” 2015.
- [4] O. D. M. Landázuri, *EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE EUTROFIZACIÓN DE LA LAGUNA DE YAHUARCOCHA*. PhD thesis, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR SEDE IBARRA (PUCE-SI), 2 2022.
- [5] G. A. D. M. D. S. M. D. I. G. IBARRA), “Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón ibarra 2015-2023,” 2015.
- [6] G. A. D. M. D. S. M. D. I. G. IBARRA), “Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del gad de san miguel de ibarra 2020-2040,” 2020.
- [7] A. y Transición Ecológica Ministerio del Ambiente, “Se fortalecen las acciones para la preservación de la laguna de yahuarcocha,” 6 2021.
- [8] A. A. C. Posso, L. A. C. Berti, L. F. H. Terán, and J. L. N. Tello, “Promulgación de una política gubernamental para la supervisión de la conservación de la laguna zahuarcocha.<sup>en</sup> el cantón ibarra, ecuador.,” *Dilemas contemporáneos: Educación, Política y Valores*, pp. 6–7, 1 2024.
- [9] G. A. D. M. D. S. M. D. I. G. IBARRA), “Actualización del plan de manejo integral de la microcuenca hidrográfica de yahuarcocha, provincia de imbabura.,” 2022.
- [10] M. Y. L. LEON, *Evaluación de los afluentes que ingresa a la Laguna de Yahuarcocha, Provincia de Imbabura*. PhD thesis, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra (PUCE-SI), 9 2022.

- [11] M. Saban, S. Casans-Berga, R. Garcia-Gil, A. E. Navarro-Anton, O. Aghzout, and A. Rosado-Munoz, "Sensing wood moisture in heritage and wooden buildings: A new sensing unit with an integrated lora-based monitoring system," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, pp. 25409–25423, 12 2022.
- [12] V. Bonilla, B. Campoverde, and S. G. Yoo, "A systematic literature review of lorawan: Sensors and applications," *Sensors*, vol. 23, p. 8440, 10 2023.
- [13] J. Haxhibeqiri, E. D. Poorter, I. Moerman, and J. Hoebeke, "A survey of lorawan for iot: From technology to application," *Sensors*, vol. 18, p. 3995, 11 2018.
- [14] A. Amaro-Loza, A. Pedrozo-Acuña, A. Sánchez-Huerta, C. Sánchez-Vargas, and E. A. Vergara-Alcaraz, "Evaluación de las mediciones de lluvia en la ciudad de México utilizando la red de disdrómetros y su comparación con respecto a la red de pluviómetros de balancín," *Ingeniería del Agua*, vol. 26, pp. 91–105, 4 2022.
- [15] D. de Gestión Ambiental GAD Municipal Ibarra, "Informe del monitoreo de afluentes de la laguna de yahuarcocha," tech. rep., GAD Municipal Ibarra, 2024.
- [16] D. de Gestión Ambiental GAD Municipal Ibarra, "Datos físicoquímicos de los caudales de la laguna de yahuarcocha," tech. rep., GAD Municipal Ibarra, 2024.
- [17] G. P. de Imbabura, "Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la provincia de imbabura 2023 - 2027," 10 2024.
- [18] D. de Gestión Ambiental GAD Municipal Ibarra, "Plan de manejo integral de la microcuenca de la laguna de yahuarcocha," tech. rep., GAD Municipal Ibarra, 4 2023.
- [19] D. de Gestión Ambiental GAD Municipal Ibarra, "Afluente acequia el 15," tech. rep., GAD Municipal Ibarra.
- [20] D. de Gestión Ambiental GAD Municipal Ibarra, "Afluentes polo golo y manzana-huaico," tech. rep., GAD Municipal Ibarra.
- [21] C. Freire-Vinueza, K. Meneses, and G. Cuesta, "América latina: ¿un paraíso de la contaminación ambiental?," *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 55, pp. 1–18, 7 2021.
- [22] D. V. Chapman and T. Sullivan, "The role of water quality monitoring in the sustainable use of ambient waters," *One Earth*, vol. 5, pp. 132–137, 2 2022.

- [23] M. Campero, E. Balseiro, C. E. Fernández, B. Modenutti, P. E. Prado, C. A. Rivera-Rondon, F. M. Carvajal-Vallejos, Y. Herrera-Martínez, D. M. López-Paría, N. Aranguren-Riaño, I. Samanez, P. R. D. los Ríos-Escalante, and M. Steinitz-Kannan, “Andean lakes: endangered by natural and anthropogenic threats,” *Inland Waters*, pp. 1–17, 1 2025.
- [24] S. D. C. Salgado, “Impacto ambiental de la eutrofización,” *Neuronum*, vol. 8, 2022.
- [25] T. Dippong and M.-A. Resz, “Water and sediments pollution from iza river (romania): Influence on water quality and metals content,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 200, p. 107335, 8 2025.
- [26] N. Bouchareb, R. A. Chouaib, L. Meriem, B. Abdelaziz, K. Salah, B. Sara, and C. Mohamed, “Monitoring water quality in beni haroun dam northeastern algeria: Application of water quality index (wqi), pollution index (pi), and statistical analyses,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 323, p. 101267, 7 2025.
- [27] G. Y. C. Rimachi and D. J. F. Huamán, “Contaminación ambiental y sus efectos en la sociedad,” *HORIZONTE EMPRESARIAL*, vol. 10, pp. 1–11, 7 2023.
- [28] G. Balcerowska-Czerniak and F. Westad, “A statistical index of surface water quality as a useful extension of monitoring systems for understanding ecosystems’ response to adverse events,” *Journal of Environmental Management*, vol. 389, p. 126104, 8 2025.
- [29] X. Rigueira, D. Olivieri, M. Araujo, A. Saavedra, and M. Pazo, “Multivariate functional data analysis and machine learning methods for anomaly detection in water quality sensor data,” *Environmental Modelling & Software*, vol. 190, p. 106443, 5 2025.
- [30] J. L. Guiñón, E. Ortega, J. García-Antón, and V. Pérez-Herranz, “Moving average and savitzki-golay smoothing filters using mathcad,” *International Conference on Engineering Education*, 9 2007.
- [31] A. y Transición Ecológica Ministerio del Ambiente, “Código orgánico ambiental,” 2024.
- [32] S. Zhuiykov, “Solid-state sensors monitoring parameters of water quality for the next generation of wireless sensor networks,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 161, pp. 1–20, 1 2012.
- [33] P. Kruse, “Review on water quality sensors,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 51, p. 203002, 5 2018.

- [34] J. A. M. Casanovas, J. A. Satorra, and A. E. Agustí, “Sensores de conductividad eléctrica aparente para el análisis de la variabilidad del suelo en agricultura de precisión,” *Grupo de Investigación en AgrotICa y Agricultura de Precisión*.
- [35] P. Gou, N. D. Kraut, I. M. Feigel, H. Bai, G. J. Morgan, Y. Chen, Y. Tang, K. Bocan, J. Stachel, L. Berger, M. Mickle, E. Sejdić, and A. Star, “Carbon nanotube chemiresistor for wireless ph sensing,” *Scientific Reports*, vol. 4, p. 4468, 3 2014.
- [36] A. Iturri, N. Kloster, C. Beroisa, C. Álvarez, J. Isasti, and M. Díaz-Zorita, “¿qué medimos cuando analizamos la conductividad eléctrica de aguas y suelos?,” *Notas Agrícolas Pampeanas*, 2022.
- [37] A. S. Jones, T. L. Jones, and J. S. Horsburgh, “Toward automating post processing of aquatic sensor data,” *Environmental Modelling & Software*, vol. 151, p. 105364, 5 2022.
- [38] A. Perea, S. Rahman, H. Chen, A. Cox, S. Nyamuryekung’e, M. Bakir, H. Cao, R. Estell, B. Bestelmeyer, A. F. Cibils, and S. A. Utsumi, “Integrating lorawan sensor networks and machine learning models to classify beef cattle behavior on arid rangelands of the southwestern united states,” *Smart Agricultural Technology*, vol. 11, p. 101002, 8 2025.
- [39] L. Alliance, “¿qué es lorawan?,” <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>, 2025. Accedido el 12 de noviembre de 2025.
- [40] T. T. Network, “Clases de dispositivo.” <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/classes/>, 2025. Accedido el 12 de noviembre de 2025.
- [41] M. Mehic, M. Duliman, N. Selimovic, and M. Voznak, “Lorawan end nodes: Security and energy efficiency analysis,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, pp. 8997–9009, 11 2022.
- [42] M. Alkhayyal and A. M. Mostafa, “Enhancing lorawan sensor networks: A deep learning approach for performance optimizing and energy efficiency,” *Computers, Materials & Continua*, vol. 83, pp. 1079–1100, 2025.
- [43] H. Noura, T. Hatoum, O. Salman, J.-P. Yaacoub, and A. Chehab, “Lorawan security survey: Issues, threats and possible mitigation techniques,” *Internet of Things*, vol. 12, p. 100303, 12 2020.
- [44] M. Gholami, A. Ghaffari, N. Derakhshanfard, N. İBRAHIMOĞLU, and A. A. P. Kazem, “Blockchain integration in iot: Applications, opportunities, and challenges,” *Computers, Materials & Continua*, vol. 83, pp. 1561–1605, 2025.

- [45] B. Qin, B. Hui, L. Wang, M. Yang, J. Li, B. Li, R. Geng, R. Cao, J. Sun, L. Si, F. Huang, and Y. Li, “A survey on text-to-sql parsing: Concepts, methods, and future directions,” 2022.
- [46] S. Sicari, A. Rizzardi, and A. Coen-Porisini, “Security&privacy issues and challenges in nosql databases,” *Computer Networks*, vol. 206, p. 108828, 4 2022.
- [47] W.-T. Sung, I. G. T. Isa, and S.-J. Hsiao, “An iot-based aquaculture monitoring system using firebase,” *Computers, Materials & Continua*, vol. 76, pp. 2179–2200, 2023.
- [48] N. Palma PÃ, “Soluci3n informÃtica para la selecci3n del servidor web durante la migraci3n a c3digo abierto,” *Revista Cubana de Ciencias InformÃticas*, vol. 14, pp. 49 – 69, 06 2020.
- [49] C. E. G., C. A. ., and L. E. ., “Seguridad en la configuraci3n del servidor web apache,” *INGE CUC*, vol. 9, pp. 31–38, 2013.
- [50] J. Romero, *Instalaci3n y configuraci3n del software de servidor Web. IFCT0509*. IC Editorial, 2025.
- [51] J. M., L. ., and F. ., “Instalaci3n y configuraci3n de apache, un servidor web gratis,” *IngenierÃa y Desarrollo*, pp. 10–23, 2002.
- [52] J. Chen, Y. Zou, and X. Chu, “Diffusup: A graphical user interface (gui) software for diffusion modeling,” *Applied Computing and Geosciences*, vol. 22, p. 100157, 6 2024.
- [53] A. F. H. Sarango, E. R. C. Pallmay, J. P. R. Sarzosa, and J. E. C. Pozo, “Tipos y clasificaci3n de las investigaciones,” *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, vol. 5, 4 2024.
- [54] J. L. FREITAS, L. S. BUFREM, and S. M. BREDA, “Methodological choices for research in information science: Contributions to domain analysis,” *Transinformaç3o*, vol. 28, pp. 5–14, 4 2016.
- [55] S. Yazdani, A. Shirvani, and P. Heidarpoor, “A model for the taxonomy of research studies: A practical guide to knowledge production and knowledge management,” *Archives of Pediatric Infectious Diseases*, vol. 9, 5 2021.
- [56] Dragino, “Rs485-lb/lb: convertidor impermeable rs485/uart a lorawan.” [https://wiki.dragino.com/xwiki/bin/view/Main/User%20Manual%20for%20LoRaWAN%](https://wiki.dragino.com/xwiki/bin/view/Main/User%20Manual%20for%20LoRaWAN%20)

- [20End%20Nodes/RS485-LB\\_Waterproof\\_RS485UART\\_to\\_LoRaWAN\\_Converter/#H5.OTAFirmwareupdate](#), 2026. Accedido el 16 de abril de 2026.
- [57] DFROBOT, “Medidor de ce analógico sku dfr0300.” <https://wiki.dfrobot.com/dfr0300/#docs>, 2025. Accedido el 16 de abril de 2026.
- [58] DFROBOT, “Electrodo de ph industrial sku fit0348.” <https://wiki.dfrobot.com/fit0348/#docs>, 11 2025. Accedido el 16 de abril de 2026.
- [59] Dragino, “Manual del usuario de la puerta de enlace lorawan para exteriores dlos8n,” 10 2025.
- [60] The Thing Stack, “Conceptos..” <https://www.thethingsindustries.com/docs/concepts/>, 2026. Accedido el 17 de abril de 2026.
- [61] D. de Gestión Ambiental GAD Municipal Ibarra, “Datos físicoquímicos de los caudales de la laguna de yahuarcocha,” tech. rep., GAD Municipal Ibarra, 2025.

# Anexos

## **Anexo A: Manual de actualización de firmware**

<https://wiki.dragino.com/xwiki/bin/view/Main/UART%20Access%20for%20LoRa%20ST%20v4%20base%20model/#H3.UARTforFirmwareUpgrade>

## Anexo B: Datos asequia El Quince

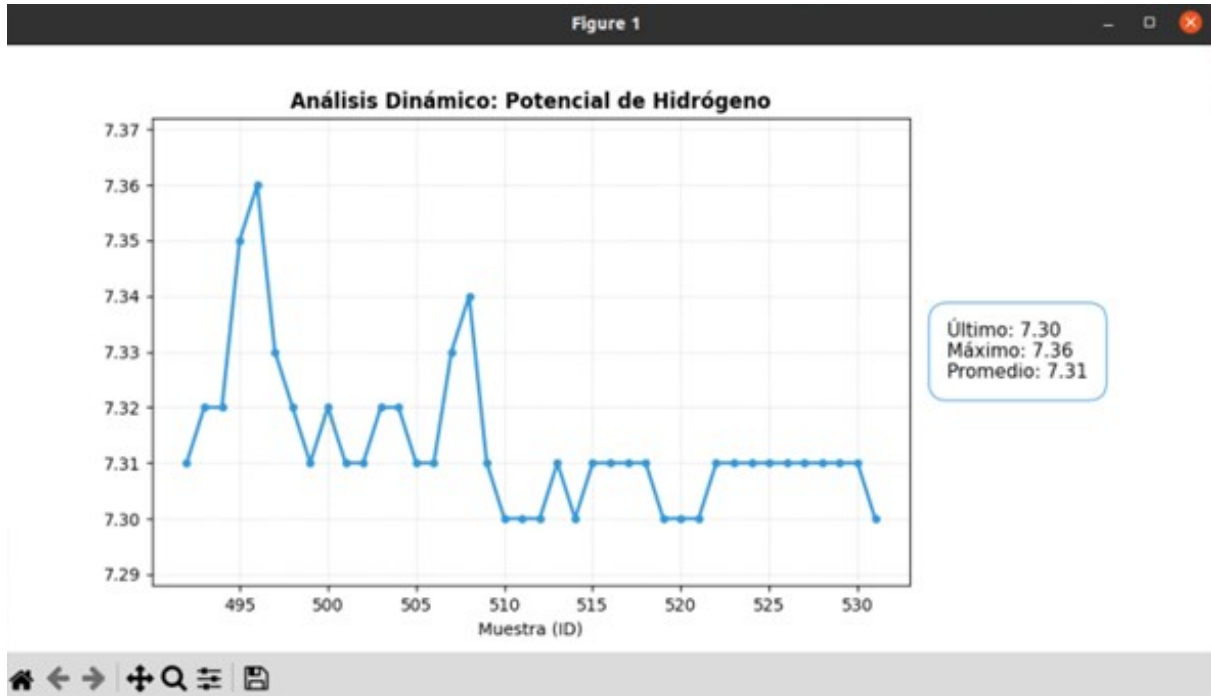


Fig. B.1 Datos medidos de pH.

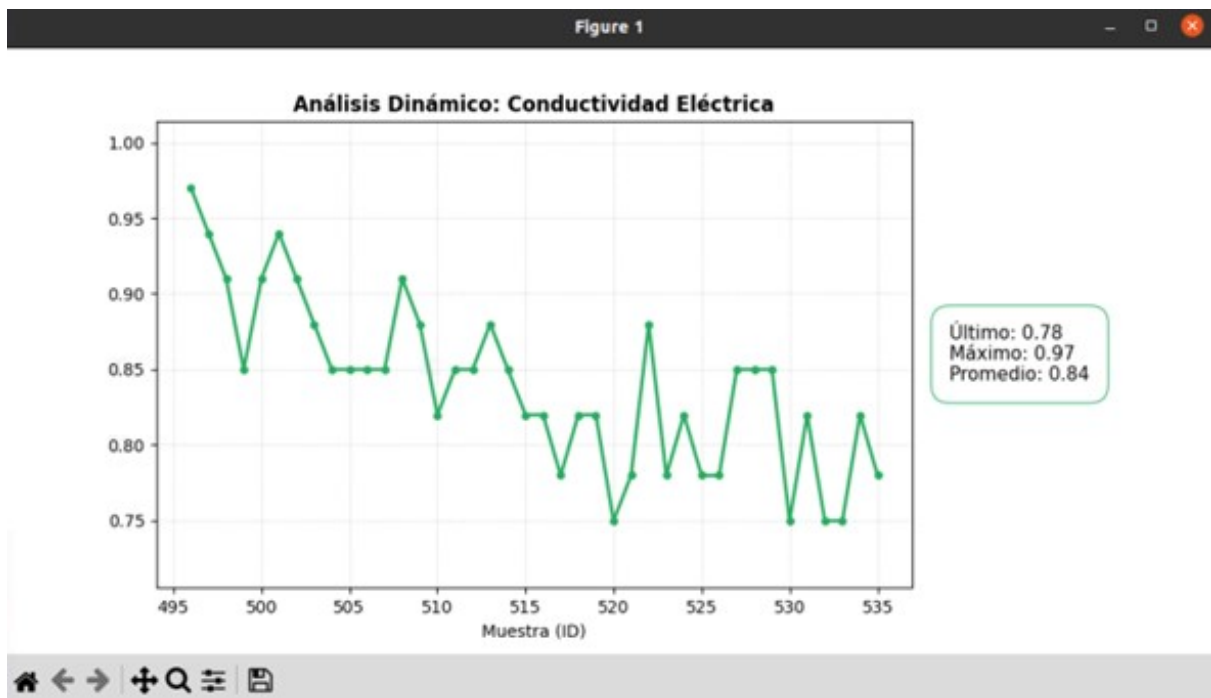


Fig. B.2 Datos medidos de conductividad eléctrica.

## Anexo C: Datos Polo Golo

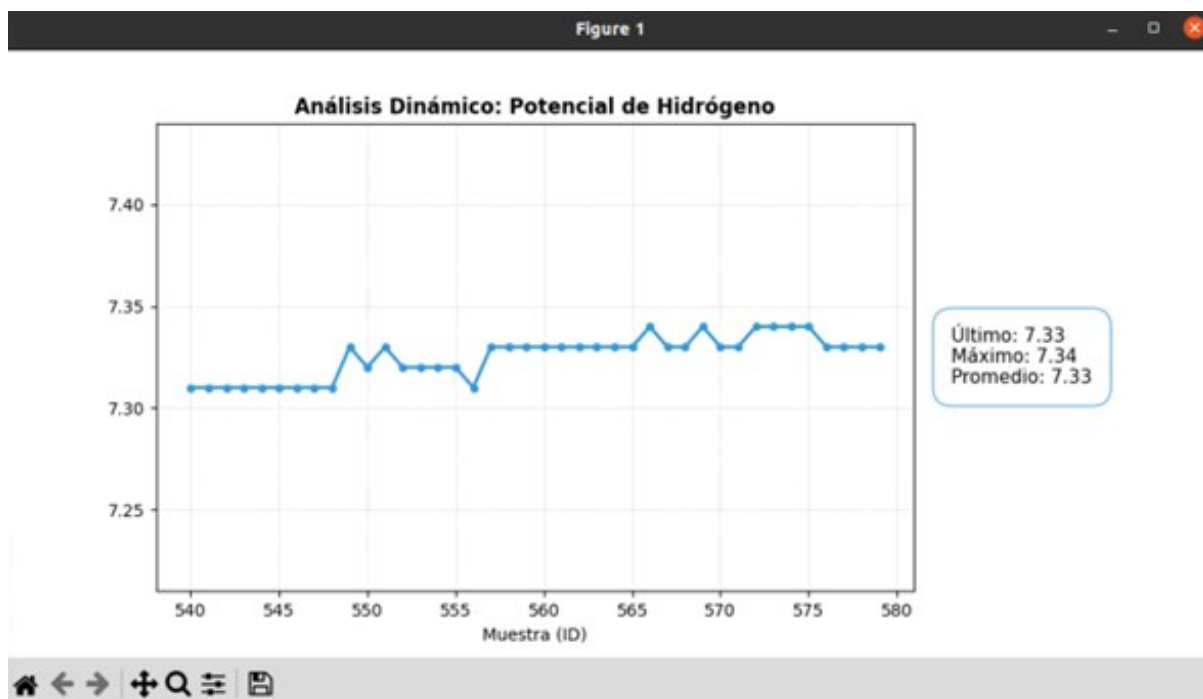


Fig. C.1 Datos medidos de pH.

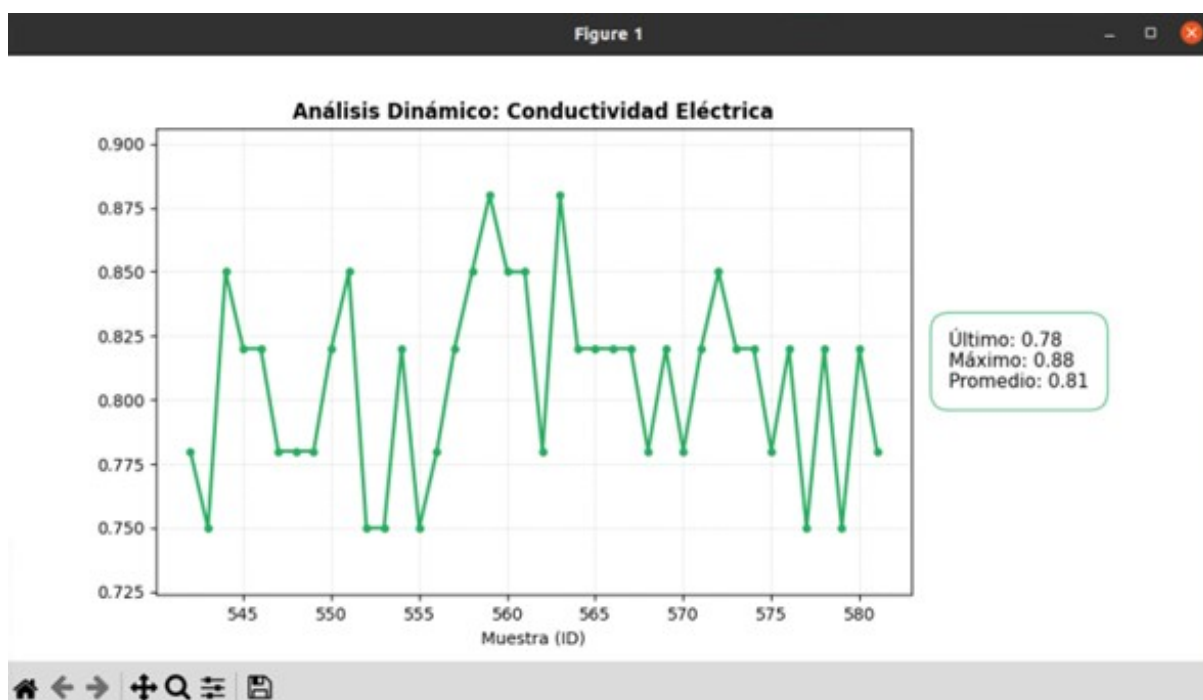


Fig. C.2 Datos medidos de conductividad eléctrica.

## Anexo D: Datos Manzana-Huaico

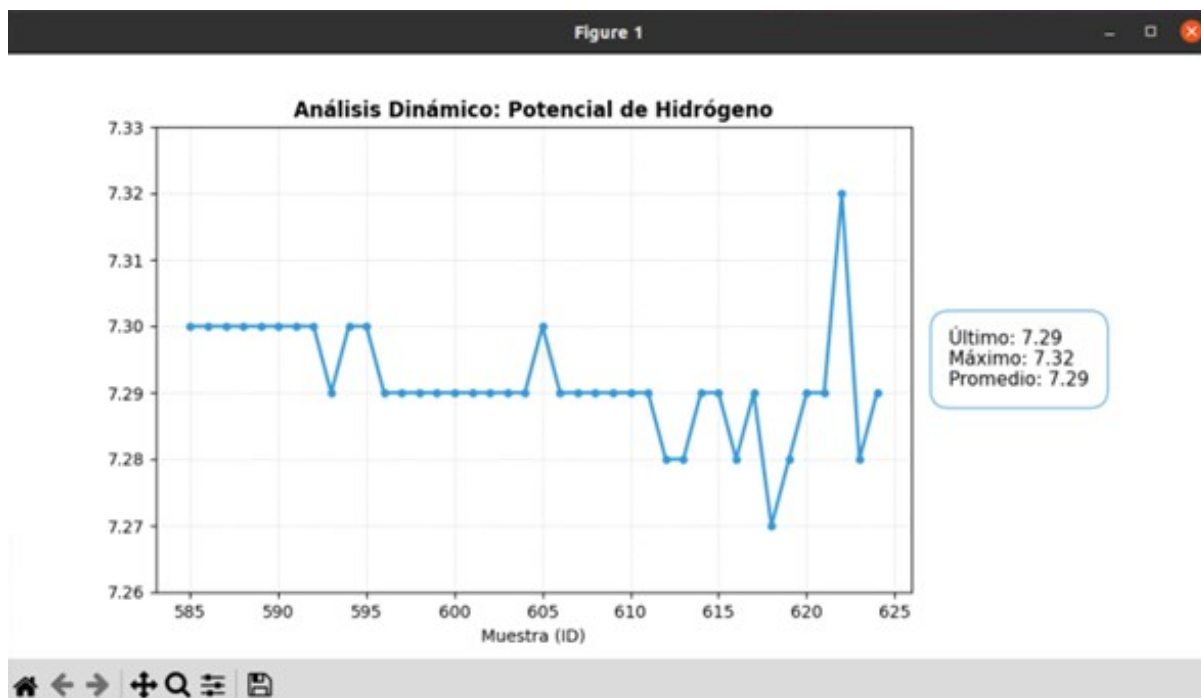


Fig. D.1 Datos medidos de pH.

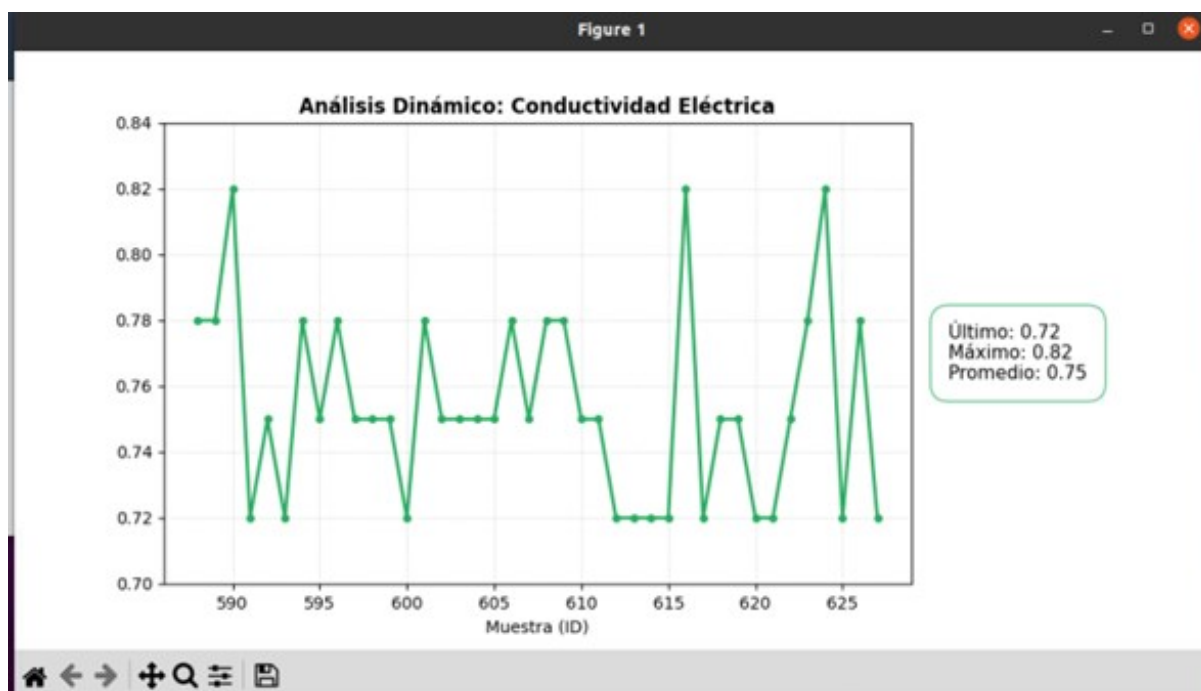


Fig. D.2 Datos medidos de conductividad eléctrica.

## Anexo E: Trabajos realizados en las afluentes



Fig. E.1 Trabajos en las tuberías de las afluentes.



Fig. E.2 Trabajos en la zona superior de las afluentes.



Fig. E.3 Señalización de los trabajos en la zona.



Fig. E.4 Trabajo en la afluyente.