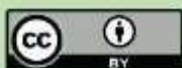




Esta obra está bajo una  
[Licencia Creative Commons  
Atribución - 4.0 Internacional \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)  
Vea una copia de esta licencia en  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>





**FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA**  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA

Tesis

# **Monitoreo de la calidad del agua para zonas rurales mediante un sistema de sensores de bajo costo basados en IoT**

Para optar el título profesional de Ingeniero de Sistemas e Informática

**Autora:**

Andrea Alexandra García Gonzales

<https://orcid.org/0009-0001-8704-1491>

**Asesor:**

Ing. Dr. Cristian Werner García Estrella

<https://orcid.org/0000-0002-5687-8694>

Tarapoto, Perú

2026



**FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA**  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA

Tesis

# **Monitoreo de la Calidad del agua para zonas rurales mediante un sistema de sensores de bajo costo basados en IoT**

Para optar el título profesional de Ingeniero de Sistemas e Informática

**Autora:**

Andrea Alexandra García Gonzales

Sustentado y aprobado el 25 de febrero del 2026, ante el honorable jurado:



---

**Presidente de Jurado**  
Ing. Dr. Miguel Ángel Valles  
Coral



---

**Secretario de Jurado**  
Ing. Dr. Jorge Damián Valverde  
Iparraguirre



---

**Vocal de Jurado**  
Ing. John Clark Santa María Pinedo



---

**Asesor**  
Ing. Dr. Cristian Werner García  
Estrella

Tarapoto, Perú

2026



**ACTA DE SUSTENTACIÓN**  
**PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO DE SISTEMAS E INFORMÁTICA**  
Resolución N° 007-2026-UNSM/FISI-D (18.02.2026)

FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA – ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA

A las 11:00 horas del día Miércoles, 25 de Febrero del año 2026, se inició el acto público de sustentación de la tesis titulada: MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA ZONAS RURALES MEDIANTE UN SISTEMA DE SENSORES DE BAJO COSTO BASADOS EN IoT, presentado por la Bach. ANDREA ALEXANDRA GARCÍA GONZALES, con el Asesor: Ing. Dr. Cristian Werner García Estrella

Instalado los miembros de jurado calificador conformado por:

Presidente : Ing. Dr. Miguel Ángel Valles Coral  
Secretario : Ing. Dr. Jorge Damian Valverde Iparraguirre  
Vocal : Ing. MBA. John Clark Santa María Pinedo

El presidente del jurado dirigió brevemente unas palabras y a continuación el secretario dio lectura a la Resolución N° 007-2026-UNSM/FISI-D.

Seguidamente el autor expuso el trabajo de investigación y el jurado realizó las preguntas pertinentes, respondidas por el sustentante y eventualmente por el asesor, con la venia del jurado.

Una vez terminada la ronda de preguntas el jurado procedió a deliberar para determinar la calificación final, para lo cual dispuso un receso de quince (15) minutos, con participación del asesor con voz, pero sin voto y sin la presencia del sustentante y otros participantes del acto público.

Luego de aplicar los criterios de calificación con estricta observancia del principio de objetividad y de acuerdo con los puntajes en escala vigesimal (de 0 a 20), según el Anexo 4.2. del RG-CTI, la nota de sustentación otorgada resultante del promedio aritmético de los calificativos emitidos por cada uno de los miembros del jurado fue *dieciocho* (18).

De acuerdo con el Artículo 40° del RG – CTI, la nota obtenida es *aprobado* y correspondiente a la calificación de *muy...bueno...*; leído este resultado en presencia de todos los participantes del acto de sustentación, el secretario dio lectura a las observaciones subsanables al informe final que el autor deberá corregir y alcanzar al jurado en un plazo máximo de treinta (30) días calendario.



**Universidad Nacional de San Martín**  
Facultad de Ingeniería de Sistema e Informática  
Ciudad Universitaria - Jr. Amorarca # 315 - Morales



Firman los integrantes del jurado calificador, asesor y el autor de la tesis en señal de conformidad, dando por concluido el acto a las ...12.00... horas, el mismo día 25 de febrero del 2026.

Ing. Dr. Miguel Ángel Valles Coral  
Presidente

Ing. Dr. Jorge Damian Valverde Iparraguirre  
Secretario

Ing. MBA. John Clark Santa María Pinedo  
Vocal

Ing. Dr. Cristian Werner García Estrella  
Asesor

Andrea Alexandra García Gonzales  
Autor

## Constancia de asesoramiento

Quien suscribe el presente documento,

**Hace constar:**

Que, habiendo acompañado en la ejecución de la tesis titulada: **Monitoreo de la Calidad del agua para zonas rurales mediante un sistema de sensores de bajo costo basados en IoT** Elaborado por el tesista:

Bachiller en Ingeniería de Sistemas e Informática: **Andrea Alexandra García Gonzales.**

Por lo que doy conformidad para los trámites correspondientes, dejo como constancia el presente documento y firmo.

Tarapoto, 25 de febrero de 2026.



.....  
Ing. Dr. Cristian Werner García Estrella  
Asesor

## Declaratoria de Autenticidad

Yo **Andrea Alexandra García Gonzales**, con DNI N° **72404819**, bachiller de la Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática de la Universidad Nacional de San Martín, autor de la tesis titulada: **Monitoreo de la Calidad del agua para zonas rurales mediante un sistema de sensores de bajo costo basados en IoT.**

Declaramos bajo juramento que:

1. La tesis presentada es de autoría propia.
2. La redacción fue realizada respetando las citas y referencia de las fuentes bibliográficas consultadas, siguiendo las normas APA actuales.
3. Toda información que contiene la tesis no ha sido plagiada.
4. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido alterados ni copiados, por tanto, la información de esta investigación debe considerarse como aporte a la realidad investigada.

Por lo antes mencionado, asumo bajo responsabilidad las consecuencias que deriven de mi accionar, sometiéndome a las leyes de nuestro país y normas vigentes de la Universidad Nacional de San Martín.

Tarapoto, 25 de febrero de 2026.



**Andrea Alexandra García Gonzales**

DNI N° 72404819

## Ficha de identificación

<p><b>Título:</b> Monitoreo de la Calidad del agua para zonas rurales mediante un sistema de sensores de bajo costo basados en IoT</p>	<p><b>Área de investigación:</b> Ingeniería y Tecnología.  <b>Línea de investigación:</b> Ingeniería de Sistemas y Comunicaciones.  <b>Sublínea de investigación:</b> Inteligencia Artificial y recuperación de la Información.  <b>Grupo de investigación:</b> Grupo de Investigación IA (Resolución N°134–2021–UNSM/FISI/CFT)  <b>Tipo de investigación:</b>  Básica <input type="checkbox"/>, Aplicada <input checked="" type="checkbox"/>, Desarrollo experimental <input type="checkbox"/></p>
<p><b>Autor:</b> Andrea Alexandra García Gonzales</p>	<p>Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática  Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas e Informática  <a href="https://orcid.org/0009-0001-8704-1491">https://orcid.org/0009-0001-8704-1491</a></p>
<p><b>Asesor:</b> Ing. Dr. Cristian Werner García Estrella</p>	<p><b>Dependencia local de soporte:</b>  Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática  Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas e Informática  Unidad o Laboratorio Ingeniería de Sistemas e Informática  <a href="https://orcid.org/0000-0002-5687-8694">https://orcid.org/0000-0002-5687-8694</a></p>

## Dedicatoria

A mis amados padres, Smith Gonzales y Gheiner Garcia, por su amor infinito, por creer en mí y por ser mi refugio en cada etapa de este camino. Su apoyo incondicional ha sido el cimiento más firme sobre el que he podido avanzar.

A mi hermana, Ariana Francineth, por su ternura, por sus palabras de ánimo en los días difíciles y por estar siempre presente con su luz en mi vida.

A mis abuelos, Loisi y Americo, por su sabiduría, sus oraciones silenciosas. Su presencia ha sido un consuelo y una inspiración.

Y a mi pareja Nixon Herrera, por su amor constante, por sostenerme con paciencia. Gracias por caminar a mi lado y por ser parte de este increíble sueño.

## **Agradecimientos**

Agradezco sinceramente al Ing. Dr. Miguel Ángel Valles Coral, por su valiosa guía en la etapa final de mi formación universitaria. Su experiencia y compromiso fueron fundamentales en este proceso.

Al Ing. Dr. Cristian Werner García Estrella, por su acompañamiento como asesor y por brindar siempre su apoyo y disposición. A ambos, mi más profunda gratitud por acompañarme en este camino.

## Índice general

Ficha de identificación.....	6
Dedicatoria.....	7
Agradecimientos .....	8
Índice general.....	9
Índice de tablas .....	12
Índice de figuras.....	13
RESUMEN .....	15
ABSTRACT .....	16
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN .....	17
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	20
2.1. Antecedentes de la investigación.....	20
2.2. Fundamentos teóricos.....	22
2.2.1. Monitoreo de la calidad del agua.....	22
2.2.2. Sistema de monitoreo IoT.....	25
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS .....	29
3.1. Ámbito y condiciones de la investigación .....	29
3.1.1. Contexto de la investigación .....	29
3.1.2. Periodo de ejecución .....	29
3.1.3. Autorizaciones y permisos.....	29
3.1.4. Control ambiental y protocolos de bioseguridad .....	30
3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales .....	30
3.2. Sistema de variables.....	30
3.2.1. Variables principales.....	30
3.3. Procedimientos de la investigación .....	31
3.3.1. Diseño de la investigación .....	31

3.3.2. Actividades del objetivo específico 1: Determinar el rango mínimo y máximo de los parámetros fisicoquímicos de la zona de captación del recurso hídrico.....	32
3.3.3. Actividades del objetivo específico 2: Implementar un sistema de bajo costo que integre sensores para medir pH, turbidez, temperatura, solidos totales disueltos y conductividad eléctrica, basado en tecnología IoT.....	34
3.3.4. Actividades del objetivo específico 3: Evaluar la efectividad del sistema de bajo costo que utilice tecnología IoT para el seguimiento de la calidad del agua .....	49
<b>CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>51</b>
4.1. Resultado específico 1: Determinar el rango mínimo y máximo de los parámetros fisicoquímicos de la zona de captación del recurso hídrico .....	51
4.2. Resultado específico 2: Implementar un sistema de bajo costo que integre sensores para medir pH, turbidez, temperatura, solidos totales disueltos y conductividad eléctrica, basado en tecnología IoT .....	53
4.2.1. Selección de componentes hasta diseño del Hardware .....	53
4.2.2. Calibración.....	54
4.2.3. Transmisión de Datos.....	58
4.2.4. Machine Learning .....	58
4.3. Resultado específico 3: Evaluar la efectividad del sistema de bajo costo que utilice tecnología IoT para el seguimiento de la calidad del agua .....	63
4.3.1. Análisis estadístico descriptiva .....	63
4.3.2. Análisis gráfico .....	65
4.3.3. Evaluación frente a límites normativos .....	66
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>68</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>69</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>70</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>76</b>
Anexo 1: Presentación de Tesista y Solicitud de Autorización para la Ejecución de Proyecto de Investigación-Abril de 2024.....	76
Anexo 2: Solicitud de Acompañamiento Técnico y Autorización para la Instalación del Prototipo de Monitoreo en la Fuente de Captación .....	77

Anexo 3: Resultados Análisis Físicoquímico, Bacteriológico y Parasitológico del Agua en el Laboratorio Referencial de Morales-Mayo 2024 .....	77
Anexo 4: Resultados N°01 Análisis Físicoquímico en el Laboratorio de suelos y agua de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNSM .....	79
Anexo 5: Resultados N°02 Análisis Físicoquímico en el Laboratorio de suelos y agua de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNSM .....	79
Anexo 6: Resultados N°03 Análisis Físicoquímico en el Laboratorio de suelos y agua de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNSM .....	81
Anexo 7: Detalle de costos del sistema de monitoreo IoT .....	82
Anexo 8: Diagrama de conexión .....	83
Anexo 9: Fuente hídrica del Sector Chuina en temporada de lluvia.....	84
Anexo 10: Entorno de pruebas del sistema de monitoreo IoT durante la calibración y validación de sensores .....	84
Anexo 11: Código Fuente del sistema embebido en Arduino IDE.....	85
Anexo 12: Código Fuente del Algoritmo de No supervisado Usando K-means y PCA .....	89

## Índice de tablas

Tabla 1. Descripción de variables por objetivo específico .....	30
Tabla 2. Límites máximos y mínimos .....	32
Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos del Sector Chuina .....	51
Tabla 4. Rango mínimo y máximo observado .....	51
Tabla 5. Mediciones del sensor de pH con solución de pH 4.00 .....	55
Tabla 6. Mediciones del sensor de pH con solución de pH 7.00 .....	56
Tabla 7. Mediciones del sensor de CE con solución de 12.88 mS/cm .....	57
Tabla 8. Registro automático en Google Sheets .....	58
Tabla 9. Análisis Exploratorio de Datos.....	58
Tabla 10. Resumen de estadísticos descriptivos.....	63
Tabla 11. Percentiles Q1-Q3.....	64

## Índice de figuras

Figura 1. Departamento de San Martín .....	29
Figura 2. Provincia de San Martín .....	29
Figura 3. Distrito de Morales .....	29
Figura 4. Procedimiento para análisis en laboratorio.....	33
Figura 5. Esquematizan de principales etapas.....	34
Figura 6. Sensores Utilizados.....	35
Figura 7. Placa Arduino Mega.....	36
Figura 8. Módulo GSM 800L .....	36
Figura 9. Módulo Lector de memoria Micro SD .....	36
Figura 10. Arquitectura física del sistema.....	37
Figura 11. Montaje del sistema en pruebas preliminares .....	38
Figura 12. Captura del monitor serial durante prueba de sensores.....	38
Figura 13. Prototipo inicial.....	38
Figura 14. Diseño del PCB.....	39
Figura 15. Placa de circuito impreso .....	39
Figura 16. Filamento PLA blanco mate .....	40
Figura 17. Impresora 3D Bambu Lab P1P.....	40
Figura 18. Diseño del case en SketchUp 2025 .....	40
Figura 19. Configuración de impresión en Bambu Studio .....	40
Figura 20. Calibración con solución pH 4.00 .....	41
Figura 21. Calibración con solución pH 7.00 .....	41
Figura 22. Calibración con solución de conductividad 12.88.....	41
Figura 23. Arquitectura lógica del sistema embebido .....	42
Figura 24. Muestras de agua para pruebas.....	46
Figura 25. Flujo para la Aplicación de Aprendizaje no Supervisado .....	47
Figura 26. Análisis estadístico descriptivo.....	49
Figura 27. Prototipo Final Ensamblado .....	54
Figura 28. Caja Personalidad 3D .....	54
Figura 29. Curva de Calibración pH 4 .....	55
Figura 30. Curva de Calibración pH 7 .....	56
Figura 31. Curva de Calibración CE 12.88.....	57
Figura 32. Registro de respaldo en tarjeta microSD.....	58
Figura 33. Mapa de Correlación .....	59
Figura 34. Relación entre Parámetros.....	60

Figura 35. Método del Codo .....	60
Figura 36. Gráfico de Silhouette.....	61
Figura 37. Contribución de variables a los componentes principales .....	61
Figura 38. Clústeres con PCA.....	62
Figura 39. Histogramas de frecuencia.....	65

## RESUMEN

### **Monitoreo de la Calidad del agua para zonas rurales mediante un sistema de sensores de bajo costo basados en IoT**

El acceso limitado a tecnologías de monitoreo continuo en zonas rurales dificulta la gestión del recurso hídrico y expone a la población a riesgos sanitarios. Esta investigación tiene como objetivo diseñar e implementar un sistema de monitoreo de calidad del agua basado en sensores de bajo costo e integrados a una arquitectura IoT, con capacidad de transmitir datos en tiempo real. El estudio se desarrolló en el sector Chuina, distrito de Morales, región San Martín, durante el periodo enero-agosto de 2025. Se construyó un sistema embebido utilizando Arduino Mega 2560, sensores calibrados de pH, turbidez, temperatura, TDS y conductividad eléctrica, junto con módulos GSM y microSD. Se recopilaron 2880 registros automáticos en un lapso de 60 días de monitoreo. Los valores obtenidos por el sistema IoT, oscilaron entre 17.14 °C y 28.97 °C en temperatura, 6.00 y 7.50 en pH, 0.90 y 1.00 mS/cm en conductividad eléctrica, 574.51 y 657.64 mg/L en sólidos disueltos totales y 0.25 a 2.71 NTU en turbidez. El sistema emitió alertas SMS ante excedencias y almacenó los datos localmente en caso de fallas de red. Se aplicó estadística descriptiva, análisis de percentiles, histogramas, y modelos de aprendizaje no supervisado con K-Means logrando identificar agrupamientos de registros según calidad del agua. Se concluye que el sistema funciona de manera robusta, autónoma y confiable, siendo una alternativa replicable para zonas rurales con escasa infraestructura, y útil para fortalecer la vigilancia ambiental y la toma de decisiones comunitarias.

**Palabras clave:** monitoreo ambiental, sensores inteligentes, agua potable rural, Arduino embebido, aprendizaje no supervisado

## ABSTRACT

### **Water Quality Monitoring for Rural Areas Using Low-Cost IoT-Based Sensor Systems**

Limited access to continuous monitoring technologies in rural areas hinders water resource management and exposes the population to health risks. The objective of this research was to design and implement a water quality monitoring system based on low-cost sensors integrated into an IoT architecture, capable of transmitting data in real time. The study was conducted in the Chuina sector, Morales district, San Martín region, between January and August 2025. An embedded system was developed using an Arduino Mega 2560, calibrated sensors for pH, turbidity, temperature, total dissolved solids (TDS), and electrical conductivity, alongside GSM and microSD modules. A total of 2,880 automatic records were collected over 60 days of monitoring. The values recorded by the IoT system ranged from 17.14 °C to 28.97 °C for temperature, 6.00 to 7.50 for pH, 0.90 to 1.00 mS/cm for electrical conductivity, 574.51 to 657.64 mg/L for TDS, and 0.25 to 2.71 NTU for turbidity. The system issued SMS alerts when thresholds were exceeded and stored data locally in the event of network failure. Descriptive statistics, percentile analysis, histograms, and unsupervised learning models using K-Means were applied, successfully identifying clusters of records according to water quality. It is concluded that the system operates in a robust, autonomous and reliable manner, representing a replicable alternative for rural areas with limited infrastructure, and a useful tool to strengthen environmental surveillance and community-based decision-making.

**Keywords:** environmental monitoring, smart sensors, rural drinking water, embedded Arduino, unsupervised learning



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

El agua potable juega un rol esencial en la salud pública, al ser indispensable no solo para el consumo humano, sino también para múltiples procesos vinculados a la industria y la agricultura (Gomes et al., 2024; Kumar et al., 2020). En la actualidad, el Internet de las Cosas, comúnmente identificado por sus siglas en inglés como IoT como una de las tecnologías emergentes más relevantes, se viene incorporado progresivamente en múltiples sectores con el fin de responder a necesidades particulares, incluyendo el ámbito de la gestión del agua (Nieto Pacheco et al., 2023). Así, en el ámbito ambiental y sanitario, el IoT se posiciona como una herramienta innovadora para implementar soluciones eficientes y estratégicas (Karthikeyan et al., 2024).

En el Perú, si bien se registraron mejoras en el acceso a agua potable, todavía existen barreras significativas, en particular en áreas rurales y con difícil conectividad (Al-kassab-Córdova et al., 2023; Paredes & Woolley, 2022). Investigaciones recientes demostraron que la deficiencia de agua segura y la inadecuada infraestructura sanitaria contribuyen significativamente a la propagación de enfermedades transmisibles como entre ellas la disentería, la fiebre tifoidea, el cólera y la hepatitis A (Jaramillo Vera & Marines Batalla, 2023; OMS, 2023). Ante esta situación, el estudio de (Salgado et al., 2022) señaló que una infraestructura basada en IoT permitiría a las autoridades locales responder de manera más ágil ante problemas relacionados con la calidad del agua.

En la región San Martín, se registró una cobertura de agua tratada inferior al promedio nacional de 89.9 %, lo que incrementó la exposición de la población rural a fuentes contaminadas (ANA, 2023; INEI, 2023). Según (UNICEF, 2023), los niños están particularmente expuestos a afecciones relacionadas con el agua como consecuencia del acceso limitado a fuentes seguras de agua. Para enfrentar esta situación, algunas comunidades comenzaron a adoptar tecnologías de bajo costo, como sensores conectados a sistemas IoT (Amador-Castro et al., 2024; Lal et al., 2024) .

Durante esta investigación, se identificó la ausencia de mecanismos adecuados para la medición, seguimiento y monitoreo en la vertiente hídrica del sector Chuina. No disponía de un sistema que permitiera el control continuo de parámetros como la conductividad eléctrica, la temperatura, los sólidos disueltos totales, la turbidez y el pH. Esta limitación afectó directamente la posibilidad de garantizar condiciones adecuadas de salud, bienestar general y calidad de vida para los habitantes (Gonzales Saenz et al., 2023; Ramos Mancheno, 2024).

Asimismo, se observó que la calidad del agua presentó una variabilidad moderada debido a factores climáticos, lo cual dificultó la obtención de datos consistentes a lo largo del tiempo (Carvalho et al., 2022; Ghachoui et al., 2024). Además, la participación de personal centrada únicamente en funciones operativas, junto con la irregularidad de los controles técnicos, obstaculizó el seguimiento efectivo del recurso, lo que limitó la capacidad de acción de las autoridades locales (Alam et al., 2021; Bautista, 2023; Dávila Tuesta, 2022). Aunque se utilizaron laboratorios especializados para estudios puntuales, estos no permitieron un control en tiempo real, lo que afectó la eficiencia de las respuestas ante eventos de contaminación (Arias-Aguila et al., 2024; Zaidi Farouk et al., 2023).

Como resultado de estas deficiencias, se produjo un aumento en los costos operativos para la comunidad, debido a la necesidad de adquirir agua de mesa para el consumo diario (Gupta et al., 2023; Qian & Liu, 2024). La demora en la recolección de datos prolongó la exposición a agua contaminada, incrementando los riesgos sanitarios y retrasando la implementación de medidas correctivas (Norsuzila Yaacob et al., 2024; Singh & Walingo, 2024). Este retraso impactó negativamente, especialmente en niños y adultos mayores, quienes conforman el 14 % de la población del sector (Montero Contreras, 2022; Torres-Slimming et al., 2023)

Se consideró una dificultad relevante el acceso a la fuente hídrica durante las temporadas de lluvias, cuando los caminos suelen tornarse inaccesibles. Ante esta situación, surgió la necesidad de desarrollar una propuesta que respondiera a las particularidades geográficas y sanitarias de la zona, integrando tecnologías de monitoreo en tiempo real con validación microbiológica para asegurar la calidad del agua en contextos rurales, Esta combinación facilitaría la obtención de datos completos y oportunos según lo estipulado en el reglamento del Minsa (Ministerio de Salud, 2011)

En función del análisis del entorno y las restricciones tecnológicas identificadas para el monitoreo de la calidad del agua en áreas rurales, se planteó la siguiente interrogante de investigación: ¿Cómo puede un sistema que utilice tecnología IoT contribuir eficazmente a la medición seguimiento y monitoreo de los parámetros de la calidad del agua en la vertiente hídrica del Sector Chuina, distrito de Morales?

Con base en esta interrogante, se formuló la siguiente hipótesis: La adopción de un sistema basado en tecnología IoT para el monitoreo de los parámetros fisicoquímicos del agua facilita la detección oportuna de fluctuaciones ante posibles eventos de contaminación, contribuyendo a mejorar la calidad del agua disponible para la comunidad.

A fin de abordar esta hipótesis, se estableció un objetivo general acompañado de tres objetivos específicos, cuyas acciones guiaron el desarrollo del estudio

OG: Durante el estudio, se logró diseñar, implementar y probar un sistema funcional que permitió la recolección y transmisión de datos en tiempo real, así como la emisión de alertas ante variaciones relevantes.

OE1: Se identificó valores dentro de los límites permisibles establecidos por la normativa nacional, observando ciertas fluctuaciones en distintas condiciones climáticas, se realizó análisis en el laboratorio referencial con el fin de validar el sistema

OE2: Se construyó un prototipo operativo y funcional a partir de sensores IoT que midieron parámetros de pH, turbidez, temperatura, sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica siendo estos de bajo costo, el cual funcionó de manera autónoma, permitiendo el registro, almacenamiento y envío de datos desde la zona de captación.

OE3: El sistema demostró una respuesta adecuada frente a cambios en los parámetros monitoreados, cumpliendo con los umbrales de alerta definidos y mostrando confiabilidad en ambientes reales de operación.

La presente investigación se estructuró en cuatro capítulos. En el primer capítulo se expuso la problemática y se formularon la pregunta de investigación, la hipótesis y los objetivos que guiaron el estudio. En el segundo capítulo se abordaron los principales referentes teóricos y antecedentes que sustentaron la propuesta y los fundamentos teóricos que dieron base al desarrollo del estudio. Por su parte, el tercer capítulo presentó la descripción del tipo de investigación, su nivel y diseño, la población y muestra involucradas, así como los métodos utilizados para procesar y analizar la información. Finalmente, en el cuarto capítulo se presentaron los resultados obtenidos, además de las conclusiones, las recomendaciones, las referencias bibliográficas consultadas y los anexos que respaldan el contenido investigado.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

En Indonesia, Sugiharto et al., (2023) enfrentaron el creciente desafío de la calidad del agua derivado de la contaminación industrial y agrícola. Desarrollaron y validaron un sistema de monitoreo en tiempo real, empleando sensores de bajo costo para medir pH, temperatura, TDS y turbidez, conectados a estaciones nodales que transmitían datos a la nube. Durante un experimento en el río Troso, el sistema recopiló 4.833 datos. Alcanzaron precisiones del 98,54 % para la temperatura, 96,85 % para el pH y 98,10 % para los TDS, lo que permitió validar su efectividad para el monitoreo continuo. Además, propusieron que la integración de IoT con computación en la nube representaba una solución robusta y escalable para mejorar la precisión y la capacidad de respuesta ante variaciones en la calidad del agua.

En Rumania, Bogdan et al., (2023) respondieron a la creciente preocupación por la calidad del agua en áreas rurales mediante el desarrollo de un sistema económico de monitoreo basado en IoT. El prototipo utilizó una placa Arduino UNO, un módulo Bluetooth y sensores para medir temperatura, pH, TDS y turbidez. Lo implementaron en cinco fuentes de agua, revelando que una de ellas superaba los 500 ppm de TDS, lo cual la hacía no apta para el consumo humano. Los autores destacaron que este tipo de soluciones accesibles permitieron un monitoreo efectivo en tiempo real, lo que resultó clave para la gestión de recursos hídricos en comunidades con infraestructura limitada.

En Malasia Jabbar et al., (2024) desarrollaron un sistema IoT orientado a resolver las dificultades asociadas al monitoreo de la calidad del agua en zonas rurales con infraestructura limitada. El sistema incorporó tecnología LoRaWAN para registrar parámetros como el pH, la turbidez, los sólidos disueltos totales y la temperatura, y se alimentó mediante energía solar, lo que aseguró su autonomía en contextos remotos. La evaluación se llevó a cabo en el lago Gambang, donde se comprobó que el prototipo era resistente al agua, portátil y preciso. Además, los resultados obtenidos coincidieron con los análisis de laboratorio, lo que permitió validar la fiabilidad y exactitud del sistema. Los investigadores concluyeron que esta solución resultó rentable y eficiente, y que ofreció una alternativa sostenible para el monitoreo de la calidad del agua en áreas de difícil acceso, donde las condiciones geográficas y climáticas suelen limitar el uso de métodos convencionales.

En Nueva Zelanda, Lal et al., (2024) enfrentaron la necesidad de vigilar la calidad del agua con el fin de proteger la salud humana. Para ello, desarrollaron un sistema IoT de bajo costo, capaz de medir pH, turbidez, TDS, temperatura y oxígeno disuelto. Utilizaron sensores alimentados por energía solar, lo que permitió optimizar la autonomía del dispositivo. El sistema se evaluó en tres cuerpos de agua durante un periodo de tres semanas, almacenando los datos recolectados en una tarjeta micro-SD para su análisis posterior. Los resultados mostraron que el prototipo funcionó de autónoma, y que permitió identificar variaciones estacionales en los parámetros monitoreados. Los autores destacaron que este enfoque tenía un alto potencial de escalabilidad, lo que favorecería el fortalecimiento de las capacidades de monitoreo continuo en diversas ubicaciones.

En China Lu et al., (2024) llevaron a cabo una investigación orientada a evaluar la calidad del agua del río Li, considerado un recurso esencial para la salud pública como para la preservación del ecosistema local. Para ello, diseñaron un sistema basado en IoT que permitió monitorear parámetros como la temperatura, el pH, la turbidez, la conductividad y los sólidos disueltos totales. Incorporaron algoritmos que ayudaron a identificar valores atípicos, los cuales podrían advertir sobre posibles focos de contaminación. A lo largo de su implementación el sistema alcanzó una baja tasa de errores, lo que evidenció su eficacia para realizar un seguimiento continuo de la calidad del agua. Los autores concluyeron que este tipo de tecnología contribuyó a mejorar la toma de decisiones, al facilitar una respuesta más oportuna frente a emergencias o variaciones inesperadas en los niveles de contaminantes.

Finalmente, en India Venkatesh et al., (2024) desarrollaron un sistema de monitoreo para evaluar la calidad del agua subterránea, utilizando una red de sensores inalámbricos instalada en trece pozos abiertos. Este sistema midió parámetros como la temperatura, la turbidez, el oxígeno disuelto, los sólidos disueltos totales y el pH. Compararon los datos obtenidos con los resultados de laboratorio, y aunque se presentaron algunas diferencias entre ambas mediciones, el sistema demostró ser funcional para el seguimiento continuo del estado de los pozos. Los autores señalaron que esta solución resultó útil para la gestión sostenible del recurso hídrico, ya que el monitoreo en tiempo real permitió una mejor planificación y protección del agua destinada al consumo humano, especialmente en zonas rurales con acceso limitado a servicios básicos.

## 2.2. Fundamentos teóricos

### 2.2.1. Monitoreo de la calidad del agua

El monitoreo de la calidad del agua es una actividad de suma importancia para garantizar la disponibilidad de recursos hídricos seguros y sostenibles para las generaciones presentes y futuras. Esta actividad implica analizar distintas características del agua, como sus propiedades físicas, químicas y biológicas, las cuales son fundamentales para evaluar su aptitud en aplicaciones como el consumo humano, el riego agrícola y la preservación de los ecosistemas (Vatitsi et al., 2024).

#### 2.2.1.1. Rol del monitoreo hídrico en la salud

El monitoreo de los parámetros fisicoquímicos del agua es fundamental para prevenir riesgos sanitarios, especialmente en zonas rurales donde las fuentes de captación, como ojos de agua, manantiales o pozos, son utilizadas directamente para el consumo humano. La presencia de valores anómalos en indicadores como pH, turbidez o sólidos disueltos puede estar asociada a condiciones que favorecen la aparición de enfermedades gastrointestinales, dermatológicas e infecciones bacterianas.

Diversos estudios y organismos internacionales han documentado la relación directa entre la exposición a agua contaminada y la incidencia de enfermedades infecciosas y crónicas (de Oliveira et al., 2020; OMS, 2023; Wang et al., 2023).

Algunas de las más comunes incluyen:

- **Diarreas agudas:** causadas principalmente por bacterias como *Escherichia coli*, *Sisella* o *Salmonella*, presentes en agua con alta carga de materia orgánica o turbidez elevada.
- **Cólera:** enfermedad diarreica grave producida por *Vibrio cholerae*, asociada al consumo de agua no tratada.
- **Fiebre tifoidea:** causada por *Salmonella typhi*, relacionada con contaminación fecal del recurso hídrico.
- **Hepatitis A y E:** infecciones virales que se transmiten por agua contaminada con desechos humanos
- **Leptospirosis:** transmitida por bacterias presentes en orina de animales, que pueden infiltrarse en aguas estancadas o superficiales.
- **Dermatitis de contacto:** inducida por compuestos químicos, pH fuera del rango neutro o exceso de sólidos disueltos totales.
- **Parasitismo intestinal como giardiasis, amebiasis, criptosporidiosis:** enfermedades frecuentes en contextos rurales, originadas por el consumo de agua con protozoarios o huevos de parásitos.

El seguimiento sistemático de estos parámetros permite identificar tempranamente amenazas potenciales, contribuyendo a proteger la salud pública y a evitar brotes por contaminación hídrica.

#### **2.2.1.2. Normativa técnica sobre calidad del agua y monitoreo ambiental**

La evaluación de la calidad del agua debe regirse por marcos normativos que establecen límites permisibles para los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y biológicos del recurso, a fin de garantizar su aptitud para el consumo humano y otras actividades. Estas normas constituyen la base técnica para la validación de datos obtenidos mediante sistemas de monitoreo, especialmente aquellos automatizados.

A nivel internacional, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2023) establece recomendaciones sobre la calidad del agua potable, incluyendo valores guía para parámetros como el pH, turbidez, sólidos disueltos totales, temperatura, nitratos, metales pesados y bacterias coliformes. Estas directrices son utilizadas por países miembros como referencia para sus políticas sanitarias.

En el contexto peruano, existen dos documentos normativos principales que regulan la calidad del agua:

- Decreto Supremo N.º 031-2010-SA – Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, emitido por el Ministerio de Salud (MINSA, 2011) establece los límites máximos permisibles para agua destinada al consumo directo.
- Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM – Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, publicado por el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2017) define criterios de calidad para cuerpos de agua superficial, en función de su uso como abastecimiento, riego, recreación, conservación de flora/fauna.

#### **2.2.1.3. Parámetros en la evaluación de la calidad del agua**

Los parámetros de calidad del agua son elementos esenciales para determinar el estado de los cuerpos hídricos y su capacidad para diferentes usos, los parámetros fisicoquímicos más comúnmente monitoreados según normativa técnica son:

- **pH:** Indica el nivel de acidez o alcalinidad del agua. Un pH fuera del rango puede generar efectos corrosivos o favorecer la proliferación de microorganismos patógenos (Jan et al., 2021).
- **Turbidez:** Mide la presencia de partículas suspendidas. Valores superiores limite pueden ocultar microorganismos y afectar los procesos de desinfección (Suzuki et al., 2018).
- **Temperatura:** Influye en la solubilidad del oxígeno, la velocidad de reacciones químicas y la actividad biológica (Jan et al., 2021).

- **Sólidos Disueltos Totales (TDS):** Representan la carga iónica total del agua, relacionada con su sabor y potabilidad (Jan et al., 2021).
- **Conductividad Eléctrica (CE):** Evalúa la capacidad del agua para conducir electricidad, asociada a la concentración de sales y minerales (Nishan et al., 2024).

#### **2.2.1.4. Umbrales de calidad según normas**

La evaluación de la calidad del agua se basa en estándares técnicos que definen rangos permisibles para cada parámetro relevante. En el caso del agua para consumo humano, normativas como las emitidas por el Ministerio de Salud (MINSA, 2011) o el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2017) establecen límites claros para pH, turbidez, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos entre otros parámetros. Por ejemplo, un valor de pH fuera del rango de 6.5 a 8.5 puede indicar condiciones corrosivas o alcalinas que afectan la potabilidad, mientras que una turbidez superior a 5 UNT puede ocultar la presencia de microorganismos patógenos. El uso de estos umbrales normativos permite una interpretación objetiva de los datos recolectados durante procesos de monitoreo.

#### **2.2.1.5. Limitaciones del monitoreo convencional y necesidad de automatización**

El monitoreo tradicional de la calidad del agua, basado en la recolección manual de muestras y su posterior análisis en laboratorio, presenta limitaciones logísticas, temporales y económicas, particularmente en áreas de difícil acceso (Das & Jain, 2017). La dependencia de transporte especializado, la conservación de las muestras y los tiempos de espera para obtener resultados representan obstáculos para una vigilancia oportuna. Por lo que, la automatización mediante tecnologías de medición in situ surge como una solución eficiente para obtener datos en tiempo real, reducir costos operativos y mejorar la capacidad de respuesta ante situaciones de riesgo (Adu-Manu et al., 2017).

#### **2.2.1.6. Análisis de datos para interpretar la calidad del agua**

La interpretación de datos provenientes de sensores que monitorean la calidad del agua no debe limitarse a la simple lectura puntual de valores. Para obtener conclusiones significativas, es necesario aplicar técnicas estadísticas que permitan identificar patrones, comportamientos atípicos y niveles de riesgo en distintos contextos temporales y espaciales.

En este sentido, el análisis estadístico descriptivo permite caracterizar el comportamiento general de cada parámetro mediante:

- Media y mediana: para conocer la tendencia central de los valores recolectados.
- Desviación estándar y varianza: para analizar la dispersión de los datos respecto a la media.

- Mínimo y máximo: útiles para determinar los valores extremos y compararlos con los límites normativos.
- Rango intercuartílico (IQR) y cuartiles (Q1 y Q3): para observar la distribución de los datos y detectar posibles valores atípicos.
- Histogramas y gráficos de densidad: permiten visualizar la forma de distribución de cada variable.
- Matriz de correlación: útil para explorar relaciones lineales entre variables como conductividad eléctrica, TDS y temperatura.

Estas herramientas permiten no solo diagnosticar el estado actual del recurso hídrico, sino también establecer criterios de referencia y evaluación continua de su comportamiento.

### **2.2.2. Sistema de monitoreo IoT**

Los sistemas IoT han transformado por completo la metodología tradicional utilizada para evaluar la calidad de estos recursos, brindando una alternativa mucho más eficiente y moderna frente a los enfoques convencionales, los cuales a menudo son más lentos, costosos y limitados en su alcance y capacidad de respuesta ante posibles variaciones o problemas (Haque et al., 2021).

#### **2.2.2.1. Arquitectura general del sistema IoT**

Los sistemas de monitoreo hídrico basados en tecnología IoT se estructuran sobre plataformas embebidas que integran sensores, microcontroladores, módulos de comunicación y almacenamiento de datos. Estas arquitecturas permiten capturar información ambiental de manera continua y remota, adaptándose a contextos rurales con acceso limitado a internet o energía eléctrica. Una estructura típica contempla una unidad central de procesamiento, sensores de parámetros fisicoquímicos, y mecanismos de transmisión como módulos GSM, LoRa, Wifi, optimizados para bajo consumo y alta autonomía operativa (Sung et al., 2021).

#### **2.2.2.2. Selección y funcionamiento de componentes**

La selección de sensores en un sistema IoT de monitoreo hídrico debe atender criterios técnicos como precisión, estabilidad, compatibilidad con plataformas embebidas y facilidad de calibración (Bogdan et al., 2023). En aplicaciones rurales o de difícil acceso, resulta esencial emplear dispositivos robustos, con bajo consumo energético y facilidad de integración.

Este tipo de sensores, tanto analógicos como digitales, permite la medición precisa de parámetros como pH, turbidez, conductividad eléctrica, sólidos disueltos y temperatura. Todos ellos presentan compatibilidad directa con plataformas como Arduino, gracias a

sus rangos operativos definidos y bibliotecas de programación disponibles (Sugiharto et al., 2023).

Algunos de estos sensores requieren calibración:

- pH: Calibración con soluciones buffer de dos puntos, a fin de asegurar lecturas precisas dentro del rango permisible para consumo humano.
- CE: Calibración con solución estándar de uno o dos puntos para reflejar con fidelidad la concentración iónica del agua.
- TDS y Turbidez: Emplean ecuaciones de conversión preconfiguradas en sus respectivas bibliotecas, lo que facilita su implementación sin necesidad de calibración adicional en condiciones estándar.
- Temperatura: incorpora calibración interna de fábrica y opera bajo protocolo OneWire, sirviendo además como compensador térmico para las lecturas de los demás sensores.

De tal modo permite obtener mediciones confiables, en tiempo real, de las variables fisicoquímicas más relevantes para determinar la calidad del agua. Su selección responde no solo a criterios técnicos, sino también a la necesidad de mantener un balance entre eficiencia operativa, bajo costo y aplicabilidad en contextos rurales.

Por otro lado, el microcontrolador cumple un rol central como unidad de procesamiento y control dentro del sistema embebido. En este tipo de aplicaciones, es común el uso de placas Arduino, especialmente modelos como el Arduino Mega 2560, debido a su amplio número de pines de entrada/salida, compatibilidad con múltiples sensores simultáneamente y soporte para protocolos de comunicación como UART, SPI y OneWire.

### **2.2.2.3. Mecanismos de captura, almacenamiento y envío de datos**

En un sistema IoT de monitoreo hídrico, el flujo de datos desde el sensor hasta su destino final debe estar cuidadosamente estructurado para garantizar eficiencia, continuidad y resiliencia. La automatización de este proceso permite generar registros históricos, activar alertas tempranas y facilitar la supervisión remota desde cualquier ubicación geográfica.

Los datos recolectados por los sensores son procesados por un microcontrolador y pueden gestionarse a través de distintos mecanismos complementarios:

- a) **Captura de datos:** Los sensores realizan mediciones en intervalos definidos. Las señales analógicas se digitalizan mediante el conversor ADC del microcontrolador,

mientras que los sensores digitales comunican directamente sus lecturas. Los datos son temporalmente almacenados en variables internas del sistema.

- b) **Almacenamiento local:** Una tarjeta microSD conectada mediante protocolo SPI permite guardar los registros en formato .csv. Esta solución asegura respaldo incluso en ausencia de conectividad, y genera una base de datos local para análisis posteriores (Venkatesh et al., 2024).
- c) **Transmisión de datos en tiempo real:** Dependiendo del tipo de módulo de comunicación implementado, los datos pueden enviarse a plataformas remotas mediante:
  - **GSM/GPRS:** usa redes celulares para enviar datos vía HTTP o MQTT a hojas de cálculo, dashboards o servidores (Venkatesh et al., 2024).
  - **Wi-Fi:** habilita conexión directa a internet en zonas con cobertura, facilitando el envío continuo a bases de datos o servicios web (Lakshmikantha et al., 2021) .
  - **LoRa/LoRaWAN:** tecnología ideal para larga distancia y bajo consumo, usada en redes rurales descentralizadas, con gateways que redirigen los datos a la nube (Bhati et al., 2024) .
- d) **Mecanismos de respaldo y reenvío:** En caso de pérdida temporal de señal, por ejemplo, en módulos GSM, el sistema conserva los datos localmente y verifica periódicamente el estado de la red. Una vez restablecida la conexión, los registros almacenados son reenviados automáticamente, evitando la pérdida de información.

Esta arquitectura híbrida compuesta por sensores, almacenamiento local y transmisión remota garantiza continuidad operativa incluso en entornos adversos, cumpliendo con los principios de redundancia, eficiencia y autonomía energética necesarios en sistemas de monitoreo ambiental instalados en campo.

#### **2.2.2.4. Consideraciones de bajo costo**

Una de las ventajas de las soluciones IoT es la posibilidad de construir prototipos funcionales con componentes de bajo costo y fácil acceso en el mercado local. El uso de microcontroladores como Arduino, sensores y técnicas de fabricación como la impresión 3D permiten reducir significativamente el presupuesto de implementación. Estas características hacen viable la replicación del sistema en comunidades con recursos limitados, promoviendo la democratización del acceso a tecnologías de monitoreo ambiental (Bogdan et al., 2023).

#### **2.2.2.5. Automatización, alertas y análisis inteligente de datos**

Los sistemas IoT modernos incorporan funciones de automatización que permiten realizar evaluaciones en tiempo real sobre los parámetros medidos. Cuando un valor

registrado por el sensor supera los límites permisibles definidos por normativa, el sistema activa alertas automáticas que pueden enviarse a través de mensajes SMS, notificaciones web o registros destacados en bases de datos en la nube (Venkatesh et al., 2024).

Esta lógica condicional, el uso de técnicas de análisis inteligente de datos fortalece la capacidad de vigilancia ambiental y predicción de eventos inusuales (Singh & Walingo, 2024). En particular, el uso de algoritmos no supervisados de aprendizaje automático, como el K-Means, permite agrupar registros en clústeres según su similitud, sin necesidad de etiquetarlos previamente.

Este enfoque es útil para:

- Agrupar muestras de agua según su nivel de calidad
- Detectar comportamientos atípicos o cambios súbitos en los patrones de los datos.
- Facilitar la segmentación espacial o temporal de los registros recolectados.

Para mejorar la interpretación de los resultados de clustering, se puede aplicar también el Análisis de Componentes Principales (PCA), técnica que reduce la dimensionalidad de los datos conservando su variabilidad principal. Esta reducción facilita la visualización gráfica de los clústeres y mejora la comprensión de cómo se agrupan las muestras según variables.

La combinación de automatización, alertas y modelos inteligentes convierte al sistema en una herramienta proactiva para la gestión del recurso hídrico, con capacidad de aprendizaje y adaptación a nuevas condiciones (Bhati et al., 2024).

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Ámbito y condiciones de la investigación

##### 3.1.1. Contexto de la investigación

El estudio se desarrolló en el sector Chuina, que forma parte del distrito de Morales, perteneciente a la provincia y departamento de San Martín. Este sector se caracterizó por una topografía predominantemente plana y un clima cálido-húmedo, con precipitaciones frecuentes durante gran parte del año. Políticamente, el distrito de Morales constituyó una zona de expansión urbana y rural derivada del crecimiento de la ciudad de Tarapoto, con asentamientos progresivos que dieron lugar a nuevos sectores como Chuina. El desarrollo de actividades en este territorio se rigió por las normas municipales y regionales vigentes.



**Figura 1**  
*Departamento de San Martín*



**Figura 2**  
*Provincia de San Martín*



**Figura 3**  
*Distrito de Morales*

##### 3.1.2. Periodo de ejecución

La ejecución del estudio se realizó durante el periodo de enero de 2025 y agosto de 2025.

##### 3.1.3. Autorizaciones y permisos

Se solicitó la autorización correspondiente ante la Junta Administradora de Servicios y Saneamiento, entidad encargada del abastecimiento de agua en la zona. Esta gestión permitió acceder al punto de captación, contando con el acompañamiento del personal autorizado durante las visitas técnicas como se muestra en el **Anexo 1** y **Anexo 2**.

### 3.1.4. Control ambiental y protocolos de bioseguridad

La ejecución del presente proyecto no ocasionó impactos en el entorno natural ni implicó interacción física significativa con los participantes. La instalación del sistema se realizó en un espacio abierto, respetando las condiciones del entorno natural. Por lo que no fue necesario implementar controles ambientales específicos ni aplicar protocolos adicionales de bioseguridad.

### 3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales

Se respetó los principios éticos generales establecidos para los proyectos científicos. Se garantizó la integridad de la información recolectada, la cual se registró con objetividad y transparencia. Se respetó a la comunidad local del sector Chuina, informando sobre los objetivos y alcances del estudio y asegurando que la implementación del sistema no afectara su bienestar. Asimismo, se protegió el ecosistema natural de la fuente hídrica mediante el uso de tecnologías no invasivas. La investigación promovió la beneficencia al ofrecer una herramienta que contribuyó a la mejora de la gestión del agua.

## 3.2. Sistema de variables

### 3.2.1. Variables principales

A partir de los objetivos específicos, se identificaron las siguientes variables:

**Variable dependiente:** Monitoreo de la calidad del agua

**Variable independiente:** Sistema de monitoreo IoT

**Tabla 1**

*Descripción de variables por objetivo específico*

<b>Objetivo específico Nº 1:</b> Determinar el rango mínimo y máximo de los parámetros fisicoquímicos de la zona de captación del recurso hídrico.			
Variable abstracta	Variable concreta	Medio de registro	Unidad de medida
Monitoreo de la Calidad del agua	Nivel de pH	Sensor de pH	Unidades de pH
	Turbidez	Sensor de turbidez	NTU
	Conductividad eléctrica	Sensor de conductividad	μS/cm
	Temperatura	Sensor de temperatura	°C
	Sólidos Totales Disueltos	Sensor de TDS	mg/L

---

**Objetivo específico № 2:** Implementar un sistema de bajo costo que integre sensores para medir pH, turbidez, temperatura, sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica, basado en tecnología IoT.

---

Variable abstracta	Variable concreta	Medio de registro	Unidad de medida
Sistema de monitoreo IoT	Implementación del sistema.	Manuales y guías de usuario	Und.

---

### 3.3. Procedimientos de la investigación

#### 3.3.1. Diseño de la investigación

La investigación se clasificó como aplicada, ya que su propósito principal estuvo orientado a la solución de un problema práctico, relacionado con la deficiencia de monitoreo de la calidad del agua (Tamayo y Tamayo, 2004). Para fines del estudio, se aplicaron conocimientos en arquitectura de soluciones tecnológicas, integración de sensores, electrónica digital, comunicaciones inalámbricas y análisis exploratorio de datos mediante técnicas de aprendizaje automático no supervisado, con el fin de diseñar e implementar un sistema funcional basado en tecnología IoT.

Presentó un nivel descriptivo al enfocarse en la caracterización cuantitativa de los parámetros fisicoquímicos del agua mediante mediciones sistemáticas en campo (Hernández Sampieri, 2014).

La población del estudio se constituyó por el por el conjunto total de datos generados por el sistema IoT, correspondientes a los parámetros fisicoquímicos del agua en el sector Chuina. Estos incluyeron pH, turbidez, temperatura, sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica, estos valores se recolectaron en tiempo real mediante sensores de bajo costo instalados en campo.

Dado el enfoque instrumental y aplicado de la investigación, se estableció que la población y la muestra coincidieran, ya que se trabajó con la totalidad de los datos generados por el prototipo. El análisis se centró en la recolección sistemática, validación tratamiento estadístico de estas mediciones (Fred N. Kerlinger & Howard B. Lee, 2002).

Se utilizó un diseño censal no probabilístico. Además, la unidad muestral correspondió a cada medición registrada por los sensores en campo. (Fred N. Kerlinger & Howard B. Lee, 2002).

Se aplicó un enfoque cuantitativo. Se calcularon medidas de tendencia central y dispersión, como media, desviación estándar, mediana, cuartiles y rango intercuartílico. Además, se emplearon algoritmos de agrupamiento no supervisado y reducción de dimensionalidad para clasificar los registros (Fred N. Kerlinger & Howard B. Lee, 2002).

Los resultados se representaron mediante tablas, histogramas, gráficos de dispersión y diagramas de clústeres. También se incluyeron visualizaciones que permitieron evidenciar patrones multivariados y desviaciones respecto a valores normativos (Hernández Sampieri, 2014).

Los datos se procesaron en SPSS para el análisis estadístico descriptivo. Para el análisis multivariado, se utilizó Google Colab con Python. Se emplearon bibliotecas como Pandas, Scikit-learn y Matplotlib. Los registros fueron previamente limpiados y estandarizados.

### 3.3.2. Actividades del objetivo específico 1: Determinar el rango mínimo y máximo de los parámetros fisicoquímicos de la zona de captación del recurso hídrico

Con el objetivo de establecer los valores mínimo y máximo de los parámetros fisicoquímicos en la zona de captación del recurso hídrico, se priorizaron los indicadores de pH, turbidez, temperatura, sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica. Se consultaron los Estándares de Calidad del Agua para Consumo Humano del Ministerio de Salud (Ministerio de Salud, 2011) y los Estándares de Calidad Ambiental para Agua del (MINAM, 2017) a fin de contar con criterios normativos para la adecuada interpretación de los datos obtenidos.

En la siguiente Tabla 2 se muestran los rangos de referencia establecidos por las normativas para cada uno de los parámetros priorizados en el estudio.

**Tabla 2**  
*Límites máximos y mínimos*

LÍMITE MAXIMOS Y MINIMOS PERMISIBLES DE PARAMETROS			
Parámetros	Unidad de Medida	Límite mínimo permisible	Límite máximo permisible
1. Turbidez	UNT	-	<5
2. pH	Valor de pH	6,5	8,5
3. Conductividad	mS/cm	-	<1,5
4. Solido totales disueltos	mg/L	-	<1 000
5. Temperatura	°C	15	30

Con la finalidad de evaluar la calidad del agua y generar una línea base de referencia, se aplicó un procedimiento sistemático que abarcó desde la captación hasta la obtención de resultados de laboratorio. Este proceso representado en la **Figura 4**, comprendió cinco fases: zona de captación, recolección de muestras, transporte, análisis en laboratorio y generación de resultados.



**Figura 4**  
*Procedimiento para análisis en laboratorio*

### 3.3.2.1. Zona de captación

La zona de captación correspondió a un ojo de agua, que constituye la única fuente disponible del recurso hídrico en el área de estudio. Dado su uso directo por parte de la población local, esta fuente se tomó como referencia principal para la recolección y análisis de las muestras en el presente proyecto.

### 3.3.2.2. Recolección de muestras

Se recolectó una muestra inicial de 10 litros de agua, la cual fue destinada al Laboratorio Referencial Regional de San Martín para realizar análisis fisicoquímicos, bacteriológicos y parasitológicos, en concordancia con la normativa sanitaria vigente (Venkatesh et al., 2024). Posteriormente, se recogieron tres muestras adicionales de 500 ml bajo diferentes condiciones climáticas, con el objetivo de observar la variabilidad natural de los parámetros fisicoquímicos seleccionados.

### 3.3.2.3. Transporte de muestras

Las muestras se trasladaron en envases esterilizados y se conservaron bajo condiciones adecuadas de temperatura, minimizando el tiempo de traslado para evitar alteraciones. La muestra inicial se envió al laboratorio referencial, mientras que las muestras climáticas se analizaron en el Laboratorio de Suelos y Agua de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de San Martín.

### 3.3.2.4. Análisis en laboratorio

En el laboratorio referencial se efectuaron análisis integrales para determinar si el agua era apta para consumo humano. En el laboratorio universitario, en cambio, se realizaron

únicamente pruebas sobre los parámetros fisicoquímicos definidos en función de los objetivos del sistema de monitoreo.

### 3.3.2.5. Resultados

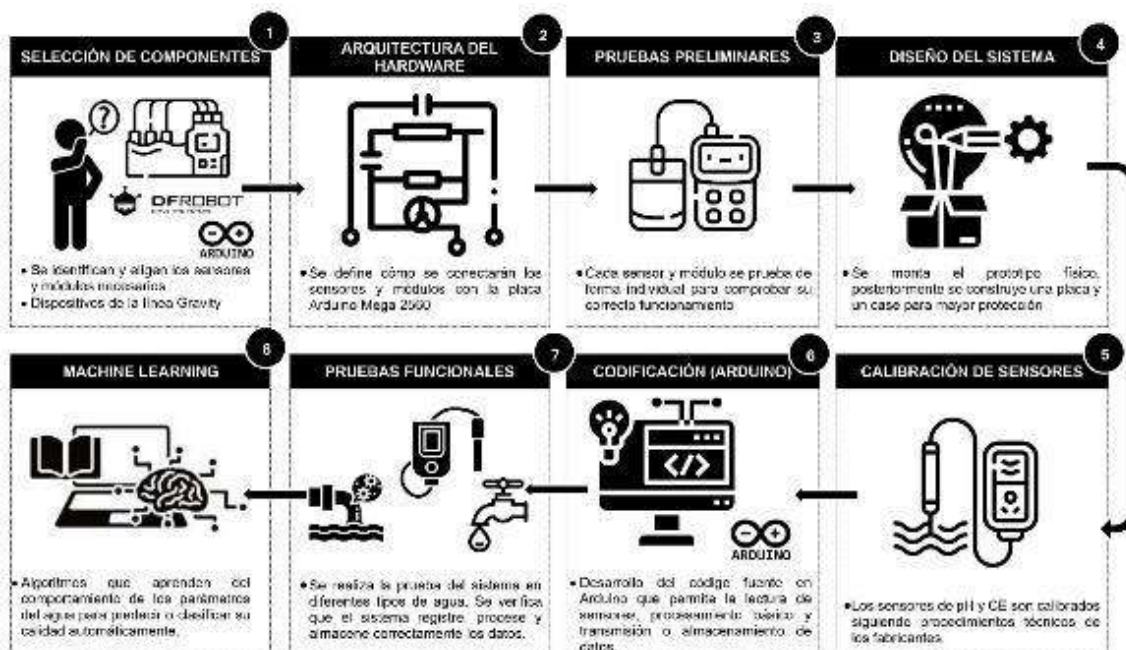
Los análisis permitieron obtener datos representativos que caracterizan la calidad del agua en la zona de captación. Esta información fue fundamental tanto para conocer el estado actual del recurso como para servir de referencia en la validación del sistema de monitoreo IoT, contrastando los valores obtenidos por los sensores con los resultados de laboratorio.

De esta manera, se completó el procedimiento correspondiente al Objetivo Específico 1

### 3.3.3. Actividades del objetivo específico 2: Implementar un sistema de bajo costo que integre sensores para medir pH, turbidez, temperatura, sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica, basado en tecnología IoT

Para llevar a cabo la implementación del sistema IoT funcional, autónomo y de bajo costo se desarrolló una arquitectura embebida que integra sensores específicos, módulos de comunicación y almacenamiento, y una lógica de control adaptada a entornos rurales. Para ello, se siguió un procedimiento estructurado que permitió pasar desde la selección de componentes hasta asegurar la operatividad del sistema en condiciones reales.

La **Figura 5** muestra el diagrama de secuencia correspondiente a este proceso, donde se esquematizan las principales etapas y su interacción en el desarrollo del sistema embebido.



**Figura 5**  
Esquematizan de principales etapas

### 3.3.3.1. Selección de componentes

Se optó por el uso de sensores analógicos y digitales compatibles con la plataforma Arduino. La selección se basó en criterios de precisión, disponibilidad comercial, bajo consumo energético y facilidad de integración, priorizando aquellos pertenecientes a la línea Gravity por su confiabilidad en proyectos educativos y prototipos IoT (Lal et al., 2024; Lu et al., 2024).

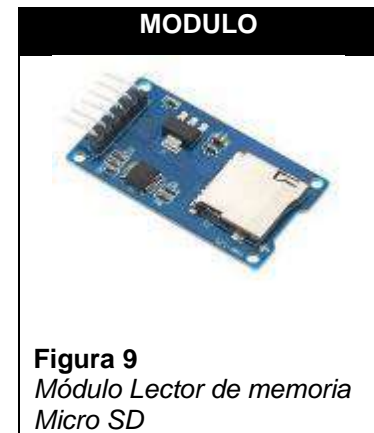
Los componentes utilizados se detallan a continuación:

- Sensor de conductividad eléctrica (K=10) Gravity
- Sensor de pH Gravity V2
- Sensor de TDS Gravity
- Sensor de Turbidez Gravity
- Sensor DS18B20
- Placa de desarrollo Arduino Mega 2560
- Módulo de comunicación GSM SIM800L
- Módulo de almacenamiento MicroSD

La **Figura 6**, **Figura 7**, **Figura 8**, **Figura 9** muestran los sensores y módulos empleados en la construcción del prototipo.



**Figura 6**  
*Sensores Utilizados*



### 3.3.3.2. Arquitectura del hardware

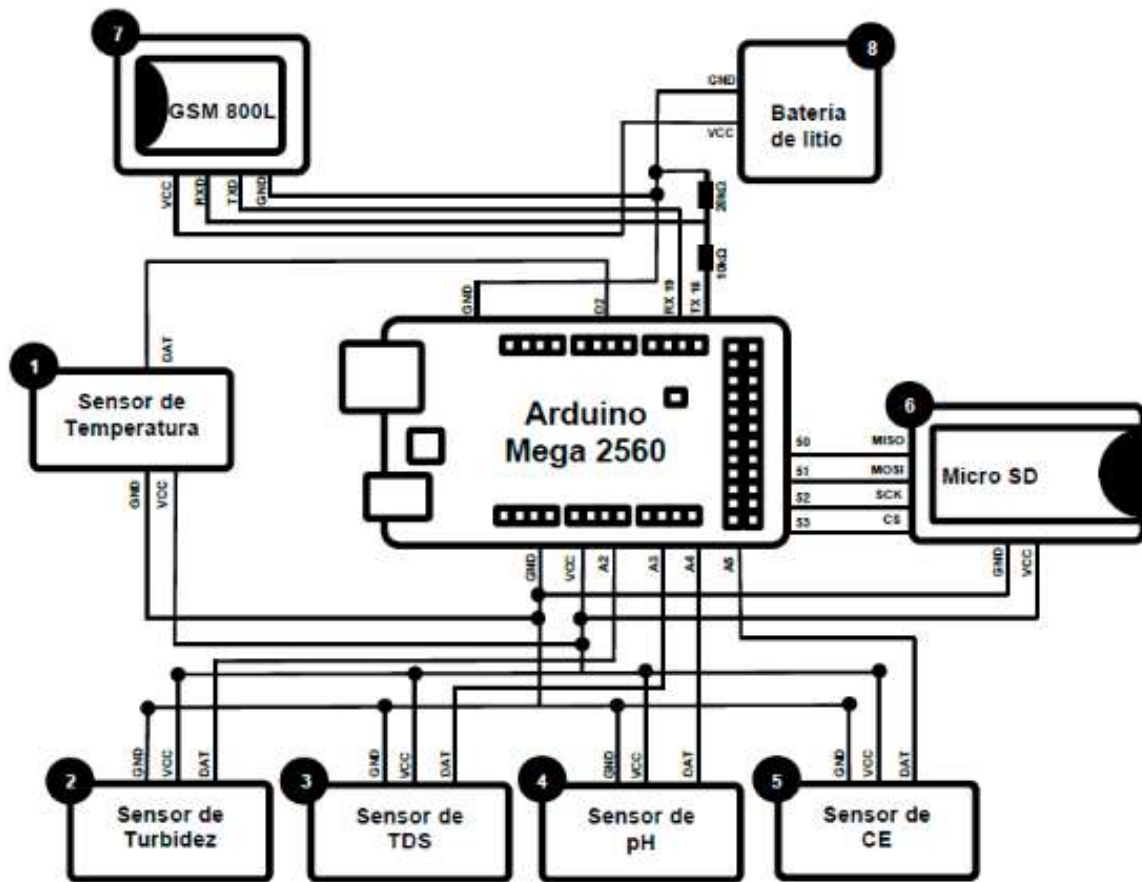
La arquitectura del hardware se estructuró mediante la interconexión de los sensores mencionados con la placa Arduino Mega 2560, haciendo uso de pines analógicos, digitales, SPI y UART, según el tipo de comunicación requerido por cada componente (Siren et al., 2024). La disposición de los componentes y sus conexiones se esquematiza en la **Figura 10**, donde se representan los módulos numerados del (1) al (8), correspondientes a sensores, almacenamiento y fuente de alimentación.

Sensor de *temperatura* DS18B20 (1) se conectó al pin digital 2 mediante protocolo OneWire; el sensor de *turbidez* (2) al pin analógico A2; el sensor de *TDS* (3) al pin analógico A3; el sensor de *pH* (4) al pin analógico A4; y el sensor de *conductividad eléctrica* (5) al pin analógico A5.

El *módulo de almacenamiento MicroSD* (6) se conectó a los pines SPI del Arduino: MISO al pin 50, MOSI al 51, SCK al 52 y CS al 53.

Finalmente, el *módulo de comunicación GSM SIM800L* (7) se conectó mediante puerto serial, enlazando su TX al pin 19 (RX1) y su RX al pin 18 (TX1) del Arduino.

Todos los componentes del (1-6) compartieron una fuente común de alimentación de 5V (VCC) y conexión a tierra (GND). Por su parte, el componente (7) funcionó a 3.7V, suministrado por una fuente de alimentación externa-componente (8), diseñado para ofrecer la tensión adecuada de forma estable y segura.

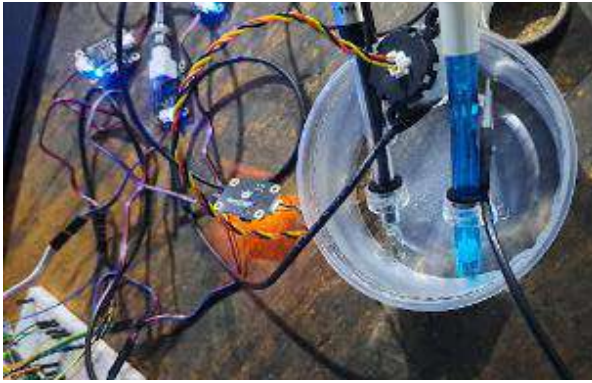


**Figura 10**  
*Arquitectura física del sistema*

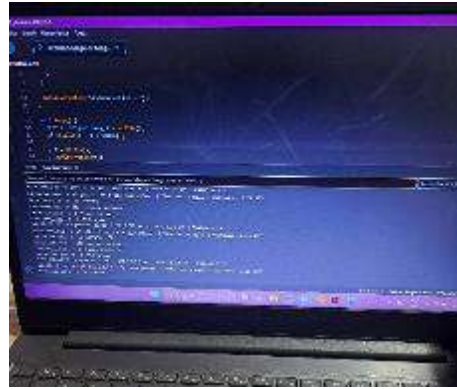
### 3.3.3.3. Pruebas preliminares de hardware.

Antes del ensamblaje completo del sistema, se llevaron a cabo pruebas de funcionamiento individual para cada uno de los sensores y módulos seleccionados. El objetivo de estas pruebas fue verificar su operatividad, rango de respuesta y estabilidad en las lecturas, asegurando así su idoneidad para la integración en el sistema IoT propuesto (Lal et al., 2024).

Aunque el hardware completo ya estaba ensamblado, se cargó código de prueba específico para cada sensor de forma independiente, a fin de comprobar su respuesta y comportamiento esperado. La **Figura 11** muestra el montaje general del sistema durante las pruebas preliminares, y la **Figura 12** presenta una captura del monitor serial del entorno Arduino IDE con los datos emitidos por uno de los sensores.



**Figura 11**  
*Montaje del sistema en pruebas preliminares*



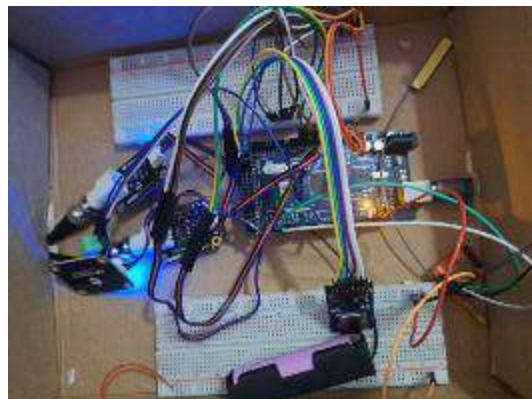
**Figura 12**  
*Captura del monitor serial durante prueba de sensores*

Estas pruebas permitieron detectar posibles inconsistencias tempranas, definir rangos operativos seguros y establecer parámetros de referencia que sirvieron de base para la programación y calibración posterior del sistema.

#### **3.3.3.4. Diseño del sistema**

El prototipo inicial del sistema estuvo compuesto por dos placas protoboard, que funcionaron como buses de corriente común para la interconexión de los módulos y sensores, esta configuración permitió una validación preliminar del esquema. Sin embargo, durante esas pruebas se identificaron problemas de inestabilidad eléctrica e interferencias en las señales, desconexiones accidentales, atribuibles a la naturaleza temporal y sensible de este tipo de conexiones.

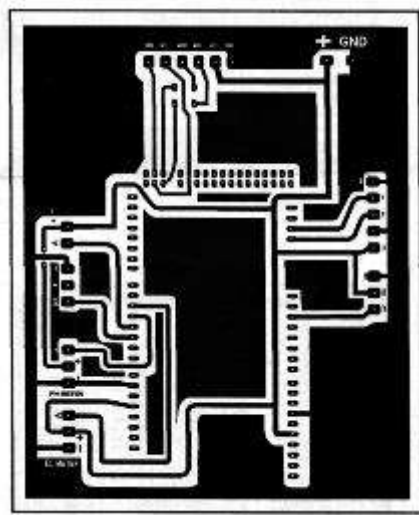
La **Figura 13** muestra el montaje del primer prototipo sobre protoboards, utilizado en la fase de prueba preliminar del hardware.



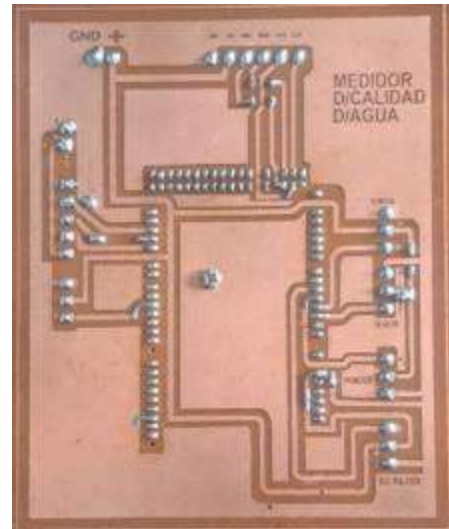
**Figura 13**  
*Prototipo inicial*

Posteriormente se migró a una placa de circuito impreso (PCB) con conexiones soldadas, lo que permitió mejorar significativamente la robustez estructural del sistema, garantizar la estabilidad operativa del prototipo, haciéndolo apto para condiciones reales de campo (Bogdan et al., 2023).

La **Figura 14** muestra el diseño del PCB realizado para la organización de los componentes, mientras que la **Figura 15** presenta la placa de circuito impreso ya ensamblada con las conexiones soldadas



**Figura 14**  
*Diseño del PCB*



**Figura 15**  
*Placa de circuito impreso*

#### **a) Fabricación del case del prototipo**

Con el objetivo de proteger los componentes electrónicos y facilitar su uso en entornos reales, se diseñó y fabricó un encapsulado físico personalizado utilizando tecnología de impresión 3D. Este diseño buscó no solo mejorar la resistencia estructural y portabilidad del sistema, sino también permitir un montaje ordenado, seguro y reutilizable de los sensores y módulos electrónicos (Jabbar et al., 2024) .

Para su fabricación se empleó filamento PLA blanco mate como se muestra en la **Figura 16**, elegido por su alta rigidez, bajo costo y facilidad de impresión. La impresión se realizó en una **impresora 3D Bambu Lab P1P**, referenciada en la **Figura 17** configurada con boquilla de 0.4 mm y una altura de capa estándar de 0.2 mm.



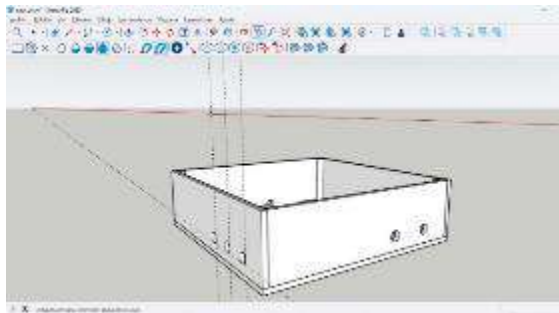
**Figura 16**  
*Filamento PLA blanco mate*



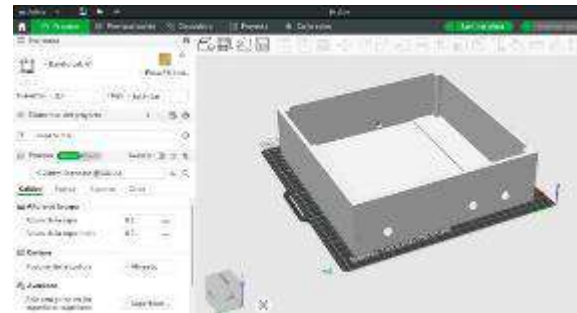
**Figura 17**  
*Impresora 3D Bambu Lab P1P*

La impresión completa del encapsulado requirió aproximadamente 500 gramos de filamento y una duración total de 9 horas con 34 minutos.

El diseño del encapsulado se realizó en el software SketchUp 2025 que se muestra en la **Figura 18**, incorporando ranuras específicas para el paso de cables y sensores, así como. El archivo fue posteriormente procesado en el laminador Bambu Studio como se aprecia en la **Figura 19**, donde se definieron parámetros como densidad de relleno, orientación de impresión y tipo de estructura interna



**Figura 18**  
*Diseño del case en SketchUp 2025*



**Figura 19**  
*Configuración de impresión en Bambu Studio*

### 3.3.3.5. Calibración

Se procedió a calibrar los sensores de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. El sensor de pH se calibró utilizando soluciones buffer de pH 4.00 y 7.00, como se muestra en la **Figura 20** y la **Figura 21**, mientras que el sensor de conductividad eléctrica se calibró empleando una solución estándar de 12.88 mS/cm, tal como se observa en la **Figura 22**, siguiendo las instrucciones proporcionadas en los manuales técnicos de DFRobot (Bogdan et al., 2023; Sugiharto et al., 2023).

Este proceso se realizó sumergiendo el electrodo en las soluciones, asegurando que los ajustes internos del sensor se alinearan con los valores reales



**Figura 20**  
Calibración con solución pH  
4.00



**Figura 21**  
Calibración con solución pH  
7.00



**Figura 22**  
Calibración con solución de  
conductividad 12.88

En ambos casos se calculó el voltaje mediante fórmula, transformando la lectura analógica a milivoltios, tomando como referencia una tensión de trabajo de 5V, se utilizó la función `readEC ()` y `readPH ()` para obtener el valor estimado de pH y conductividad eléctrica, posteriormente, se ejecutó `calibration ()` para activar el modo de ajuste registrar los valores de referencia en memoria.

Fragmento de código empleado para calibrar el sensor de conductividad eléctrica

```
voltaje = analogRead(ecPin)/1024.0*5000;
ecValue = ecSensor.readEC(voltaje, temperature);
ecSensor.calibration. (voltaje, temperature);
```

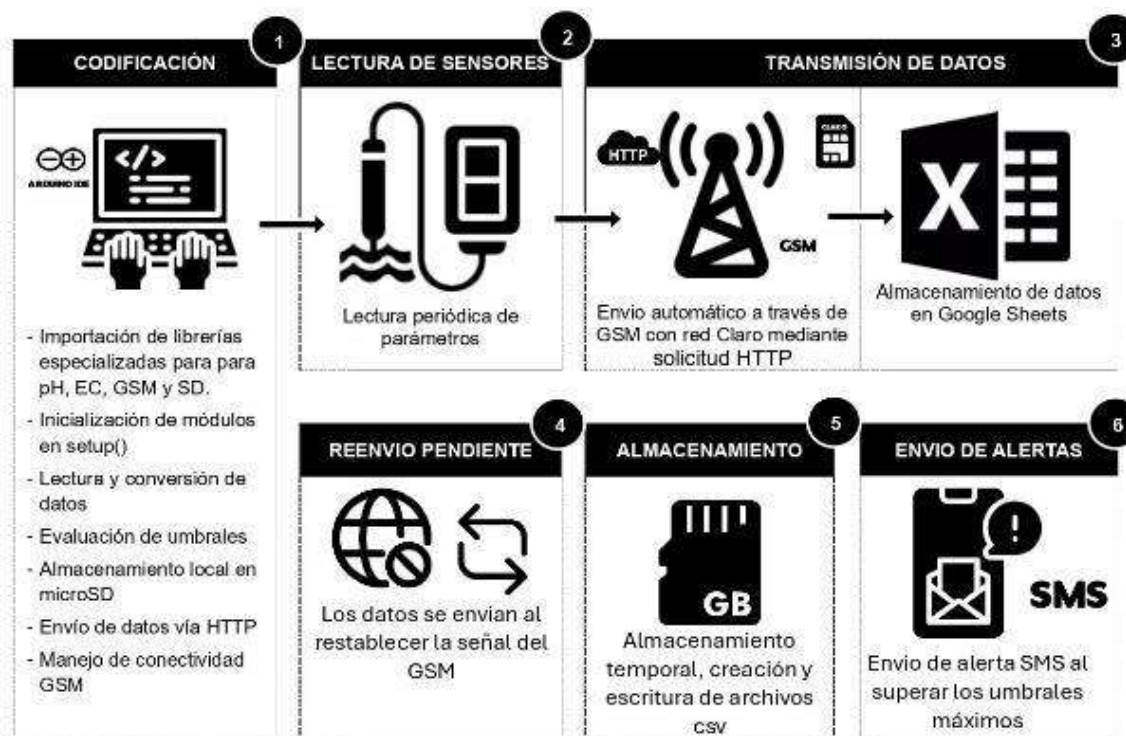
Fragmento de código empleado para calibrar el sensor de pH.

```
voltaje = analogRead(phPin)/1024.0*5000;
phValue = phSensor.readPH (voltaje, millis ());
phSensor.calibration. (voltaje, millis ());
```

Por otro lado, los sensores de turbidez, TDS y temperatura no se calibraron manualmente, ya que, según la documentación técnica oficial del fabricante, estos vienen pre calibrados de fábrica y listos para su uso directo en aplicaciones estándar (Pires & Gomes, 2024). En particular, el sensor de temperatura DS18B20 tiene una calibración interna con precisión de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , mientras que los sensores de TDS y turbidez operan bajo ecuaciones de conversión ya incluidas en sus bibliotecas de software

### 3.3.3.6. Codificación del sistema embebido

Con los sensores ya calibrados en la **Figura 23**, se sintetiza de forma gráfica la lógica interna del microcontrolador. En ella se visualizan las fases de inicialización, adquisición de datos, transmisión por red GSM, almacenamiento en microSD/Google Sheets y generación de alertas SMS.



**Figura 23**  
Arquitectura lógica del sistema embebido

La lógica del sistema se programó en el entorno de desarrollo Arduino IDE, permitiendo estructurar la secuencia de lectura, procesamiento y transmisión de los parámetros medidos por los sensores, bajo criterios condicionales previamente definidos.

#### a) Codificación

En esta etapa se importaron las librerías especializadas para el manejo de los sensores y los módulos de almacenamiento y comunicación. Se inicializaron los módulos en la función setup () y se programó la lectura periódica de datos, su conversión a valores interpretables y la evaluación de los umbrales establecidos para cada parámetro. Asimismo, se implementó el almacenamiento local en la tarjeta microSD, el envío de datos mediante protocolo HTTP y la gestión de la conectividad GSM.

- **Inclusión de librerías y definición de pines**

Se incluyeron las librerías para la gestión de sensores analógicos y digitales: medición de pH, conductividad eléctrica, temperatura con protocolo OneWire, almacenamiento en microSD y comunicación con el módulo SIM800L

```
#include "DFRobot_PH.h"
#include "DFRobot_EC10.h"
#include <EEPROM.h>
#include <SD.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
```

Se definieron los pines analógicos utilizados para la conexión de sensores, así como los pines digitales para el sensor de temperatura y tarjeta microSD y el puerto serie utilizado por el módulo SIM800L

```
#define EC_PIN A5
#define PH_PIN A4
#define TDS_PIN A3
#define TURBIDEZ_PIN A2
#define SD_CS_PIN 53
#define ONE_WIRE_BUS 2
#define SIM800_TX 18
#define SIM800_RX 19
```

- **Inicialización de objetos de sensores y archivos**

Se instanciaron los objetos necesarios para acceder a las funciones de cada sensor y periférico

```
DFRobot_PH ph;
DFRobot_EC10 ec;
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
HardwareSerial &sim800 = Serial1;
File dataFile;
```

- **Función setup () - Inicialización del sistema**

Se configuraron todos los periféricos del sistema y esto incluye:

Inicio del puerto serie del módulo GSM

```
Serial.println("Iniciando SIM800...");
sim800.println("AT");
delay(1000);
sim800.println("ATE0");
delay(1000);
sim800.println("AT+CPIN?");
delay(1000);
sim800.println("AT+CREG?");
delay(1000);
```

Configuración de perfil GPRS (AT+SAPBR)

```
sim800.println("AT+SAPBR=3,1,\"Contype\",\"GPRS\");
delay(1000);
sim800.println("AT+SAPBR=3,1,\"APN\",\"claro.pe\");
delay(1000);
sim800.println("AT+SAPBR=1,1");
delay(5000);
sim800.println("AT+SAPBR=2,1");
delay(2000);
```

Inicialización de la tarjeta SD y creación del archivo datalog.csv con los encabezados de los parámetros medidos

```
Serial.print("Iniciando tarjeta SD...");
if (!SD.begin(SD_CS_PIN)) {
  Serial.println("Fallo en SD!");
}
```

```

} else {
  Serial.println("SD lista.");
  if (!SD.exists("datalog.csv")) {
    SD.remove("datalog.csv");
    dataFile = SD.open("Datos_Recolectados.csv", FILE_WRITE);
    if (dataFile) {
      dataFile.println("Temp_C,pH,EC_uS,TDS_mgL,Turbidez_NTU,Alerta");
      dataFile.close();
    }
  }
}
}
}

```

## b) Lectura de sensores

Se configuró la lectura periódica de los sensores, los cuales registraron parámetros de del agua. Esta lectura se ejecutó de manera continua con intervalos definidos.

- **Estructura del ciclo loop ()**

Se programó una pausa de 5 minutos entre cada medición para evitar lecturas innecesarias y optimizar el consumo energético

```

if (millis() - t > 300000) {
  t = millis();
  medirYProcesar ();
}

```

- **Función medirYProcesar () - núcleo del sistema**

En esta sección se realizó la lectura de parámetros de los sensores

```

float tempC = sensors.getTempCByIndex(0);
float valorPH = ph.readPH(analogRead(PH_PIN) * (5000.0/1024.0), tempC);
float valorEC_uS = ec.readEC(analogRead(EC_PIN * (5000.0/1024.0), tempC) * 1000.0);
float voltTDS_V = (analogRead(TDS_PIN) * (5000.0/1024.0)) / 1000.0;
float valorTDS = (133.42 * pow(voltTDS_V, 3) - 255.86 * pow(voltTDS_V, 2) + 857.39 * voltTDS_V) * 0.5;
float valorTurb = calcularNTU(analogRead(TURBIDEZ_PIN) * (5.0/1023.0));

```

## c) Transmisión de datos

Los datos recolectados se enviaron automáticamente mediante la red GSM del operador Claro, utilizando una solicitud HTTP POST gestionada a través de Google Apps Script. Esta lógica permitió almacenar los datos en tiempo real en una hoja de cálculo de Google Sheets, facilitando su visualización remota y análisis posterior.

Para ello se construyó un objeto JSON con los datos

```

String postData = "{";
postData += "\"temp\": " + String(tempC, 2) + ",";
postData += "\"ph\": " + String(valorPH, 2) + ",";
postData += "\"ec\": " + String(valorEC_uS, 0) + ",";
postData += "\"tds\": " + String(valorTDS, 2) + ",";
postData += "\"turb\": " + String(valorTurb, 2) + ",";
postData += "}";

```

El módulo GSM envió los datos como contenido JSON a una hoja de cálculo en Google Sheets, alojada en la nube, mediante comandos AT compatibles con HTTP.

```
String url =
"https://script.google.com/macros/s/AKfycbx0ahorXLuCA8e40_PNUtTetx-
u0i1VXPdOdRjIZwN-kxEpnLhKJen4bNm1rLZDm2kGt/exec";

sim800.println("AT+HTTPTERM"); delay(500);
sim800.println("AT+HTTPINIT"); delay(500);
sim800.println("AT+HTTTPARA=\"CID\",1"); delay(500);
sim800.println("AT+HTTTPARA=\"URL\",\"" + url + "\""); delay(1000);
sim800.println("AT+HTTTPARA=\"CONTENT\", \"application/json\"");
delay(500);
sim800.print("AT+HTTPDATA="); sim800.print(postData.length());
sim800.println(",10000"); delay(1000);
sim800.print(postData); delay(1000);
sim800.println("AT+HTTPACTION=1"); delay(5000);
sim800.println("AT+HTTPREAD"); delay(3000);
sim800.println("AT+HTTPTERM"); delay(500);
```

#### d) Reenvío pendiente

En situaciones donde no se detectó cobertura móvil, el sistema intentó reconectarse automáticamente a la red GSM. Durante el tiempo sin conexión, los datos se almacenaron de manera temporal en la memoria microSD. Una vez que se restableció la señal GSM, los registros acumulados se reenviaron automáticamente a la hoja de cálculo

```
bool verificarCobertura() {
  sim800.println("AT+CREG?");
  delay(1000);
  if (sim800.available()) {
    String respuesta = sim800.readString();
    return respuesta.indexOf(",1") != -1 || respuesta.indexOf(",5") != -
1;
  }
  return false;
}
```

#### e) Almacenamiento

La información se almacenó de manera local en archivos .csv generados en la tarjeta microSD. Cada archivo incluyó los valores registrados lo que garantizó el respaldo de la información aun cuando la conectividad estuvo interrumpida.

- **Registro en tarjeta SD**

Los datos se almacenaron en el archivo datalog.csv, separados por comas

```
dataFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);
if (dataFile) {
  dataFile.print(tempC, 2); dataFile.print(",");
  dataFile.print(valorPH, 2); dataFile.print(",");
  dataFile.print(valorEC uS, 0); dataFile.print(",");
  dataFile.print(valorTDS, 2); dataFile.print(",");
  dataFile.print(valorTurb, 2); dataFile.print(",");
  dataFile.close();}
```

## f) Envío de alertas

Cuando alguno de los parámetros monitoreados superó los umbrales máximos definidos en el sistema, se generó automáticamente un mensaje SMS que se envió al número telefónico previamente configurado. Esta función permitió alertar en tiempo real sobre posibles riesgos en la calidad del agua monitoreada.

```
bool alertaPH = (valorPH > 8.5);
bool alertaTDS = (valorTDS > 1000);
bool alertaEC = (valorEC_uS > 1500);
bool alertaTurb = (valorTurb > 5.0);
bool hayAlerta = alertaPH || alertaTDS || alertaEC || alertaTurb;
```

### • Pruebas funcionales

Posteriormente, se realizaron pruebas funcionales en diferentes tipos de agua: agua de grifo, agua salada y agua de pozo proveniente del sector Chuina y agua turbia con el objetivo de verificar la respuesta del sistema en condiciones diversas (Jabbar et al., 2024).

La **Figura 24** presentan las muestras de agua utilizadas en las pruebas funcionales



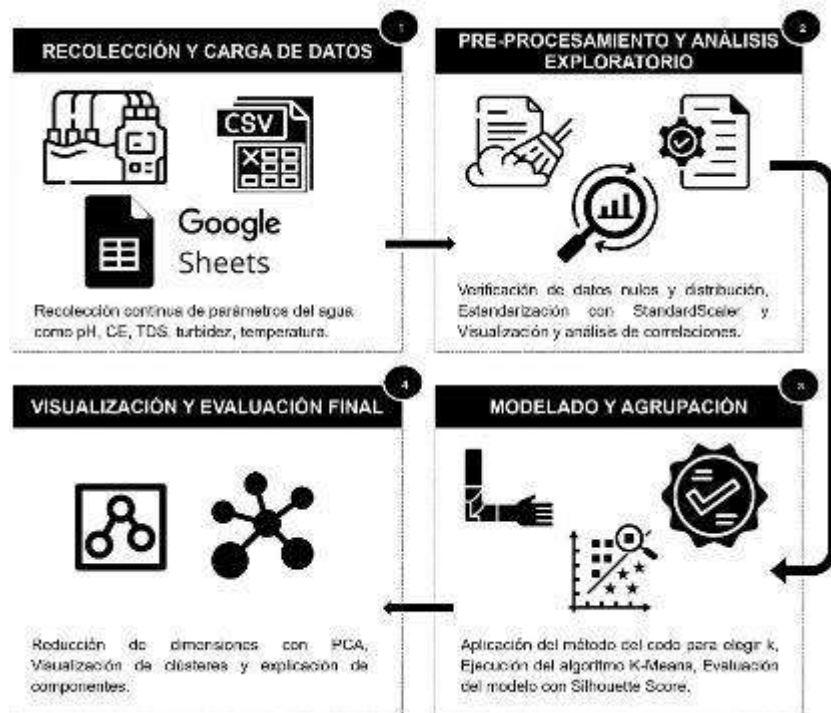
**Figura 24**

*Muestras de agua para pruebas*

Estas pruebas permitieron verificar el comportamiento general del sistema ante diferentes condiciones de agua, confirmando su capacidad de respuesta y lectura en escenarios variados. De este modo, se logró implementar satisfactoriamente un sistema IoT funcional y de bajo costo para la medición de parámetros de calidad de agua, capaz de operar de forma autónoma en entornos rurales.

### 3.3.3.7. Machine Learning

En la **Figura 25** se muestra el flujo metodológico seguido para aplicar técnicas de Machine Learning no supervisado, específicamente clustering con K-Means, utilizando datos que se recolectaron mediante sensores IoT que monitorearon parámetros fisicoquímicos del agua de pozo.



**Figura 25**  
Flujo para la Aplicación de Aprendizaje no Supervisado

### a) Recolección De Carga De Datos

- Librerías

Se importaron las librerías necesarias para manipulación de datos visualización y aplicación de modelos de agrupamiento y reducción de dimensiones

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from sklearn.cluster import KMeans
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from sklearn.decomposition import PCA
from sklearn.metrics import silhouette_score, silhouette_samples
```

- Importación de datos

Se cargó el archivo .csv con los 2880 registros recolectados por sensores IoT.

```
from google.colab import files
uploaded = files.Upload()
df = pd.read_csv("Datos_Recolectados.csv")
df.head()
```

### b) Preprocesamiento Y Análisis Exploratorio

- Análisis Exploratorio de Datos

Se verificó la estructura del dataset, existencia de datos nulos y se realizó resumen estadístico.

```
print("Información general:")
df.info()
print("\nDatos nulos:")
```

```
print(df.isnull().sum())
print("\nResumen estadístico:")
print(df.describe())
print("\nDistribución de variables:")
df.hist(figsize=(10, 6))
plt.tight_layout()
plt.show()
```

- **Análisis de Correlación**

Se exploraron relaciones entre variables mediante una matriz de correlación visualizada con seaborn. Por lo que se construyó una matriz de correlación con el fin de identificar relaciones lineales entre los parámetros fisicoquímicos del agua.

```
plt.figure(figsize=(8, 6))
sns.heatmap(df.corr(), annot=True, cmap='coolwarm')
plt.title("Mapa de Correlación")
plt.show()
```

- **Preprocesamiento de Datos**

Los datos se estandarizaron con StandardScaler para garantizar que todas las variables contribuyan equitativamente al análisis.

```
features = ["Temp_C", "pH", "CE_mS", "TDS_mgL", "Turbidez_NTU"]
scaler = StandardScaler()
X_scaled = scaler.fit_transform(df[features])
```

- **Visualización de Variables**

Se utilizó el gráfico de pares de Seaborn para explorar visualmente la relación entre las variables fisicoquímicas recolectadas y se generó un gráfico de pares para explorar la relación entre los parámetros fisicoquímicos

```
sns.pairplot(df[features])
plt.suptitle("Relaciones entre parámetros", y=1.02)
plt.show()
```

### c) Modelado Y Agrupación

- **K-Means Clustering (Clásico)**

Se aplicó el algoritmo de K-Means sobre los datos estandarizados. Se utilizó el método del codo para seleccionar el número óptimo de clústeres (k), y se evaluó la cohesión interna con el Silhouette Score.

### d) Visualización Y Evaluación Final

- **Análisis de Componentes**

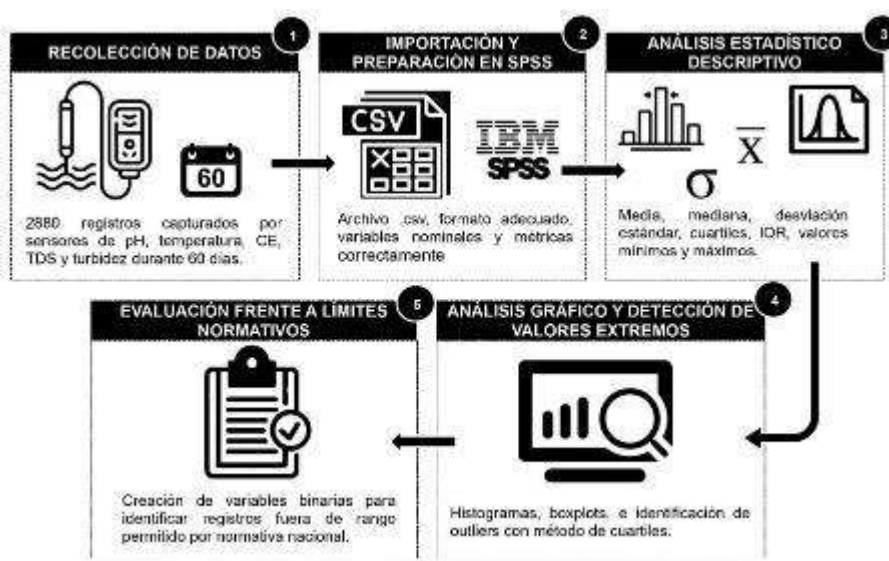
Se aplicó el Análisis de Componentes Principales (PCA) para reducir la dimensionalidad del conjunto de datos y facilitar la visualización de los clústeres. Lo cual permitió representar adecuadamente la variabilidad de los datos en dos dimensiones principales.

- **K-Means sobre Componentes PCA**

Se volvió a aplicar K-Means sobre los datos reducidos a dos componentes. Se graficaron los clústeres para observar su separación.

### 3.3.4. Actividades del objetivo específico 3: Evaluar la efectividad del sistema de bajo costo que utilice tecnología IoT para el seguimiento de la calidad del agua

Para brindar una visión general del proceso seguido en la evaluación de la efectividad del sistema IoT, se ha elaborado la **Figura 26**, la cual resume las etapas del análisis estadístico descriptiva aplicado en este objetivo



**Figura 26**  
*Análisis estadístico descriptivo*

Con el fin de evaluar la efectividad del sistema se ha aplicado un enfoque cuantitativo basado en estadística descriptiva, utilizando el software IBM SPSS Statistics v28.0 como herramienta principal de análisis.

#### 3.3.4.1. Recolección de Datos

Los datos utilizados para esta evaluación provinieron del sistema IoT desarrollado en el Objetivo Específico 2, el cual integró sensores de pH, temperatura, conductividad eléctrica, turbidez y sólidos totales disueltos.

#### 3.3.4.2. Importación y Preparación en SPSS

Se utilizó el software IBM SPSS Statistics v28.0 y se importó el archivo de datos en formato .csv al entorno, asegurando la correcta configuración del separador decimal y delimitador de campo.

#### **3.3.4.3. Análisis estadístico descriptiva**

Se determinó los siguientes indicadores: la media, mediana, mínimo, máximo, desviación estándar, cuartiles (Q1 y Q3), y el rango intercuartílico (IQR) para cada una de las variables registradas.

#### **3.3.4.4. Análisis gráfico**

Se generaron histogramas para observar la forma de distribución de los datos por sensor.

#### **3.3.4.5. Evaluación frente a límites normativos**

Se generaron variables binarias aplicando condiciones lógicas, de acuerdo con los límites máximos y mínimos permisibles establecidos por la normativa nacional sobre calidad de agua.

Se determinó el porcentaje de registros fuera del rango aceptado para cada variable, permitiendo estimar el nivel de confiabilidad del sistema en la captura de datos dentro de condiciones normales.

Este enfoque permitió no solo caracterizar el comportamiento de cada sensor, sino también contrastar su desempeño frente a estándares técnicos, constituyéndose en la base para juzgar la efectividad del sistema de monitoreo implementado.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 1.1. Resultado específico 1: Determinar el rango mínimo y máximo de los parámetros fisicoquímicos de la zona de captación del recurso hídrico

Con el fin de cumplir el objetivo de determinar el rango mínimo y máximo de los parámetros fisicoquímicos del recurso hídrico, se recolectaron y analizaron tres muestras de agua provenientes de la fuente hídrica del Sector Chuina, bajo diferentes condiciones climáticas, durante los meses de marzo, abril y mayo del 2025.

Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Suelos y Agua de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de San Martín. Estos resultados se detallan en la Tabla 3.

**Tabla 3**  
*Parámetros fisicoquímicos del Sector Chuina*

N°	Parámetros	Unidad	Muestra 1 (14/03/2025)	Muestra 2 (15/04/2025)	Muestra 3 (17/05/2025)
1	Temperatura	°C	21,2	24,8	26,5
2	pH	-	6,72	7,05	7,25
3	Conductividad eléctrica	mS/cm	0.940	0.957	0.973
4	TDS	mg/L	616,44	632,29	638,91
5	Turbidez	NTU	1,10	0,65	0,45
6	Punto de muestreo		Acuífero	Acuífero	Acuífero
7	Fecha de muestreo		16/03/2025	15/04/2025	18/05/2025
8	Fecha de reporte		30/03/2025	28/04/2025	30/05/2025

Con base en los valores obtenidos en las tres muestras, se elaboró la **Tabla 4**, en esta se presenta el rango mínimo y máximo observado para cada parámetro fisicoquímico evaluado en las tres muestras, con el fin de establecer los límites naturales de variación de la fuente hídrica durante el período de estudio. Esta información permite contrastar los valores obtenidos con los límites establecidos por la normativa nacional vigente.

**Tabla 4**  
*Rango mínimo y máximo observado*

N°	Parámetro	Unidad	Valor Mínimo Observado	Valor Máximo Observado	Límite	Cumple
1	Temperatura	°C	21,2	26,5	15 – 30	SI
2	pH	—	6,72	7,25	6,5 – 8,5	SI
3	Conductividad eléctrica	mS/cm	0,940	0,973	<1,5	SI
4	Sólidos totales disueltos	mg/L	616,44	638,91	<1 000	SI
5	Turbidez	NTU	0,45	1,1	<5	SI

Los valores obtenidos permitieron determinar el rango de variación natural de cada parámetro fisicoquímico.

Los resultados conseguidos en el análisis de las tres muestras de agua provenientes del Sector Chuina evidencian una buena calidad del recurso hídrico, con parámetros fisicoquímicos que se mantuvieron dentro de los límites permisibles establecidos por los estándares nacionales (MINAM, 2017; MINSAL, 2011). Esta tendencia también se ha observado en estudios recientes que aplicaron métodos de laboratorio para caracterizar la calidad del agua en diferentes entornos naturales y urbanos.

En cuanto a la temperatura, los valores fluctuaron entre 21,2 °C y 26,5 °C, lo que refleja una variación natural asociada a las condiciones climáticas de cada fecha de muestreo. Esta variabilidad se encuentra dentro del rango reportado por (Venkatesh et al., 2024) quienes identificaron temperaturas de 20 °C a 30 °C en muestras de pozos subterráneos. Asimismo, (Jabbar et al., 2024) evidenciaron que la temperatura puede alterarse significativamente cuando las muestras son expuestas a temperaturas ambientales distintas al momento del análisis, lo que puede afectar parámetros como el pH y la conductividad. En este estudio, el control del tiempo de transporte y la pronta medición permitieron preservar la temperatura original de la muestra, minimizando dichos efectos.

Respecto al pH, los valores obtenidos oscilaron entre 6,72 y 7,25, cercanos a la neutralidad. Este rango es coherente con el observado por (Venkatesh et al., 2024) cuyos análisis de laboratorio registraron pH entre 7,30 y 11,59, y por (Jabbar et al., 2024) quienes reportaron valores de pH que variaban entre 6,69 y 9,34 dependiendo del tipo de agua analizada. Jabbar et al. también destacaron que un almacenamiento prolongado puede generar una acidificación del agua debido al consumo de oxígeno por parte de microorganismos presentes. En este sentido, la estabilidad del pH en las muestras refuerza la validez de los procedimientos de recolección y conservación empleados.

En relación con los sólidos totales disueltos los valores variaron entre 616,44 y 638,91 mg/L, lo que indica una baja concentración de sales minerales disueltas. Estos valores se encuentran dentro del rango inferior-medio reportado por (Venkatesh et al., 2024) quienes identificaron concentraciones entre 515 y 1347 mg/L. En contraste (Jabbar et al., 2024) documentaron una amplitud mayor, desde 30 mg/L en agua potable hasta 4500 mg/L en aguas residuales. Esta diferencia resalta la calidad del agua en la zona de estudio y respalda su origen subterráneo poco alterado.

La turbidez también se mantuvo en niveles bajos entre 0,45 y 1,1 NTU, lo que indica escasa presencia de partículas suspendidas. En los estudios de (Jabbar et al., 2024) las muestras de laboratorio presentaron turbidez de hasta 13,3 NTU en aguas residuales, mientras que en agua potable se observó 1,34 NTU. La menor turbidez registrada en el presente

estudio puede explicarse por la ausencia de actividades humanas o vertimientos cercanos a la fuente, así como por la naturaleza protegida del acuífero evaluado.

Finalmente, la conductividad eléctrica osciló entre 0,940 y 0,973 mS/cm, ubicándose en el rango moderado, cercano al umbral superior aceptado para aguas de buena calidad (Jabbar et al., 2024) quienes indican que la conductividad está influenciada directamente por la temperatura, el contenido iónico y la composición química del agua. En este caso, la estabilidad térmica de las muestras contribuyó a la fiabilidad del dato reportado.

Por lo que la comparación con estudios similares respalda la validez de los resultados obtenidos y refuerza la importancia de realizar un control riguroso en el transporte, manejo y análisis de las muestras. Este procedimiento permitió establecer un rango realista de variación natural de los parámetros fisicoquímicos del agua subterránea del Sector Chuina, cumpliendo con lo planteado en el objetivo específico 1.

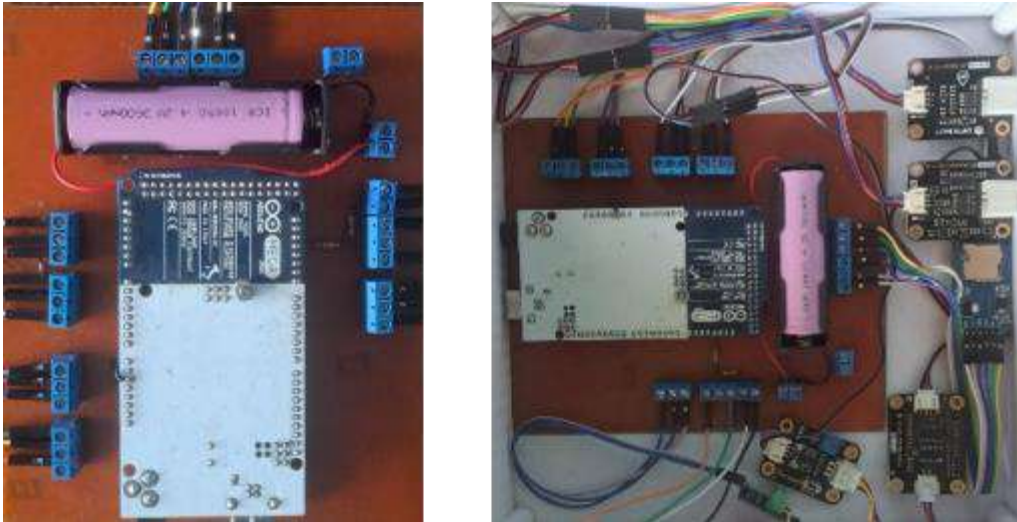
Además del análisis fisicoquímico, se realizó una prueba complementaria en el Laboratorio Referencial Regional de San Martín, utilizando una muestra de 10 litros. El análisis bacteriológico reportó coliformes totales en 4.5 NMP/100 ml, mientras que coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* estuvieron por debajo del límite de detección (<1.8 NMP/100ml), indicando ausencia de contaminación fecal. En el análisis parasitológico no se detectaron parásitos patógenos, aunque se identificaron organismos de vida libre como algas, protozoarios y rotíferos, lo que sugiere una interacción natural con el ecosistema del acuífero

## **1.2. Resultado específico 2: Implementar un sistema de bajo costo que integre sensores para medir pH, turbidez, temperatura, sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica, basado en tecnología IoT**

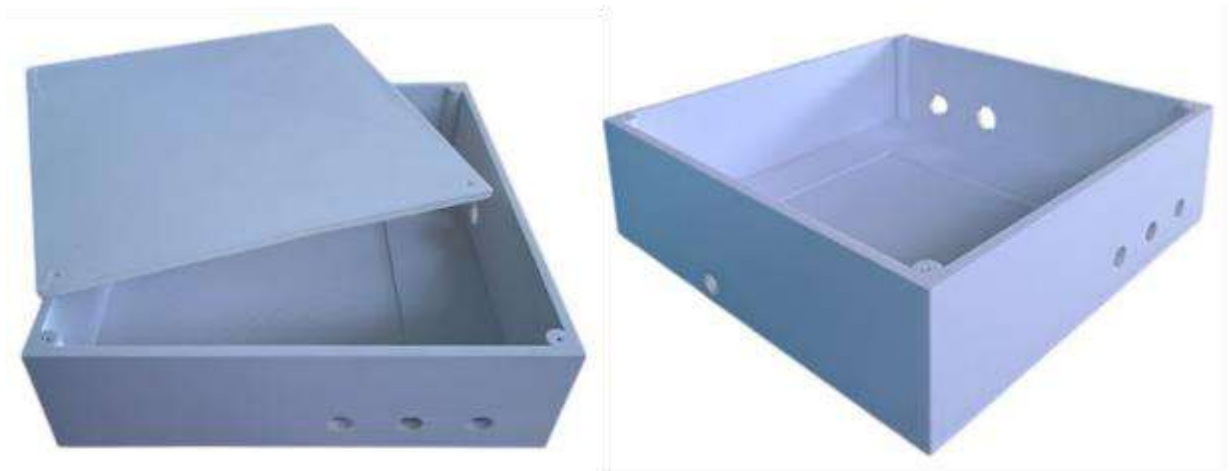
Como resultado de las etapas que abarcan desde la selección de componentes hasta machine learning.

### **1.2.1. Selección de componentes hasta diseño del Hardware**

Se desarrolló un prototipo funcional que combinó sensores y transmisión de datos recolectados, con conexiones soldadas en una placa de circuito impreso (PCB), encapsulado en una caja personalizada fabricada mediante impresión 3D que protegió eficientemente los componentes durante las pruebas en campo. La **Figura 27** y **Figura 28** muestra el prototipo IoT final y la caja personalizada.



**Figura 27**  
*Prototipo Final Ensamblado*



**Figura 28**  
*Caja Personalidad 3D*

### 1.2.2. Calibración

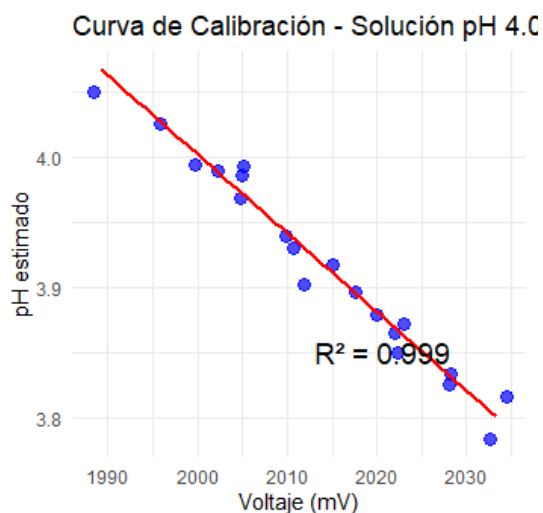
Por otro lado, los sensores de pH y conductividad eléctrica que se calibraron utilizando soluciones estándares, se obtuvieron curvas de calibración con comportamiento lineal, cuyos márgenes de error se mantuvieron dentro de los límites aceptables para sensores de bajo costo ( $\pm 5\%$ ).

En el caso del sensor de pH, se registraron 20 mediciones posteriores a la calibración con solución 4.00, en la Tabla 5 se observa que los errores absolutos fluctúan entre 0.01 y 0.20 unidades de pH. El error absoluto promedio fue de 0.09 unidades de pH, mientras que el error porcentual promedio fue de 2.29%, valores que se encuentran dentro del margen aceptable para sensores de bajo costo.

**Tabla 5**  
Mediciones del sensor de pH con solución de pH 4.00

N.º	Voltaje (mV)	pH estimado	pH Referencia	Error Absoluto	Error Porcentual
1	2003.91	3,98	4,00	0,02	0,50
2	2003.91	3,98	4,00	0,02	0,50
3	2003.91	3,98	4,00	0,02	0,50
4	2008.80	3,95	4,00	0,05	1,25
5	2008.80	3,95	4,00	0,05	1,25
6	2013.69	3,92	4,00	0,08	2,00
7	2013.69	3,92	4,00	0,08	2,00
8	2018.57	3,89	4,00	0,11	2,75
9	2023.46	3,86	4,00	0,14	3,50
10	2023.46	3,86	4,00	0,14	3,50
11	2028.35	3,83	4,00	0,17	4,25
12	2028.35	3,83	4,00	0,17	4,25
13	2033.24	3,80	4,00	0,20	5,00
14	1994.13	4,04	4,00	0,04	1,00
15	1989.25	4,06	4,00	0,06	1,50
16	1999.02	4,01	4,00	0,01	0,25
17	2018.57	3,89	4,00	0,11	2,75
18	2003.91	3,98	4,00	0,02	0,50
19	2023.46	3,86	4,00	0,14	3,50
20	2033.24	3,80	4,00	0,20	5,00
			PROMEDIO	0,09	2,29

La **Figura 29** muestra la curva de calibración y en ella se evidencia una relación lineal inversa entre el voltaje y el pH estimado, lo cual es característico del principio de funcionamiento de los electrodos de pH. El ajuste lineal presenta un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.999$ , lo que indica una excelente correlación entre las variables y una alta precisión en la respuesta del sensor.



**Figura 29**  
Curva de Calibración pH 4

Para el sensor de pH con solución de 7.00, se registraron 20 mediciones posteriores a la calibración y en la **Tabla 5** se observa que el error absoluto promedio ascendió a 0.25

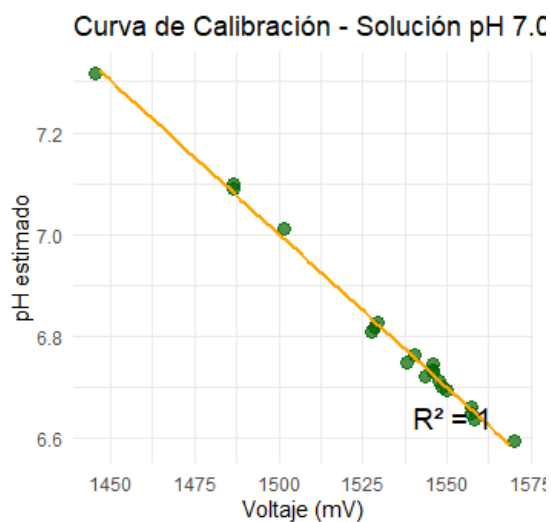
unidades de pH, y el error porcentual promedio fue de 3.54%, manteniéndose de los márgenes aceptable

**Tabla 6**

*Mediciones del sensor de pH con solución de pH 7.00*

N.º	Voltaje (mV)	pH 7,00 estimado	pH Referencia	Error Absoluto	Error Porcentual
1	1544.48	6,73	7,00	0,27	3,86
2	1544.48	6,73	7,00	0,27	3,86
3	1544.48	6,73	7,00	0,27	3,86
4	1549.36	6,70	7,00	0,30	4,29
5	1549.36	6,70	7,00	0,30	4,29
6	1539.59	6,76	7,00	0,24	3,43
7	1559.14	6,65	7,00	0,35	5,00
8	1559.14	6,65	7,00	0,35	5,00
9	1559.14	6,65	7,00	0,35	5,00
10	1583.58	6,59	7,00	0,41	5,86
11	1485.83	7,09	7,00	0,09	1,29
12	1446.73	7,32	7,00	0,32	4,57
13	1485.83	7,09	7,00	0,09	1,29
14	1549.36	6,7	7,00	0,30	4,29
15	1544.48	6,73	7,00	0,27	3,86
16	1539.59	6,76	7,00	0,24	3,43
17	1500.49	7,00	7,00	0,00	0,00
18	1529.81	6,82	7,00	0,18	2,57
19	1529.81	6,82	7,00	0,18	2,57
20	1529.81	6,82	7,00	0,18	2,57
			PROMEDIO	0,25	3,54

La **Figura 30** muestra la curva de calibración en la que se observa una clara relación lineal inversa entre el voltaje y el pH estimado. El ajuste lineal alcanzó un coeficiente de determinación de  $R^2 = 1$ , indicando una correlación perfecta entre las variables y una excelente precisión en esta etapa de calibración.



**Figura 30**

*Curva de Calibración pH 7*

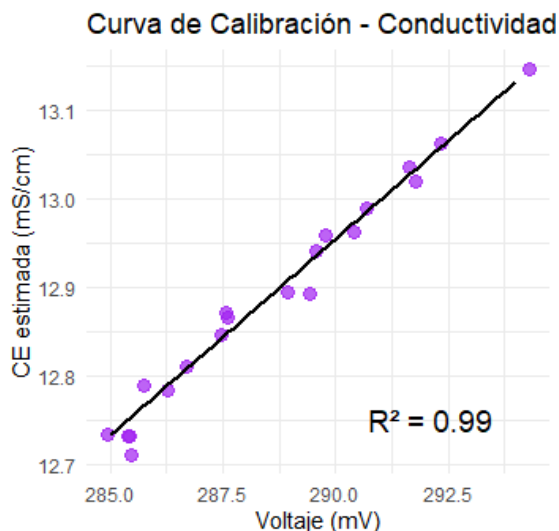
Respecto al sensor de conductividad eléctrica, en la **tabla 7** se obtiene que el error absoluto promedio fue de 0.10 mS/cm mientras que el error porcentual fue de 0.79% evidenciando una buena precisión en las lecturas del sensor tras su calibración.

**Tabla 7**

*Mediciones del sensor de CE con solución de 12.88 mS/cm*

N.º	Voltaje EC (mV)	CE (mS/cm)	CE Referencia	Error Absoluto	Error Porcentual
1	287	12,81	12,88	0,07	0,54
2	286	12,77	12,88	0,11	0,85
3	285	12,73	12,88	0,15	1,16
4	285	12,75	12,88	0,13	1,01
5	285	12,73	12,88	0,15	1,16
6	289	12,9	12,88	0,02	0,16
7	286	12,79	12,88	0,09	0,70
8	294	13,16	12,88	0,28	2,17
9	288	12,86	12,88	0,02	0,16
10	290	12,95	12,88	0,07	0,54
11	285	12,73	12,88	0,15	1,16
12	292	13,05	12,88	0,17	1,32
13	291	12,97	12,88	0,09	0,70
14	288	12,88	12,88	0,00	0,00
15	290	12,95	12,88	0,07	0,54
16	292	13,04	12,88	0,16	1,24
17	292	13,03	12,88	0,15	1,16
18	289	12,91	12,88	0,03	0,23
19	287	12,83	12,88	0,05	0,39
20	290	12,96	12,88	0,08	0,62
PROMEDIO				0,10	0,79

La **Figura 31** muestra la curva de calibración y se aprecia una relación lineal directa entre el voltaje y la CE estimada. El modelo de ajuste alcanzó un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.99$ , evidenciando un alto grado de correlación entre las variables y un comportamiento predecible del sensor ante cambios



**Figura 31**

*Curva de Calibración CE 12.88*

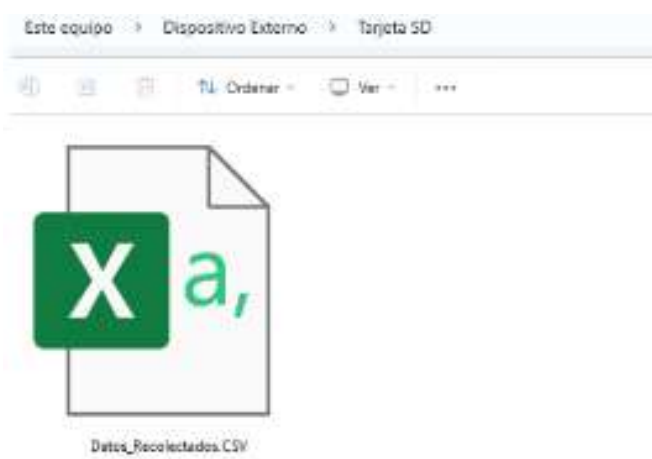
### 1.2.3. Transmisión de Datos

Se verificó su capacidad para almacenar y transmitir los datos recolectados en condiciones reales de operación. Se observó el correcto funcionamiento del envío automático a una hoja de cálculo en la nube mediante el módulo GSM tal como está en la **Tabla 8**, así como el respaldo local en formato .csv en la memoria microSD del sistema.

**Tabla 8**  
*Registro automático en Google Sheets*

Timestamp	Temp (°C)	pH	EC (mS/cm)	TDS (mg/L)	Turbidez (NTU)
2025-05-03 8:00	21.46	6.68	0.97	638.91	0.45
2025-05-03 8:10	21.59	6.68	0.94	616.44	0.45
2025-05-03 8:20	21.62	6.78	0.96	622.93	0.42
2025-05-03 8:30	21.30	6.84	0.97	638.91	0.40

Asimismo, se evidenció que, en ausencia de cobertura móvil, los datos se almacenaron localmente en la tarjeta microSD en archivos con formato .csv, como se muestra en la **Figura 32**.



**Figura 32**  
*Registro de respaldo en tarjeta microSD*

### 1.2.4. Machine Learning

#### 1.2.4.1. Análisis Exploratorio de Datos

Se analizó el archivo csv. Generado por el sistema y se verificó que no existieran valores nulos

**Tabla 9**  
*Análisis Exploratorio de Datos*

	Temp_C	pH	CE_mS	TDS_mgL	Turbidez_NTU
<b>count</b>	2880	2880	2880	2880	2880
<b>null</b>	0	0	0	0	0
<b>type</b>	float	float	float	float	float

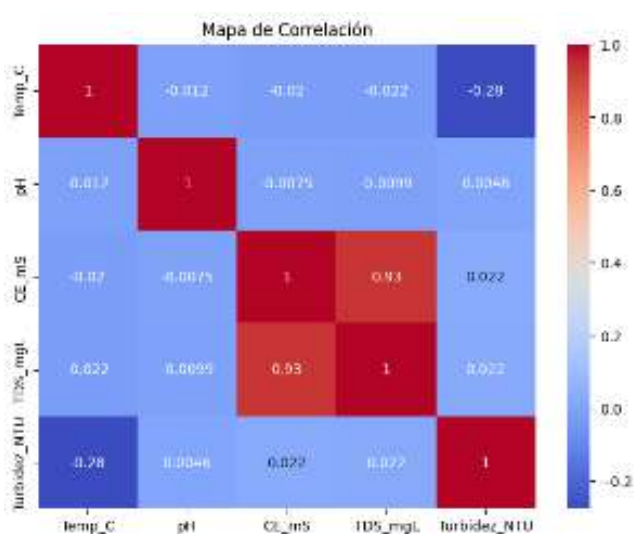
Por lo que se observa no se encontraron datos nulos, se analizó 2880 registros y el tipo de datos es flotante

#### 1.2.4.2. Análisis de Correlación

Se generó un mapa de correlación para explorar relaciones lineales entre los parámetros en la **Figura 33** los que se observó una fuerte correlación positiva  $r = 0.93$  entre la CE y TDS, confirmando su relación directa.

La temperatura mostró una correlación negativa moderada con la turbidez  $r = -0.28$ , mientras que el pH no presentó correlaciones relevantes con las demás variables.

Estos resultados validan la consistencia de los datos.



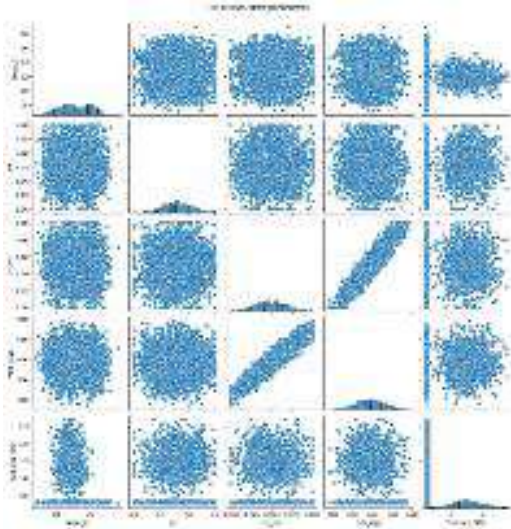
**Figura 33**  
Mapa de Correlación

Estos resultados respaldan la consistencia interna del dataset y la validez de las mediciones.

#### 1.2.4.3. Visualización de Variables

Se utilizó un gráfico de **Figura 34** para observar la relación entre, se visualizó una fuerte relación lineal entre CE y TDS.

Otras combinaciones mostraron dispersión sin patrones definidos, además las distribuciones en la diagonal confirmaron tendencia normal moderada para la mayoría, y concentración baja para turbidez.

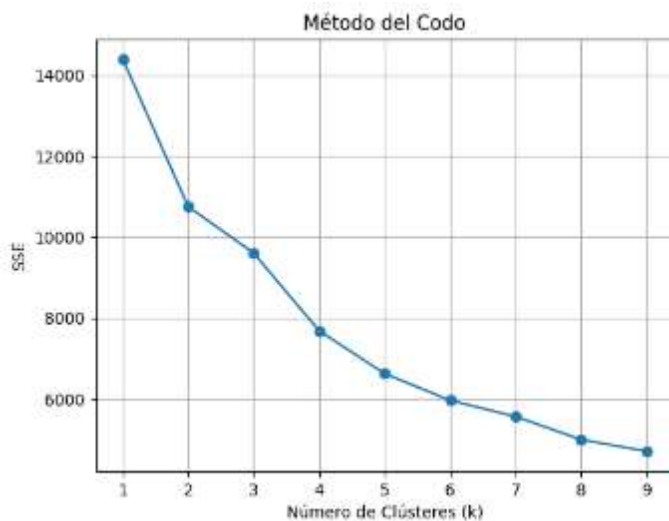


**Figura 34**  
*Relación entre Parámetros*

#### 1.2.4.4. K-Means Clustering (Clásico)

Se utilizó el método del codo para determinar el número óptimo de clústeres **Figura 35**, el cual mostró una disminución abrupta del error cuadrático (SSE) hasta  $k = 3$

```
kmeans = KMeans(n_clusters=k, random_state=42)
kmeans.fit(X_scaled)
```



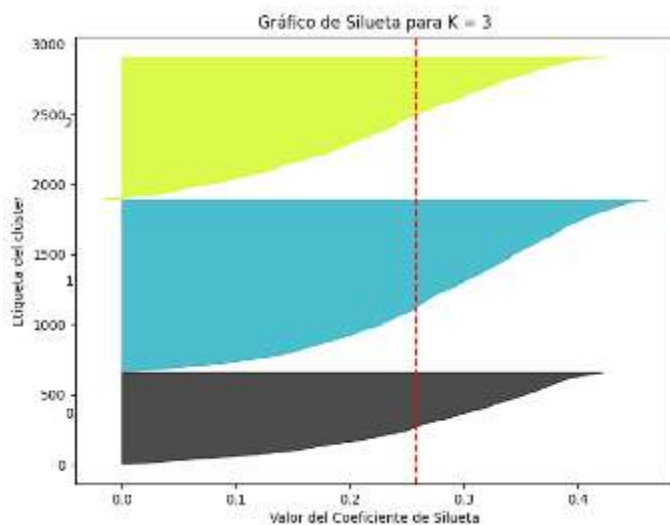
**Figura 35**  
*Método del Codo*

Posteriormente, se aplicó el algoritmo K-Means a los datos estandarizados con  $k = 3$ , asignando etiquetas de clúster a cada observación.

```
df['Cluster'] = kmeans.fit_predict(X_scaled)
score = silhouette_score(X_scaled, df['Cluster'])
```

La validez del agrupamiento se evaluó con el coeficiente de Silhouette, obteniéndose un valor de 0.258 mostrado en la **Figura 36**. Si bien este valor es moderado, refleja una

estructura de clúster aceptable considerando la naturaleza continua y ambiental de las variables recolectadas.

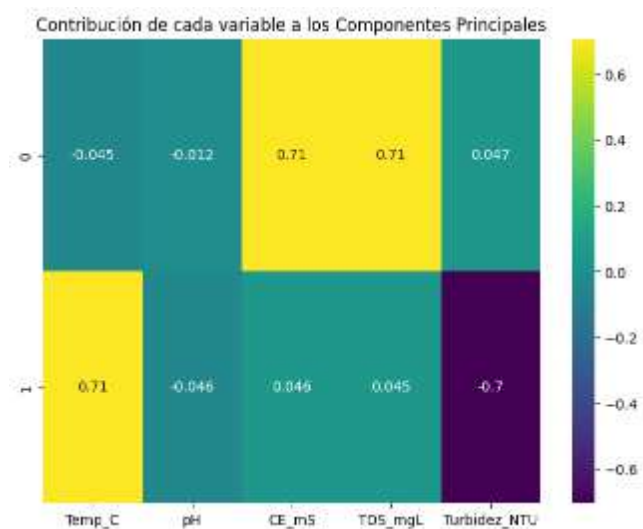


**Figura 36**  
*Gráfico de Silhouette*

#### 1.2.4.5. PCA y Análisis de Componentes

Se aplicó la técnica de Análisis de Componentes Principales (PCA) con dos componentes principales para reducir la dimensionalidad del dataset estandarizado el cual se puede evidenciar en la **Figura 37**

```
pca = PCA(n_components=2)
X_pca = pca.fit_transform(X_scaled)
```



**Figura 37**  
*Contribución de variables a los componentes principales*

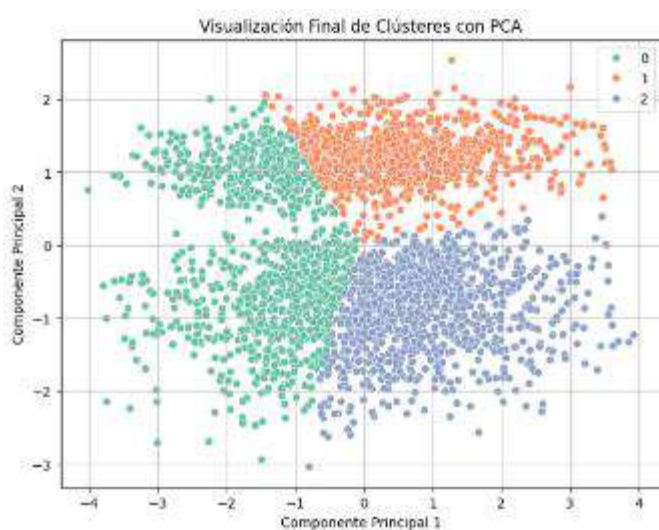
El primer componente PC1 está fuertemente influenciado por CE\_mS y TDS\_mgL ambos con 0.71, lo que indica que PC1 representa una combinación de estas variables altamente

correlacionadas. El segundo componente PC2 está dominado por la Temperatura 0.71 y presenta una fuerte contribución negativa de Turbidez -0.70, lo que sugiere que este eje refleja un contraste entre condiciones térmicas y concentración de partículas. Este análisis permitió reducir las cinco variables originales a dos dimensiones que retienen la mayor parte de la variabilidad del sistema, facilitando así la visualización y segmentación

#### 1.2.4.6. K-Means sobre Componentes PCA

Se identificaron tres clústeres bien diferenciados, reflejando patrones consistentes en los datos fisicoquímicos del agua.

```
K-Means sobre Componentes PCA
kmeans_pca = KMeans(n_clusters=k, random_state=42)
clusters_pca = kmeans_pca.fit_predict(X_pca)
```



**Figura 38**  
*Clústeres con PCA*

El uso de PCA permitió visualizar en 2D las agrupaciones en el conjunto de datos, preservando la mayor parte de la variabilidad original. La separación sugiere que los grupos responden a condiciones ambientales distintas, como variaciones en temperatura, turbidez o concentración de sales.

Esta visualización respalda la estructura hallada previamente con el Silhouette Score, confirmando la validez del agrupamiento con  $k = 3$  y facilitando la interpretación de los clústeres. Estos hallazgos no solo evidencian la funcionalidad del sistema, sino que también destacan su capacidad para generar información valiosa

A diferencia de estudios de (Venkatesh et al., 2024) que presentan arquitecturas IoT enfocadas en la recolección básica de parámetros hídricos, el prototipo desarrollado en esta investigación incorporó mejoras estructurales significativas como el encapsulado

personalizado impreso en 3D, junto con el uso de PCB, el cual ofreció mayor estabilidad eléctrica, resistencia en campo y una disposición más robusta para las conexiones.

Además, el proceso de calibración técnica superó lo observado en investigaciones como la de (Lu et al., 2024) quienes, si bien lograron resultados acordes con análisis de laboratorio, no reportaron métricas de ajuste ni evidencias empíricas detalladas. En cambio, este trabajo presentó curvas de calibración con errores dentro del rango aceptable y coeficientes  $R^2$  cercanos o iguales a 1, lo que refuerza la confiabilidad del sistema como instrumento de monitoreo.

También se incorporó una lógica de respaldo y transmisión de datos más robusta que la encontrada en estudios como el de (Lal et al., 2024), donde no se contemplaban 62 mecanismos alternos en caso de pérdida de señal GSM. La estrategia dual de almacenamiento implementada aquí garantiza la continuidad de datos incluso en entornos de conectividad

Finalmente, un aporte distintivo de esta investigación fue la incorporación de técnicas de Machine Learning no supervisado con K-Means, que permitió identificar agrupaciones naturales en los datos, revelando diferencias relevantes en parámetros como CE, TDS y turbidez. Mientras que la mayoría de los estudios revisados se limitaron al análisis descriptivo, solo (Venkatesh et al., 2024) aplicó un enfoque supervisado para predecir la calidad del agua.

### 1.3. Resultado específico 3: Evaluar la efectividad del sistema de bajo costo que utilice tecnología IoT para el seguimiento de la calidad del agua

Como resultado de la evaluación, la **Tabla 10** presenta el análisis de 2880 registros generados durante dos meses, con muestreo cada 5 minutos en jornadas diarias de 4 horas.

#### 1.3.1. Análisis estadístico descriptiva

**Tabla 10**

*Resumen de estadísticos descriptivos*

Estadístico	Temp_C	pH	CE_mS	TDS_mgL	Turbidez_NTU
<b>N</b>	2880	2880	2880	2880	2880
<b>Mínimo</b>	17,14	6	0,9	574,51	0,25
<b>Máximo</b>	28,97	7,5	1	657,64	2,71
<b>Media</b>	22,82	6,8	0,95	617,29	0,75
<b>Desv. estándar</b>	2,22	0,3	0,02	13,87	0,65
<b>Error estándar</b>	0,04	0,01	0	0,26	0,01
<b>95% IC Inferior</b>	22,74	6,79	0,95	616,78	0,72
<b>95% IC Superior</b>	22,9	6,81	0,95	617,79	0,77
<b>Media recortada al 5%</b>	22,83	6,8	0,95	617,29	0,69
<b>Mediana</b>	22,67	617,37	0,95	617,37	0,31
<b>Varianza</b>	4,92	0,09	0	192,46	0,42

<b>Rango</b>	11,83	1,5	0,1	83,13	2,46
<b>Rango intercuartil</b>	3,61	0,41	0,03	19,16	1,06
<b>Asimetría</b>	-0,04	-0,09	0,05	0	0,95
<b>Error estándar (asimetría)</b>	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
<b>Curtosis</b>	-0,93	-0,23	-0,25	-0,21	-0,58
<b>Error estándar (curtosis)</b>	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09

Se analizaron todos los registros y se obtuvo que la temperatura tuvo una media de 22,82 °C, con baja dispersión (dev.est: 2,22) y distribución simétrica. El pH se mantuvo ligeramente ácido con una media: 6,80 además tuvo poca variación según el rango: 1,50. La conductividad eléctrica fue constante con media: 0,95 mS/cm, con mínima variabilidad. Los TDS registraron una media de 617,29 mg/L y distribución simétrica. En cambio, la turbidez presentó mayor variabilidad. Aunque la media fue baja de 0,75 NTU

En la **Tabla 11** los percentiles muestran una distribución consistente en los cinco parámetros monitoreados

**Tabla 11**  
*Percentiles Q1-Q3*

		<b>25</b>	<b>75</b>
<b>Bisagras de Tukey</b>	Temp_C	21,10	24,71
	pH	6,60	7,01
	CE_mS	0,94	0,96
	TDS_mgL	607,68	626,83
	Turbidez_NTU	0,27	1,33

El análisis intercuartílico refuerza la estabilidad observada en los datos, permitiendo evaluar la concentración del 50 % central de los valores sin verse afectado por extremos. En temperatura, el IQR de 21,10 °C a 24,71 °C confirma que la mayoría de las mediciones se mantuvieron dentro de un rango moderado, alineado con lo esperado para cuerpos de agua en zonas tropicales sin alteraciones térmicas anómalas.

Para el pH, el IQR entre 6,60 y 7,01 respalda la leve acidez ya señalada, mostrando que el cuerpo de agua se mantuvo mayormente dentro de márgenes compatibles con agua potable según estándares.

La conductividad eléctrica, con valores entre 0,94 y 0,96 mS/cm, revela un comportamiento altamente homogéneo, lo que respalda la baja mineralización y escasa variabilidad iónica identificada previamente.

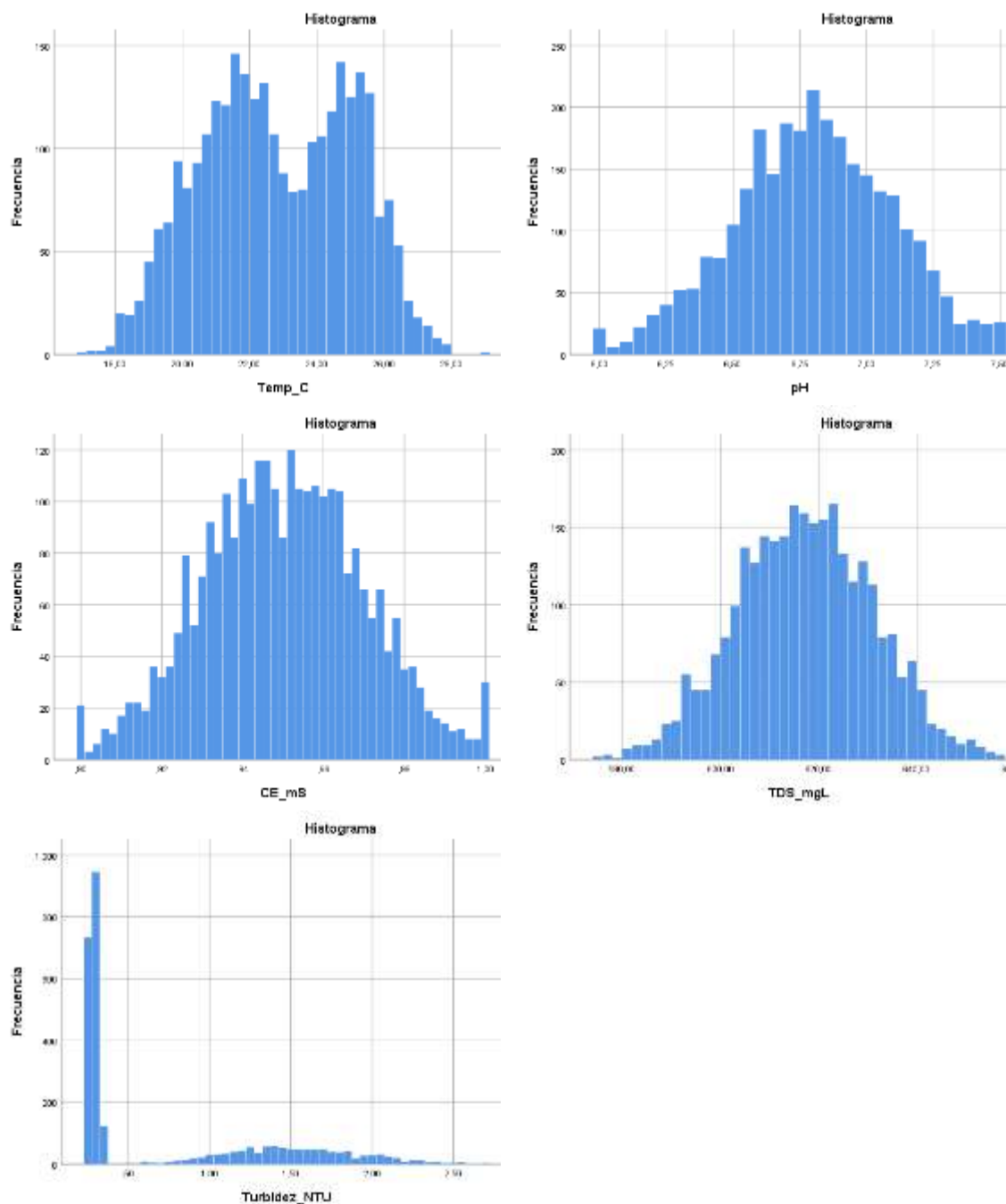
En cuanto a TDS, el intervalo intercuartílico (607,68–626,83 mg/L) evidencia una concentración central constante, sin alteraciones abruptas ni picos fuera del comportamiento esperado.

Finalmente, la turbidez mostró un IQR de 0,27 a 1,33 NTU, el más amplio del conjunto, lo cual reafirma su sensibilidad a eventos puntuales de arrastre superficial o sedimentos, ya advertido en el análisis de dispersión.

### 1.3.2. Análisis gráfico

En la **Figura 39** se visualiza la distribución de frecuencia de cada parámetro

Monitoreado aportando una perspectiva complementaria a las estadísticas numérica.



**Figura 39**  
*Histogramas de frecuencia*

En el caso de la temperatura la forma curva indica una distribución levemente sesgada hacia temperaturas más bajas.

El histograma del pH muestra una distribución moderadamente simétrica, centrada en torno al valor medio de 6.80, que corresponde a un pH ligeramente ácido, común en aguas superficiales naturales. La dispersión es baja, lo que evidencia estabilidad en este parámetro durante el monitoreo.

En cuanto a la conductividad eléctrica el histograma revela una distribución bastante uniforme y concentrada, con valores cercanos a 0.95 mS/cm. La escasa dispersión y forma simétrica sugieren condiciones constantes en la cantidad de sales disueltas.

El parámetro TDS aunque normalmente correlacionado con la conductividad, muestra una mayor dispersión y una leve asimetría positiva, con valores mayoritarios entre 600 y 630 mg/L. Esto puede deberse a fluctuaciones en la concentración de sólidos totales disueltos a lo largo del periodo de muestreo.

Finalmente, la turbidez presenta un histograma visiblemente asimétrico hacia la derecha, con una concentración dominante de valores bajos y una cola extendida hacia niveles más altos. Esta forma indica que, si bien la mayoría de las muestras presentan buena claridad, existen picos aislados de turbidez que podrían asociarse a eventos puntuales como escorrentías o remoción de sedimentos.

### 1.3.3. Evaluación frente a límites normativos

Se evaluó la calidad de los datos capturados por los sensores en comparación con los rangos permisibles definidos por la normativa nacional de calidad de agua

**Tabla 11**  
*Evaluación de rangos*

Parámetro	Total de registros	Dentro de rango (0)	Fuera de rango (1)	% Fuera de rango
pH	2880	2452	428	14,9 %
CE (mS/cm)	2880	2880	0	0,0 %
TDS (mg/L)	2880	2880	0	0,0 %
Temperatura (°C)	2880	2880	0	0,0 %
Turbidez (NTU)	2880	2880	0	0,0 %

Cuatro de los cinco parámetros evaluados se mantuvieron 100 % dentro del rango normativo, mientras que el pH presentó un 14.9 % de valores fuera de rango, evidenciando sensibilidad para detectar condiciones anómalas.

Los valores obtenidos por el sistema desarrollado muestran un comportamiento estable y coherente con lo reportado en investigaciones similares. Por ejemplo, la conductividad eléctrica (media: 0.95 mS/cm) y los TDS (617.29 mg/L) presentaron baja variabilidad, lo

cual también fue observado por (Sugiharto et al., 2023) aunque en su estudio se midió 66 precisión instrumental frente a sensores de laboratorio. Si bien en esta investigación no se calculó precisión porcentual, la homogeneidad de los datos respalda la confiabilidad del prototipo bajo condiciones reales.

Los valores obtenidos por el sistema desarrollado muestran un comportamiento estable y coherente con lo reportado en investigaciones similares. Por ejemplo, la conductividad eléctrica (media: 0.95 mS/cm) y los TDS (617.29 mg/L) presentaron baja variabilidad, lo cual también fue observado por (Sugiharto et al., 2023) aunque en su estudio se midió precisión instrumental frente a sensores de laboratorio. Si bien en esta investigación no se calculó precisión porcentual, la homogeneidad de los datos respalda la confiabilidad del prototipo bajo condiciones reales.

Asimismo, el pH ligeramente ácido (media: 6.8) coincide con lo reportado por (Lal et al., 2024), en cuerpos de agua naturales sin tratamiento. La turbidez fue el único parámetro con mayor variabilidad, con una distribución asimétrica, similar a lo descrito por (Lu et al., 2024), donde se atribuyó a escorrentías o remoción de sedimentos.

Mientras que algunos estudios aplicaron inteligencia artificial para predecir la calidad del agua (Venkatesh et al., 2024) esta investigación se centró en una evaluación estadística normativa. Aun así, la detección de valores fuera de rango en pH (14.9 %) confirma que el sistema es sensible ante alteraciones reales, cumpliendo su propósito en contextos rurales.

Asimismo, el pH ligeramente ácido (media: 6.8) coincide con lo reportado por Lal et al., 2024), en cuerpos de agua naturales sin tratamiento. La turbidez fue el único parámetro con mayor variabilidad, con una distribución asimétrica, similar a lo descrito por (Lu et al., 2024), donde se atribuyó a escorrentías o remoción de sedimentos.

Mientras que algunos estudios aplicaron inteligencia artificial para predecir la calidad del agua (Venkatesh et al., 2024) esta investigación se centró en una evaluación estadística normativa. Aun así, la detección de valores fuera de rango en pH (14.9 %) confirma que el sistema es sensible ante alteraciones reales, cumpliendo su propósito en contextos rurales

## CONCLUSIONES

1. Se logró desarrollar un sistema de monitoreo funcional, capaz de recolectar y transmitir datos en tiempo real sobre parámetros fisicoquímicos del agua, integrando además el envío automatizado de alertas ante valores fuera de rango. Esta solución demostró operatividad continua en campo, constituyéndose en una herramienta eficaz para la vigilancia ambiental en contextos rurales.
2. Los registros obtenidos por el sistema se mantuvieron dentro de los límites permisibles establecidos por la normativa nacional mostrando variaciones naturales asociadas a las condiciones climáticas. La validación en laboratorio confirmó la concordancia entre los datos recolectados por los sensores IoT y los métodos analíticos convencionales.
3. El prototipo implementado, construido con sensores de bajo costo y tecnología IoT, permitió la medición autónoma de pH, turbidez, temperatura, sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica, garantizando el almacenamiento local y la transmisión remota desde la zona de captación. Su diseño modular y eficiencia energética favorecen su replicabilidad en otras zonas rurales.
4. El sistema mostró capacidad de respuesta ante variaciones en los parámetros monitoreados, cumpliendo con los umbrales definidos para la emisión de alertas. Además, el uso de técnicas de análisis no supervisado permitió identificar patrones de comportamiento, ampliando las capacidades del sistema más allá del monitoreo convencional

## RECOMENDACIONES

1. Ampliar el periodo de monitoreo para incluir ciclos estacionales completos, con el fin de identificar patrones de variación a lo largo del año y fortalecer la gestión del recurso hídrico en zonas rurales.
2. Validar el sistema en escenarios más diversos e incorporar tecnologías complementarias de transmisión como LoRaWAN o NB-IoT, que ofrezcan mayor cobertura y estabilidad en áreas con conectividad limitada.
3. Replicar el sistema en otras comunidades rurales con características similares, promoviendo estudios comparativos que permitan generar evidencia local para fortalecer políticas públicas en torno al acceso al agua segura.
4. Desarrollar herramientas digitales complementarias, como una interfaz web o aplicación móvil, que permita visualizar los datos en tiempo real, generar reportes y aplicar modelos predictivos basados en inteligencia artificial, optimizando así la toma de decisiones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adu-Manu, K. S., Tapparello, C., Heinzelman, W., Katsriku, F. A., & Abdulai, J.-D. (2017). Water Quality Monitoring Using Wireless Sensor Networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 13(1), 1–41. <https://doi.org/10.1145/3005719>
- Alam, A. U., Clyne, D., & Deen, M. J. (2021). A Low-Cost Multi-Parameter Water Quality Monitoring System. *Sensors*, 21(11), 3775. <https://doi.org/10.3390/s21113775>
- Al-kassab-Córdova, A., Silva-Perez, C., Robles-Valcarcel, P., Bendezu-Quispe, G., Ortiz, A. I., & Benites-Zapata, V. A. (2023). Spatial and socioeconomic inequalities in the access to safe drinking water in Peruvian households. *Journal of Water and Health*, 21(4), 525–535. <https://doi.org/10.2166/wh.2023.316>
- Amador-Castro, F., González-López, M. E., Lopez-Gonzalez, G., Garcia-Gonzalez, A., Díaz-Torres, O., Carbajal-Espinosa, O., & Gradilla-Hernández, M. S. (2024). Internet of Things and citizen science as alternative water quality monitoring approaches and the importance of effective water quality communication. *Journal of Environmental Management*, 352, 119959. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119959>
- ANA. (2023). ANA optimiza la gestión ambiental de los vertimientos por ríos más saludables en el Perú. Autoridad Nacional Del Agua. <https://www.gob.pe/institucion/ana/noticias/856981-ana-optimiza-la-gestion-ambiental-de-los-vertimientos-por-rios-mas-saludables-en-el-peru>
- Arias-Aguila, E., Vela-Cardich, R., & Ramos-Fernandez, L. (2024). Desarrollo y aplicación del modelamiento de calidad del agua con GESCAL-AQUATOOL en el río Lurín-Lima-Perú. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 15(3), 250–288. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2024-03-06>
- Bautista, F. (2023). *El karst de México*. (Asociación Mexicana de Estudios sobre el Karst, Ed.). [https://www.researchgate.net/profile/Francisco-Bautista-2/publication/369197506\\_El\\_karst\\_de\\_Mexico/links/6459b6fd5762c95ac38045ea/EI-karst-de-Mexico.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Francisco-Bautista-2/publication/369197506_El_karst_de_Mexico/links/6459b6fd5762c95ac38045ea/EI-karst-de-Mexico.pdf)
- Bhati, A., Hiran, K. K., Vyas, A. K., Mijwil, M. M., Aljanabi, M., Metwally, A. S. M., Al-Asad, Md. F., Awang, M. K., & Ahmad, H. (2024). Low cost artificial intelligence Internet of Things based water quality monitoring for rural areas. *Internet of Things*, 27, 101255. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101255>

- Bogdan, R., Paliuc, C., Crisan-Vida, M., Nimara, S., & Barmayoun, D. (2023). Low-Cost Internet-of-Things Water-Quality Monitoring System for Rural Areas. *Sensors*, 23(8), 3919. <https://doi.org/10.3390/s23083919>
- Carvalho, A. K. N. de, Souza, R. F. de, & De Oliveira, S. dos S. (2022). Qualidade de águas superficiais e subterrâneas para irrigação em um município do semiárido do estado do Rio Grande do Norte. *Pesquisas Em Geociências*, 49(2), e119720. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.119720>
- Das, B., & Jain, P. C. (2017). Real-time water quality monitoring system using Internet of Things. *2017 International Conference on Computer, Communications and Electronics (Comptelix)*, 78–82. <https://doi.org/10.1109/COMPTELIX.2017.8003942>
- Dávila Tuesta, L. C. (2022). *Influencia de la calidad del agua en la salud de la población del caserío Santa Rosa de Bajo Tangumí, Calzada* [Tesis para optar el grado de Ingeniero Ambiental, Universidad Nacional de San Martín]. <https://tesis.unsm.edu.pe/handle/11458/5068>
- de Oliveira, D., Airam Querino, V., Sara Lee, Y., Cunha, M., Nery Jr., N., Wessels Perelo, L., Rossi Alva, J. C., Ko, A. I., Reis, M. G., Casanovas-Massana, A., & Costa, F. (2020). Relationship between Physicochemical Characteristics and Pathogenic Leptospira in Urban Slum Waters. *Tropical Medicine and Infectious Disease*, 5(3), 146. <https://doi.org/10.3390/tropicalmed5030146>
- Ghachoui, E., Taouil, H., Naser, R. S. M., & Said, I. A. (2024). Spatial assessment of groundwater quality for drinking In Souk El Arbaa, Morocco. *Water Supply*, 24(4), 1267–1281. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.059>
- Gomes, R., Pereira, C., Galvão, J., & Ribeiro, V. (2024). *Drinking Water: Strategies for Sustainable Management and Water for Everyone* (pp. 709–715). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-48532-9\\_66](https://doi.org/10.1007/978-3-031-48532-9_66)
- Gonzales Saenz, W., Acharte Lume, L. M., Poma Palacios, J. C., Sánchez Araujo, V. G., Quispe Coica, F. A., & Meseguer Pallares, R. (2023). Evaluación fisicoquímica y microbiológica del agua de consumo humano en seis comunidades rurales altoandinas de Huancavelica-Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 25(1), 23–31. <https://doi.org/10.18271/ria.2023.486>
- Gupta, M., Tanwar, S., & Jain, V. (2023). *Potential of IoT for Water Monitoring to Upgrade Food Quality* (pp. 119–139). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-13702-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-13702-0_8)

- Haque, H., Labeeb, K., Riha, R. B., & Khan, Md. N. R. (2021). IoT Based Water Quality Monitoring System By Using Zigbee Protocol. 2021 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI), 619–622. <https://doi.org/10.1109/ESCI50559.2021.9397031>
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación* (C. Fernández & Pilar. Bautista, Eds.). McGraw-Hill. <https://seminariodemetodologiadelainvestigacion.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/03/metodologc3ada-de-la-investigac3b3n-roberto-hernc3a1ndez-sampieri.pdf>
- INEI. (2023). *Perú: Formas de Acceso al Agua y Saneamiento Básico*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5625702/4985657-peru-formas-de-acceso-al-agua-y-saneamiento-basico-nro-10.pdf?v=1703947163>
- Jabbar, W. A., Mei Ting, T., I. Hamidun, M. F., Che Kamarudin, A. H., Wu, W., Sultan, J., Alsewari, A. A., & Ali, M. A. H. (2024). Development of LoRaWAN-based IoT system for water quality monitoring in rural areas. *Expert Systems with Applications*, 242, 122862. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122862>
- Jan, F., Min-Allah, N., & Düşteğör, D. (2021). IoT Based Smart Water Quality Monitoring: Recent Techniques, Trends and Challenges for Domestic Applications. *Water*, 13(13), 1729. <https://doi.org/10.3390/w13131729>
- Jaramillo Vera, E. N., & Marines Batalla, P. (2023). Enfermedades hídricas que afectan a la población como efecto del uso y consumo de agua disponible: una mirada desde las acciones de enfermería. *Más Vita*, 5(4), 29–43. <https://doi.org/10.47606/ACVEN/MV0210>
- Karthikeyan, V., Visu, Y. P., & Kalaimannan, E. (2024). Smart system for wastewater treatment (sswwt): Internet of things (iot)-based intelligent framework for society. In *Sustainability Principles and Applications in Engineering Practice*. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85202136950&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=d1bf4cb88019db0a739751c47cc84ca7&sot=b&sdt=b&s=TITLE-ABS-KEY%28Smart+system+for+wastewater+treatment%29&sl=52&sessionSearchId=d1bf4cb88019db0a739751c47cc84ca7&relpos=7>
- Kumar, D. S., Askarunisa, A., & Kumar, R. M. (2020). Embedded processor based automated assessment of quality of the water in an IoT background. *Microprocessors and Microsystems*, 77, 103167. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103167>

- Lakshmikantha, V., Hiriyannagowda, A., Manjunath, A., Patted, A., Basavaiah, J., & Anthony, A. A. (2021). IoT based smart water quality monitoring system. *Global Transitions Proceedings*, 2(2), 181–186. <https://doi.org/10.1016/j.gltp.2021.08.062>
- Lal, K., Menon, S., Noble, F., & Arif, K. M. (2024). Low-cost IoT based system for lake water quality monitoring. *PLOS ONE*, 19(3), e0299089. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299089>
- Lu, Q., Zou, J., Ye, Y., & Wang, Z. (2024). Design and implementation of a Li River water quality monitoring and analysis system based on outlier data analysis. *PLOS ONE*, 19(3), e0299435. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299435>
- MINAM. (2017). *Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM. Estándares de Calidad Ambiental para Agua*. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- Ministerio de Salud. (2011). *Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano*. [http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/Reglamento\\_Calidad\\_Agua.pdf](http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/Reglamento_Calidad_Agua.pdf)
- Montero Contreras, C. V. (2022). Impacto de los Servicios de Agua y Saneamiento sobre las enfermedades diarreicas em los niños de la Sierra del Perú. *Revista de Análisis Económico y Financiero*, 5(1), 1–8. <https://doi.org/10.24265/raef.2022.v5n1.45>
- Nieto Pacheco, A. J., Villegas Pilay, Y. E., & Galarza Alay, J. I. (2023). Avances actuales de las lot y sus diversas aplicaciones. *ConcienciaDigital*, 6(1), 58–74. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v6i1.2440>
- Nishan, R. K., Akter, S., Sony, R. I., Hoque, Md. M., Anee, M. J., & Hossain, A. (2024). Development of an IoT-based multi-level system for real-time water quality monitoring in industrial wastewater. *Discover Water*, 4(1), 43. <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00092-y>
- Norsuzila Yaacob, Nur Syaza Zainali, Amirul Asraf Abdul Rahman, Azita Laily Yusof, Murizah Kassim, & Ahmad Shazri Nazif Salehudin. (2024). Design of Water Quality Monitoring System Based on Internet of Things Technology. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 45(1), 154–167. <https://doi.org/10.37934/araset.45.1.154167>
- OMS. (2023). *Agua para consumo humano*. Organización Mundial de La Salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking->



- marmorata) larvae. *Science of The Total Environment*, 630, 1078–1085.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.286>
- Tamayo y Tamayo, M. (2004). *El proceso de la investigación científica*. Limusa.  
<https://books.google.com.cu/books?id=BhymmEqkkJwC>
- Torres-Slimming, Carcamo, Wright, Lancha, Zavaleta-Cortijo, King, Ford, Garcia, & Harper. (2023). Diarrheal disease and associations with water access and sanitation in Indigenous Shawi children along the Armanayacu River basin in Peru. *Rural and Remote Health*. <https://doi.org/10.22605/RRH7198>
- UNICEF. (2023). La triple amenaza: La combinación de las enfermedades, los riesgos climáticos y la precariedad de los servicios de agua, saneamiento e higiene puede tener repercusiones mortales para la infancia. *Nueva York: Fondo de Las Naciones Unidas Para La Infancia*.  
<https://www.unicef.org/media/137301/file/triple%20threat%20SP.pdf>
- Vatitsi, K., Siachalou, S., Latinopoulos, D., Kagalou, I., Akrotos, C. S., & Mallinis, G. (2024). Monitoring Water Quality Parameters in Small Rivers Using SuperDove Imagery. *Water*, 16(5), 758. <https://doi.org/10.3390/w16050758>
- Venkatesh, J., Partheeban, P., Baskaran, A., Krishnan, D., & Sridhar, M. (2024). Wireless sensor network technology and geospatial technology for groundwater quality monitoring. *Journal of Industrial Information Integration*, 38, 100569. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100569>
- Wang, X., Wang, X., & Cao, J. (2023). Environmental Factors Associated with Cryptosporidium and Giardia. *Pathogens*, 12(3), 420. <https://doi.org/10.3390/pathogens12030420>
- Zaidi Farouk, M. I. H., Jamil, Z., & Abdul Latip, M. F. (2023). Towards online surface water quality monitoring technology: A review. *Environmental Research*, 238, 117147. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117147>

## ANEXOS

### Anexo 1: Presentación de Tesista y Solicitud de Autorización para la Ejecución de Proyecto de Investigación-Abril de 2024



**UNSAM**  
UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE SAN MARTÍN

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN  
INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho".

Tarapoto, 24 de abril de 2024.

CARTA N° R001-2024-GIIA/MAVC

Señor: **JORGE FLORES BARDALES.**  
Presidente del JASS del Sector Chuina, distrito de Molares, provincia de San Martín.

Presente.

Asunto: **PRESENTO TESIS Y SOLICITO FACILIDADES PARA EJECUCIÓN DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.**

De mi consideración:

Por el presente me dirijo a usted para hacerle llegar mi cordial saludo, así mismo hacerle de conocimiento que mi persona es docente del curso de **Investigación I** en la Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática y tengo el agrado de presentarle a la señorita **Andrea Alexandra García Gonzales** identificada con **DNI 72404819** matriculada en el curso quien ha iniciado su proceso de investigación identificando un potencial tema de investigación en la Junta Administradora de Servicios y Saneamiento que usted preside.

Es por ello que solicito tenga a bien brindarle las facilidades para el acceso al reservorio y/o pozo de donde extraen el líquido elemento para su posterior distribución.

Sin otro en particular y seguro de contar con su aceptación, me despido.

Atentamente,



Firma Digital

Firmado digitalmente por VALLES  
CORAL Miguel Angel FAU  
20180786191.sdf  
Módulo: Sello digital del documento  
Fecha: 24.04.2024 12:16:57 -05:00

Documento firmado digitalmente

**MIGUEL ANGEL VALLES CORAL**  
DOCENTE DEL CURSO DE INVESTIGACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN

cc.:

## Anexo 2: Solicitud de Acompañamiento Técnico y Autorización para la Instalación del Prototipo de Monitoreo en la Fuente de Captación

"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

Morales, 06 Enero del 2025

Carta N° 001-2025-AAGG/ECP/FISI

Señor: **Jorge Flores Bardales**  
Presidente del JASS del Sector Chuina, Morales

Presente.

Asunto: Solicitud de acompañamiento y autorización para instalación de prototipo de monitoreo

De mi mayor consideración:

Por medio de la presente, me dirijo a ustedes para hacerles llegar un cordial saludo y, a la vez, solicitar su apoyo para continuar con el desarrollo del proyecto de tesis titulado "**Sistema de Monitoreo de Calidad del Agua Basado en Tecnología IoT para Zonas Rurales**", que vengo ejecutando en el marco de mi formación profesional en la Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática de la Universidad Nacional de San Martín.

En esta etapa, se requiere el ingreso controlado a la zona de captación de agua administrada por la JASS del sector Chuina, con el objetivo de instalar un prototipo de monitoreo ambiental que registra parámetros fisicoquímicos como temperatura, pH, turbidez, sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica.

Solicito, además, el acompañamiento de un representante de su institución durante las actividades en campo, a fin de garantizar la transparencia y el cumplimiento de las normas internas. Cabe precisar que el sistema funcionará de manera autónoma, no interferirá con el suministro habitual de agua.

Agradezco de antemano su disposición y colaboración para continuar esta investigación en beneficio del conocimiento científico y de la comunidad.

Sin otro particular, me despido cordialmente.

Atentamente



Andrea Alexandra García Gonzales  
72404819

### Anexo 3: Resultados Análisis Físicoquímico, Bacteriológico y Parasitológico del Agua en el Laboratorio Referencial de Morales-Mayo 2024



#### INFORME DE ENSAYO N° 147 – UMAA.LRRSPSM – P/2024

**SOLICITANTE** : Andrea Alexandra García Gonzales  
**Dirección** : Sector Chuina - Morales  
**Motivo del muestreo** : Evaluación de la calidad del agua  
**Referencia** : No consigna

#### DATOS DE LA MUESTRA

**Matriz** : Agua subterránea  
**Procedencia declarada** : Sector Chuina - Morales  
**Fecha de muestreo** : 08.05.24 / 12:30 pm  
**Muestreador** : Interesado

#### CONTROL LABORATORIO ANALITICO

**Fecha recepción** : 09.05.24 / 10:00 am  
**Fecha inicio ensayo** : 09.05.24  
**Protocolo N°** : 090

#### RESULTADOS

COD. LAB.	PUNTO MUESTREO	ENSAYO FÍSICOQUÍMICO			
		pH	Alcalinidad Total Ppm HCO <sub>3</sub>	Dureza Total Ppm CaCO <sub>3</sub>	Turbiedad UNT
230	Ojo de agua – Sector Chuina	7.34	----	----	0.25

COD. LAB.	PUNTO MUESTREO	ENSAYO BACTERIOLÓGICO		
		Coliformes Totales 35°C (NMP/100 mL)	Coliformes Termotolerantes 44.5°C (NMP/100 mL)	E. coli 44.5°C (NMP/100 mL)
230	Ojo de agua – Sector Chuina	4.5	<1.8	<1.8

<1.8, es el límite inferior de Detección del método, ser interpreta como ausencia

COD LAB	PUNTO DE MUESTREO	ENSAYO PARASITOLÓGICO	
		Huevos y larvas Helminéticos, quistes yquistes de protozoos patógenos (presencia / ausencia)	Organismos de vida libre: Algas, protozoarios, copépodos, rotíferos, nematodos en todos sus estadios larvianos (presencia / ausencia)
230	Ojo de agua – Sector Chuina	Ausencia	Presencia

**Método de Ensayo microbiológico:** Numeración Coliformes totales ( APHA 9221 B:2023); Coliformes fecales ( APHA 9221 E1:2023); E. coli ( APHA 9221 F1:2023); Hidrobiología y Parasitología (DIGESA-AG-PE-01), Detección de protozoos y helmintos parásitos en agua de bebida, basado en SMEWW APHA, AWWA, WEF, Part. 971182.b.3). 21st Edition 2006.

**OBSERVACIÓN:** Al examen físicoquímico la muestra es conforme para los parámetros indicados. Respecto al análisis bacteriológico ausencia de microorganismos fecales, al examen parasitológico presenta organismos de vida libre. Se recomienda el tratamiento respectivo para alcanzar los requisitos del "Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano" D.S N° 031-2010-SA

**Emisión de resultados:** 15 de mayo de 2024

GOBIERNO REGIONAL DE SAN MARTÍN  
 OIGESA ESPECIALIZADA  
 LABORATORIO REFERENCIAL REGIONAL S.P.S.M.  
 Bлга. MSc. Dania E. Portales Alcazar  
 C.B.S. N° 1975 / 1985 N° 5195  
 KESP LABORATORIO REFERENCIAL REGIONAL S.P.S.M.

GOBIERNO REGIONAL DE SAN MARTÍN  
 OIGESA ESPECIALIZADA  
 LABORATORIO REFERENCIAL REGIONAL S.P.S.M.  
 Bлга. MSc. Heriberto Araya B. Ximenes  
 C.B.S. 1993  
 DIRECTOR

## Anexo 4: Resultados N°01 Análisis Físicoquímico en el Laboratorio de suelos y agua de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNSM



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN - TARAPOTO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, AGUAS Y FOLIARES



### ANÁLISIS DE AGUAS

SOLICITANTE: ANDREA A. GARCIA GONZÁLES      FECHA DE MUESTREO: 16/03/2025  
PROVINCIA: SAN MARTÍN      FECHA DE REPORTE: 30/03/2025  
DISTRITO: MORALES      MUESTRA: ACUÍFERO

Nº	PARÁMETROS	MUESTRAS
		ACUÍFERO
<b>FÍSICOS Y QUÍMICOS</b>		
1	Temperatura (T ° C)	21,2
2	pH	6,72
3	Turbiedad (NTU)	1,10
4	TDS (mg/l)	616,44
5	Conductividad eléctrica (mS/cm)	0,940

  
Ing. MSc. Carlos Verde Girbau  
Lab. de Análisis de Suelos y Aguas  
UNSM - TARAPOTO  
Facultad de Ciencias Agrarias

Jr. Amorarca cdra 3  
Ciudad Universitaria  
Distrito de Morales

Email: cverde@unsm.edu.pe  
Telf. 385800327

## Anexo 5: Resultados N°02 Análisis Físicoquímico en el Laboratorio de suelos y agua de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNSM



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN - TARAPOTO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, AGUAS Y FOLIARES



### ANÁLISIS DE AGUAS

SOLICITANTE: ANDREA GARCIA GONZALES  
PROVINCIA: SAN MARTÍN  
DISTRITO: MORALES

FECHA DE MUESTREO: 15/04/2025  
FECHA DE REPORTE: 28/04/2025  
MUESTRA: ACUÍFERO

N°	PARÁMETROS	MUESTRAS
		ACUÍFERO
<b>FÍSICOS Y QUÍMICOS</b>		
1	Temperatura (T ° C)	24,8
2	TDS (mg/l)	632,29
3	Conductividad eléctrica (mS/cm)	0,957
4	Turbiedad (NTU)	0,65
5	pH	7,05

  
Ing. MSc. Carlos Verde Girbau  
Lab. de Análisis de Suelos y Aguas  
UNSM - TARAPOTO  
Facultad de Ciencias Agrarias

Jr. Amorarca cdra 3  
Ciudad Universitaria  
Distrito de Morales

Email: cverde@unsm.edu.pe  
Tel: 385800327

**Anexo 6:** Resultados N°03 Análisis Físicoquímico en el Laboratorio de suelos y agua de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNSM



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN - TARAPOTO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, AGUAS Y FOLIARES



ANÁLISIS DE AGUAS

SOLICITANTE: ANDREA GARCÍA GONZÁLES  
PROVINCIA: SAN MARTÍN  
DISTRITO: MORALES

FECHA DE MUESTREO: 18/05/2025  
FECHA DE REPORTE: 30/05/2025  
MUESTRA: ACUÍFERO

N°	PARÁMETROS	MUESTRAS
		ACUÍFERO
<b>FÍSICOS Y QUÍMICOS</b>		
1	Temperatura (T ° C)	26,5
2	pH	7,25
3	TDS (mg/l)	638,91
4	Conductividad eléctrica (mS/cm)	0,973
5	Turbiedad (NTU)	0,45

  
Ing. MSc. Carlos Verde Girbau  
Lab. de Análisis de Suelos y Aguas  
UNSM - TARAPOTO  
Facultad de Ciencias Agrarias

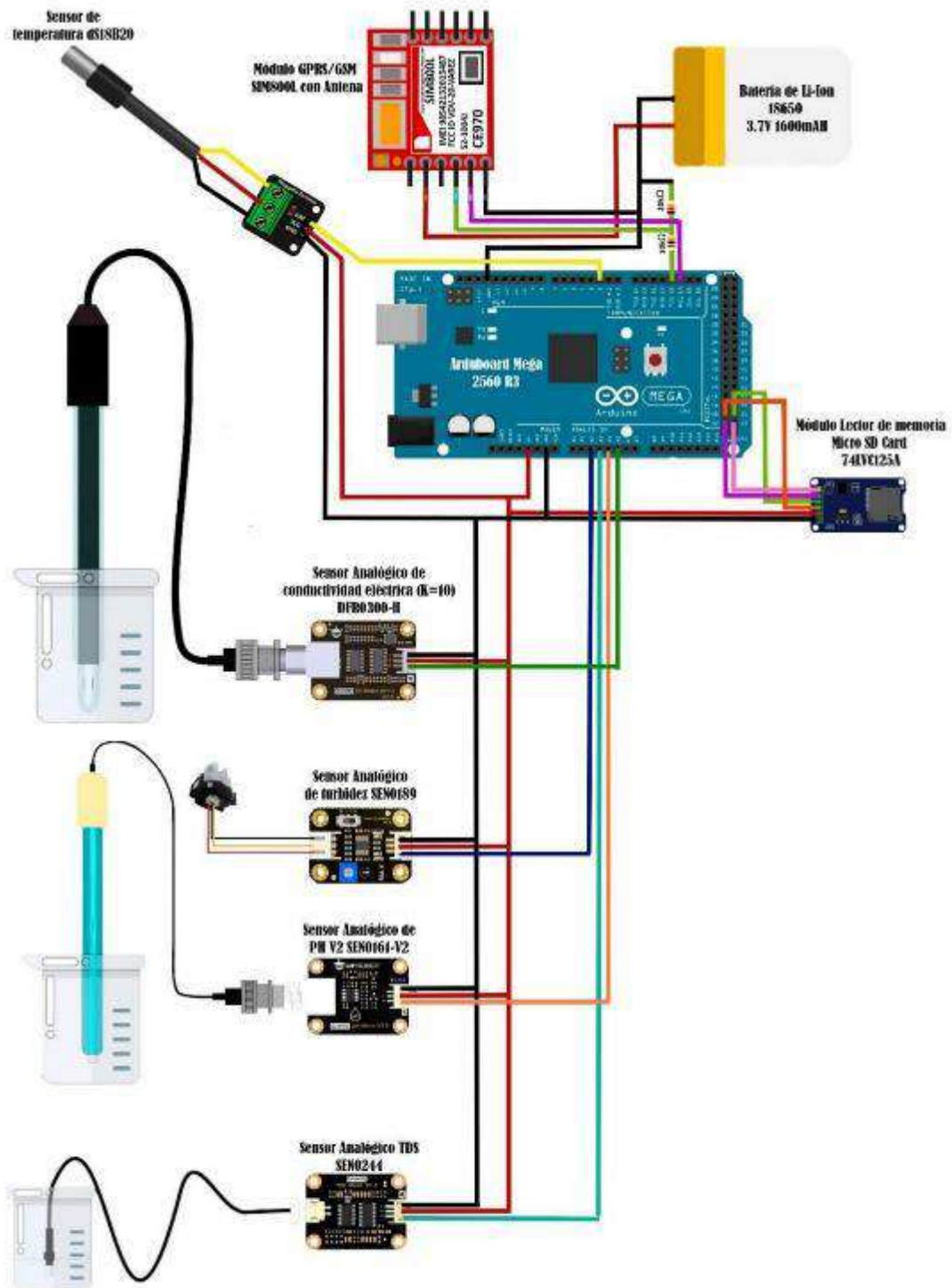
Jr. Amorarca cdra 3  
Ciudad Universitaria  
Distrito de Morales

Email: cverde@unsm.edu.pe  
Telf. 385800327

### Anexo 7: Detalle de costos del sistema de monitoreo IoT

Los costos corresponden a valores de mercado entre Abril 2024 y Julio 2025, utilizados para demostrar la viabilidad técnica y económica del sistema IoT desarrollado

N°	Componente/Servicio	Descripción/Modelo	Cant.	Costo U. (S/.)	Subtotal (S/.)
1	Sensor de CE	Gravity K=10	1	450	450
2	Sensor de pH	Gravity V2	1	300	300
3	Sensor de TDS	Gravity	1	75	75
4	Sensor de turbidez	Gravity	1	85	85
5	Sensor de temperatura	DS18B20	1	13,5	13,5
6	Placa de desarrollo	Arduino Mega 2560	1	98	98
7	Módulo de comunicación	GSM SIM800L	1	28	28
8	Módulo de almacenamiento	SD Card 74LVC125A	1	5	5
9	Batería de litio recargable	18650 3.7v 4.2v	1	15	15
10	Análisis de laboratorio FCA-UNSM	Fisicoquímico	3	100	300
11	Análisis de laboratorio referencial	Fisicoquímico, bacteriológico, parasitológico	1	129	129
12	Personal de apoyo en campo	Acompañamiento técnico	4	30	120
13	Fabricación de PCB	Grabado, perforado y soldado	1	200	200
14	Impresión 3D del encapsulado	Filamento PLA + uso de impresora	1	280	280
<b>Total</b>					2098,5

**Anexo 8:** Diagrama de conexión

**Anexo 9:** Fuente hídrica del Sector Chuina en temporada de lluvia**Anexo 10:** Entorno de pruebas del sistema de monitoreo IoT durante la calibración y validación de sensores

ENTORNO DE PRUEBAS



## Anexo 11: Código Fuente del sistema embebido en Arduino IDE

```

#include "DFRobot_PH.h"
#include "DFRobot_EC10.h"
#include <EEPROM.h>
#include <SD.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

#define EC_PIN A5
#define PH_PIN A4
#define TDS_PIN A3
#define TURBIDEZ_PIN A2
#define SD_CS_PIN 53
#define ONE_WIRE_BUS 2
#define SIM800_TX 18
#define SIM800_RX 19

DFRobot_PH ph;
DFRobot_EC10 ec;
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
HardwareSerial &sim800 = Serial1;
File dataFile;

float calcularNTU(float voltaje) {
  float ntu = 16.6667 * pow(voltaje, 2) - 159.1667 * voltaje + 380.25;
  if (ntu < 0.1) ntu = 0.1;
  return ntu;
}

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  sim800.begin(9600);
  ph.begin();
  ec.begin();
  sensors.begin();

  Serial.println("Iniciando SIM800...");
  sim800.println("AT");
  delay(1000);
  sim800.println("ATE0");
  delay(1000);
  sim800.println("AT+CPIN?");
  delay(1000);
  sim800.println("AT+CREG?");
  delay(1000);
}

```

```

sim800.println("AT+SAPBR=3,1,\"Contype\", \"GPRS\");
delay(1000);
sim800.println("AT+SAPBR=3,1,\"APN\", \"claro.pe\");
delay(1000);
sim800.println("AT+SAPBR=1,1");
delay(5000);
sim800.println("AT+SAPBR=2,1");
delay(2000);
Serial.print("Iniciando tarjeta SD...");
if (!SD.begin(SD_CS_PIN)) {
  Serial.println("Fallo en SD!");
} else {
  Serial.println("SD lista.");
  if (!SD.exists("datalog.csv")) {
    SD.remove("datalog.csv");
    dataFile = SD.open("Datos_Recolectados.csv", FILE_WRITE);
    if (dataFile) {
      dataFile.println("Temp_C,pH,EC_uS,TDS_mgL,Turbidez_NTU,Alerta");
      dataFile.close();
    }
  }
}
Serial.println("Sistema activo...");
}
void loop() {
  static unsigned long t = millis();
  if (millis() - t > 300000) {
    t = millis();
    medirYProcesar();
  }
}
void medirYProcesar() {
  sensors.requestTemperatures();
  float tempC = sensors.getTempCByIndex(0);
  float voltPH = analogRead(PH_PIN) * (5000.0 / 1024.0);
  float voltEC = analogRead(EC_PIN) * (5000.0 / 1024.0);
  float voltTDS = analogRead(TDS_PIN) * (5000.0 / 1024.0);
  float voltTurb = analogRead(TURBIDEZ_PIN) * (5.0 / 1023.0);

  float valorPH = ph.readPH(voltPH, tempC);
  float valorEC_mS = ec.readEC(voltEC, tempC);
  float valorEC_uS = valorEC_mS * 1000.0;
  float voltTDS_V = voltTDS / 1000.0;
  float valorTDS = (133.42 * pow(voltTDS_V, 3) - 255.86 * pow(voltTDS_V, 2)
+ 857.39 * voltTDS_V) * 0.5;
  float valorTurb = calcularNTU(voltTurb);
}

```

```

bool alertaPH = (valorPH > 8.5);
bool alertaTDS = (valorTDS > 1000);
bool alertaEC = (valorEC_uS > 1500);
bool alertaTurb = (valorTurb > 5.0);
bool hayAlerta = alertaPH || alertaTDS || alertaEC || alertaTurb;

Serial.println("Lectura:");
Serial.print("Temp:");
Serial.print(tempC, 2);
Serial.println("°C");
Serial.print("pH:");
Serial.print(valorPH, 2);
Serial.print("|");
Serial.print("CE:");

    Serial.print(valorEC_uS, 2);Serial.print("mS/cm|");
Serial.print("TDS:"); Serial.print(valorTDS,2); Serial.print("mg/L| ");
Serial.print("Turbidez:"); Serial.print(valorTurb,2); Serial.println("
    NTU");
if (hayAlerta) Serial.print("ALERTA");
Serial.println();
dataFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);

if (dataFile) {
    dataFile.print(tempC, 2);
    dataFile.print(",");
    dataFile.print(valorPH, 2);
    dataFile.print(",");
    dataFile.print(valorEC_uS, 0);
    dataFile.print(",");
    dataFile.print(valorTDS, 2);
    dataFile.print(",");
    dataFile.print(valorTurb, 2);
    dataFile.print(",");
    dataFile.println(hayAlerta ? "SI" : "NO");
    dataFile.close();
}
String postData = "{";
postData += "\"temp\": " + String(tempC, 2) + ",";
postData += "\"ph\": " + String(valorPH, 2) + ",";
postData += "\"ec\": " + String(valorEC_uS, 0) + ",";
postData += "\"tds\": " + String(valorTDS, 2) + ",";
postData += "\"turb\": " + String(valorTurb, 2) + ",";
postData += "}";
String url =
    "https://script.google.com/macros/s/AKfycbx0ahorXLUCA8e40_PNUTetx-
    u0i1VXPd0dRjIZwN-kxEpnLhKJen4bNm1rLZDm2kGt/exec";
sim800.println("AT+HTTPTERM"); delay(500);

```

```
sim800.println("AT+HTTPIPINIT"); delay(500);
sim800.println("AT+HTTTPARA=\"CID\",1"); delay(500);
sim800.println("AT+HTTTPARA=\"URL\",\"" + url + "\""); delay(1000);
sim800.println("AT+HTTTPARA=\"CONTENT\", \"application/json\"");
  delay(500);
sim800.print("AT+HTTPDATA="); sim800.print(postData.length());
  sim800.println(",10000"); delay(1000);
sim800.print(postData); delay(1000);
sim800.println("AT+HTTPACTION=1"); delay(5000);
sim800.println("AT+HTTPREAD"); delay(3000);
sim800.println("AT+HTTPTERM"); delay(500);
}
```

## Anexo 12: Código Fuente del Algoritmo de No supervisado Usando K-means y PCA

```

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

from sklearn.cluster import KMeans
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from sklearn.decomposition import PCA
from sklearn.metrics import silhouette_score, silhouette_samples
from google.colab import files

uploaded = files.upload()
df = pd.read_csv("Datos_Recolectados.csv")
df.head()
print("Información general:")
df.info()
print("\nDatos nulos:")
print(df.isnull().sum())
print("\nResumen estadístico:")
print(df.describe())
print("\nDistribución de variables:")
df.hist(figsize=(10, 6))
plt.tight_layout()
plt.show()

plt.figure(figsize=(8, 6))
sns.heatmap(df.corr(), annot=True, cmap='coolwarm')
plt.title("Mapa de Correlación")
plt.show()

features = ["Temp_C", "pH", "CE_mS", "TDS_mgL", "Turbidez_NTU"]
scaler = StandardScaler()
X_scaled = scaler.fit_transform(df[features])
sns.pairplot(df[features])
plt.suptitle("Relaciones entre parámetros", y=1.02)
plt.show()

sse = []
for k in range(1, 10):
    kmeans = KMeans(n_clusters=k, random_state=42)
    kmeans.fit(X_scaled)
    sse.append(kmeans.inertia_)
plt.plot(range(1, 10), sse, marker='o')
plt.xlabel("Número de Clústeres (k)")
plt.ylabel("SSE")
plt.title("Método del Codo")

```


```

plt.grid(True)
plt.show()
k = 3
kmeans = KMeans(n_clusters=k, random_state=42)
df['Cluster'] = kmeans.fit_predict(X_scaled)
print("Silhouette Score:", silhouette_score(X_scaled, df['Cluster']))
silhouette_vals = silhouette_samples(X_scaled, df['Cluster'])
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 6))
y_lower = 10
for i in range(k):
    ith_cluster_silhouette_vals = silhouette_vals[df['Cluster'] == i]
    ith_cluster_silhouette_vals.sort()
    size_cluster_i = ith_cluster_silhouette_vals.shape[0]
    y_upper = y_lower + size_cluster_i
    color = plt.cm.nipy_spectral(float(i) / k)
    ax.fill_betweenx(np.arange(y_lower, y_upper),
0, ith_cluster_silhouette_vals,
facecolor=color, edgecolor=color, alpha=0.7)
    ax.text(-0.05, y_lower + 0.5 * size_cluster_i, str(i))
    y_lower = y_upper + 10
score = silhouette_score(X_scaled, df['Cluster'])
ax.axvline(x=score, color="red", linestyle="--")
ax.set_title("Gráfico de Silueta para K = {}".format(k))
ax.set_xlabel("Valor del Coeficiente de Silueta")
ax.set_ylabel("Etiqueta del clúster")
plt.show()
pca = PCA(n_components=2)
X_pca = pca.fit_transform(X_scaled)
plt.figure(figsize=(8,6))
sns.heatmap(pd.DataFrame(pca.components_, columns=features), annot=True,
cmap="viridis")
plt.title("Contribución de cada variable a los Componentes Principales")
plt.show()
kmeans_pca = KMeans(n_clusters=k, random_state=42)
clusters_pca = kmeans_pca.fit_predict(X_pca)
plt.figure(figsize=(8,6))
sns.scatterplot(x=X_pca[:,0], y=X_pca[:,1], hue=clusters_pca,
palette='Set2')
plt.title("Visualización Final de Clústeres con PCA")
plt.xlabel("Componente Principal 1")
plt.ylabel("Componente Principal 2")
plt.grid(True)
plt.show()

```

# Andrea Alexandra García Gonzales

## Monitoreo de la calidad del agua para zonas rurales mediante un sistema de sensores de bajo costo basados en IoT

 Revisión Repositorio Institucional

---

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:569448763

Fecha de entrega

20 mar 2026, 8:53 GMT-5

Fecha de descarga

20 mar 2026, 9:03 GMT-5

Nombre del archivo

Informe de Tesis - Andrea Alexandra García Gonzales.pdf

Tamaño del archivo

2.7 MB

91 páginas

19,434 palabras

115.437 caracteres




# 11% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

## Fuentes principales

- 9%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 8%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.