

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



TEMA:

**CURSO DE ESPECIALIZACIÓN - APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE
INTERNET DE LAS COSAS, INTELIGENCIA ARTIFICIAL E
INFRAESTRUCTURA DE LA NUBE EN
SOLUCIONES PARA INDUSTRIA 4.0**

SUB – TEMA:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA
EN LOS ESTANQUES DE PISCICULTURA DE LA FACULTAD DE
CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA DE LA
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:

**BARAHONA CERNA, GUSTAVO ISAÍAS
FLORES MORALES, OSWALDO ALEJANDRO
SILVA LUNA, CARLOS ALBERTO**

PARA OTORGAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO 2025

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

ING. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABÍAN ORELLANA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR INTERINO:

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título:

**CURSO DE ESPECIALIZACIÓN - APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE
INTERNET DE LAS COSAS, INTELIGENCIA ARTIFICIAL E
INFRAESTRUCTURA DE LA NUBE
EN SOLUCIONES PARA INDUSTRIA 4.0**

Subtítulo:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA
EN LOS ESTANQUES DE PISCICULTURA DE LA FACULTAD DE
CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA DE LA
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

Presentado por:

**BARAHONA CERNA, GUSTAVO ISAÍAS
FLORES MORALES, OSWALDO ALEJANDRO
SILVA LUNA, CARLOS ALBERTO**

SAN SALVADOR, MAYO 2025

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docente Asesor:

PHD. CARLOS OSMÍN POCASANGRE JIMÉNEZ

NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha jueves 13 de marzo de 2025, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 10:00 a.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Werner David Meléndez Valle
Director Interino


Firma

2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma



Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

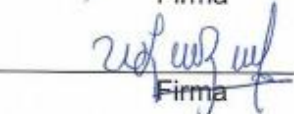
- DR. CARLOS OSMIN POCASANGRE JIMÉNEZ
(Docente Asesor)


Firma

- ING. WERNER DAVID MELENDEZ VALLE


Firma

- ING. WALTER LEOPOLDO ZELAYA CHICAS


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación (Curso de Especialización): APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE INTERNET DE LAS COSAS, INTELIGENCIA ARTIFICIAL E INFRAESTRUCTURA DE LA NUBE EN SOLUCIONES PARA LA INDUSTRIA 4.0

A cargo de los Bachilleres:

- BARAHONA CERNA GUSTAVO ISAÍAS
- FLORES MORALES OSWALDO ALEJANDRO
- SILVA LUNA CARLOS ALBERTO

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final:

(Ocho punto cinco)

8.5

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios por darme la fortaleza diaria para seguir adelante y no dejarme solo en este proceso de culminar mis estudios universitarios. Sé que este es solo el primer paso de muchos, y confío en que Él seguirá siendo mi guía y soporte incondicional.

A mi madre, Cristina Barahona, gracias por tu amor incondicional, por tu cariño, por tus palabras de aliento y por ser mi inspiración constante. En cada noche de desvelo estuviste presente, esperando a que regresara a casa después de un largo día de trabajo, universidad o un examen. Tu apoyo ha sido vital para mí.

A mi hermana, Natalia Barahona, por su apoyo inquebrantable, tanto emocional como económico, y por ser una guía en este camino llamado vida. Gracias a ti, hoy puedo cumplir este sueño y muy pronto darte esa respuesta que tanto esperas cada día.

Al Ingeniero Werner, director interino de la Escuela, por su apoyo, dedicación e interés. Su compromiso ha sido un factor clave para que este trabajo de graduación se concrete con éxito.

Al Ingeniero Jorge Angulo, su asesoría técnica durante el curso de especialización fue de vital importancia para la conclusión de este trabajo de graduación.

Al Doctor Pocasangre, mi docente asesor, por su valiosa guía y consejos. Sus enseñanzas no solo me han ayudado a superar los retos académicos, sino también a prepararme para los desafíos laborales que vienen.

A mis compañeros de trabajo de graduación, Oswaldo Flores y Carlos Silva, gracias por su entrega y compañerismo. Las noches trabajando hasta las tres de la madrugada y luego ir a laborar sin dormir, pronto serán recompensadas.

A mis compañeros de universidad: Boris Castillo, Armando Mendoza, Estanley Martínez, Raúl Pérez, Andrei Merino, Kevin Figueroa y Edwin Ortiz. Gracias por todos los momentos compartidos dentro y fuera de la facultad. Estamos a punto de cumplir nuestro sueño de ser ingenieros.

A José Luis Aparicio, quien, aunque ya no está con nosotros, fue una de las primeras personas que me motivó a estudiar Ingeniería Eléctrica. Me enseñó lo básico de la electrónica y sus consejos marcaron el inicio de este camino. Siempre lo recordaré con gratitud.

A niña Reinita, por su amabilidad y ayuda en todos los trámites administrativos de la Escuela.

Y, en general, a todas las personas que me han mostrado su cariño, que me preguntan con entusiasmo si ya me gradué o cuándo lo haré. Este título también es para ustedes.

GUSTAVO ISAÍAS BARAHONA CERNA

AGRADECIMIENTOS

En este momento tan especial, quiero dedicar unas palabras a quienes han sido parte fundamental de este logro.

En primer lugar, a Dios, por su amor incondicional y por darme la fuerza y sabiduría para superar cada obstáculo en este camino.

A mis padres, Jeannette Morales y Ramón Flores, por su amor, sus sacrificios y su incansable apoyo. Gracias por enseñarme, desde pequeño, que los sueños se alcanzan con esfuerzo y perseverancia. Este logro es tan mío como suyo.

A mis hermanos: Brandon Orellana, Johana Alfaro, Jairo Alfaro y Marcela Flores. Gracias por su compañía, sus palabras de aliento y su ejemplo de lucha. Cada uno, a su manera, ha sido inspiración para seguir adelante.

A mi pareja, Evelyn Castillo, por su paciencia, su cariño y su constante apoyo emocional. Gracias por caminar conmigo en los días más difíciles y por creer en mí cuando las fuerzas flaqueaban.

A mis asesores, PhD. Carlos Osmín Pocasangre Jiménez y el Ing. Jorge Angulo, quienes, con su guía, experiencia y compromiso, nos ayudaron a concretar este proyecto. Su apoyo académico ha dejado una huella imborrable en mi formación.

Al Ing. Werner David Meléndez Valle, director interino de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, por su gestión y respaldo durante nuestro proceso de graduación.

A mis compañeros de tesis, Gustavo Isaías Barahona Cerna y Carlos Alberto Silva Luna: gracias por su entrega, su esfuerzo y su amistad. Juntos enfrentamos desafíos que hoy recordaremos con orgullo.

A mis grandes amigos y compañeros de universidad: Boris Castillo, Andrei Hernández, Edwin Ortiz, Raúl Pérez, Nelson Mendoza, Andrés Castro, Kevin Figueroa y Estanley Martínez. Gracias por las incontables horas de estudio, por las risas, por las motivaciones y por no dejarme caer en este largo recorrido. Sus amistades son uno de los mejores regalos que me deja esta etapa.

A todos los que, de alguna forma, creyeron en mí, me ofrecieron su apoyo y me alentaron a seguir, este logro también es para ustedes.

Con gratitud infinita.

OSWALDO ALEJANDRO FLORES MORALES

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de graduación representa mucho más que el cierre de una etapa académica; es también el reflejo del amor, el apoyo y la confianza que he recibido, durante muchos años, de personas fundamentales en mi vida. A todas ellas, les debo este logro.

A mis padres, Sara Luna de Silva y Carlos Alberto Silva Olla, gracias por ser mi pilar más firme. Su ejemplo, sacrificio y entrega incondicional me han guiado en cada paso. Nada de esto habría sido posible sin el inmenso amor, paciencia y respaldo que siempre me han brindado, la persona que soy y el profesional que seré se los debo por completo a ellos.

A mi hermana, Karla Marilú Silva Luna, por estar presente con su cariño y su confianza, por creer en mis capacidades y demostrármelo.

A mi abuela, Blanca Marilú de Silva, gracias por su ternura, por sus palabras dulces y por su presencia indispensable en mi vida y en cada logro hasta la fecha. A todos ellos les amo y les dedico este y cada logro.

Guardo en mi corazón a mis abuelos fallecidos: mi abuela Otilia López y mi abuelo Nicolás Silva Peñate. Aunque ya no están conmigo físicamente, su recuerdo y legado han sido una fuente constante de fortaleza y motivación. Fueron y serán esenciales en cada uno de mis logros, a ellos les dedico, con todo mi amor, este y cada uno de mis sueños alcanzados.

Agradezco inmensamente a mis compañeros en este trabajo de grado, mis colegas ingenieros, Gustavo Isaías Barahona Cerna y Oswaldo Alejandro Flores Morales. Gracias por su valentía contagiosa, por su determinación férrea y por la paciencia y el apoyo. Me halaga infinitamente poder compartir este logro con ustedes.

Agradezco profundamente al Dr. en Ciencias Carlos Osmín Pocasangre y al Ing. José Angulo, mis asesores, por su orientación generosa, su tiempo y sus enseñanzas, que fueron clave para llevar a cabo este trabajo. Al Ing. Werner David Meléndez Valle, director de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, gracias por su compromiso, liderazgo y disposición constante para apoyar el desarrollo académico de los estudiantes y por prestar toda la disponibilidad para que este proceso llegara a buen término.

Extiendo también mi agradecimiento al personal administrativo de la Escuela, cuyo trabajo silencioso y eficiente hizo posible muchas de las gestiones necesarias durante mi formación y hace posible también la culminación de este proceso académico.

A mis amigos, quienes con su compañía, empatía y ánimo me ayudaron a mantener el rumbo incluso en los momentos más exigentes.

Gracias a todos, de corazón. Este triunfo no es solo mío, sino de cada uno de ustedes que caminó a mi lado en este proceso.

CARLOS ALBERTO SILVA LUNA

CONTENIDO

INDICE DE ILUSTRACIONES	16
INDICE DE TABLAS	17
INTRODUCCIÓN.....	18
OBJETIVOS:.....	19
GENERAL:	19
ESPECIFICOS:	19
ALCANCES:.....	20
ANTECEDENTES:	21
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:.....	22
JUSTIFICACIÓN.....	23
CAPITULO 1: MARCO TEORICO	24
1.1 INTERNET DE LAS COSAS (IOT)	24
1.1.1 Evolución del IoT	25
1.1.2 Componentes Principales de un Sistema IoT	25
1.1.3 Tipos de IoT	26
1.1.4 Beneficios del IoT	27
1.1.5 Desafíos y Consideraciones del IoT	27
1.1.6 Tendencias Futuras en IoT	27
1.1.7 Plataformas IoT	28
1.2 TECNOLOGÍA LORA (LONG RANGE).....	29
1.2.1 Características Principales de LoRa	29
1.2.2 Arquitectura de LoRa	29
1.2.3 Factores de Propagación en Comunicaciones LoRa	30
1.2.4 Ventajas de LoRa.....	31
1.2.5 Aplicaciones de LoRa.....	32
1.2.6 Desafíos de LoRa	32

1.3 IMPORTANCIA DE PARAMETROS METEOROLOGICOS EN PISCICULTURA	33
1.3.1 Temperatura.....	33
1.3.2 Oxígeno Disuelto.....	33
1.3.3 Precipitaciones y Calidad del agua.....	34
1.3.4 Viento	34
1.3.5 Humedad.....	34
1.3.6 Radiación Solar	35
1.3.7 Presión Atmosférica	35
1.3.8 Intensidad de Luz.....	35
1.4 APLICACIONES DE TECNOLOGIAS IOT DE PISCICULTURA EN EL SALVADOR	36
1.4.1 Monitoreo de Parámetros ambientales	36
1.4.2 Sistemas de Alimentación Inteligente	37
1.4.3 Control y Gestión de Calidad del Agua.....	37
1.4.4 Monitoreo de la Salud de los Peces	38
1.4.5 Gestión de Energía.....	38
1.4.6 Rastreo y Gestión de Inventarios.....	38
1.4.7 Agricultura Acuática Integrada (IMTA).....	39
1.5 DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES EN EL SALVADOR.....	39
1.6 BENEFICIOS DE LA MEDICION DE PARAMETROS METEOROLOGICOS EN LA MEJORA DE LA PRODUCCION DE TILAPIAS Y CAMARONES	40
1.6.1 Optimización de la Calidad del Agua.....	40
1.6.2 Mejora en el Crecimiento y la Salud de los Organismos Acuáticos	41
1.6.3 Gestión Eficiente de los Recursos Hídricos	41
1.6.4 Prevención de Riesgos y Desastres Naturales	42
1.6.5 Optimización de la Alimentación y Nutrición.....	42
1.6.6 Mejora en la Sostenibilidad y Rentabilidad.....	43
1.6.7 Mejor Control de Plagas y Enfermedades	43
CAPÍTULO 2: COMPONENTES DE IMPLEMENTACIÓN	44
2.1 ESP32	44

2.2 ESP32 LoRa TTGO.....	45
2.3 DTH22.....	47
2.4 BH1750.....	49
2.5 CALT YGC-F5-5V-V	52
2.6 BATERÍAS RIXN 18650.....	54
2.7 PANEL SOLAR PS - 5V	56
2.8 PFSENSE	58
2.9 ROUTER D-LINK 825M.....	60
2.10 CAJA DE REGISTRO LEGRAND	62
CAPITULO 3: METODOLOGIA DE DISEÑO.....	63
3.1 DEFINICIÓN DEL HARDWARE PRINCIPAL DEL SISTEMA.....	63
3.2 ELECCIÓN DE SENSORES	63
3.3 OTROS DISPOSITIVOS	64
3.4 INTERFAZ DE DESARROLLO Y LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN	64
3.4 PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN.....	65
3.4.1 DHT22	65
3.4.2 BH1750.....	68
3.4.3 YGC-F5-5V-V.....	71
3.4.4 Comunicación entre Microcontroladores (LoRa).....	72
3.4.5 Comunicación entre el Gateway y ThingsBoard (HTTPS).....	76
3.5 FORMATO DE LOS DATOS Y ALMACENAMIENTO	79
3.5.1 Formato de los Datos.....	79
3.5.2 Monitoreo y Almacenamiento en ThingsBoard	79
3.6 DESARROLLO DE LA ESTACIÓN	82
CAPITULO 4: RESULTADOS DEL PROYECTO	84
4.1 VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS EN THINGSBOARD.....	84

4.2 COMPARATIVA CON LAS BASES DE DATOS DE ACCESO LIBRE	85
4.2.1 Desviación Estándar	87
4.2.2 Error Absoluto entre los valores de Nasa Power y WeatherAPI.....	89
4.2.3 RMSE (Error Cuadrático Medio)	92
4.2.4 MAE (Error Absoluto Medio)	93
4.2.5 Comparación de RMSE y MAE	93
CONCLUSIONES	98
RECOMENDACIONES	100
BIBLIOGRAFIA	101
ANEXOS	109
Anexo 1	109
Anexo 2	111
Anexo 3	112
Anexo 4	113

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1 ESP32 LoRa TTGO	45
Figura 2 Sensor de Temperatura y Humedad DTH22.....	47
Figura 3 Sensor de Intensidad de Luz BH1750.....	50
Figura 4 Anemómetro YGC-F5-5V-V	52
Figura 5 Baterías Rixn 18650.....	54
Figura 6 Panel Solar PS-5V.....	56
Figura 7 Hardware PFSense	58
Figura 8 Router D-Link 825M	60
Figura 9 Caja de Registro LEGRAND	62
Figura 10 Segmento de Código para el DHT22	67
Figura 11 Segmento de Código para BH1750.....	71
Figura 12 Segmento de Código para el YGC-F5-5V-V	72
Figura 13 Analizador de espectro RSA306B	74
Figura 14 Espectro de los microcontroladores	75
Figura 15 Segmento de código de la Comunicación LoRa	76
Figura 16 Segmento de Código para la comunicación HTTPS.....	78
Figura 17 Segmento de Código para el Módulo Wifi	78
Figura 18 Diagrama de comunicación completo.....	81
Figura 19 Implementación de la Estación Meteorológica.....	82
Figura 20 Mapa de Ubicación de Estación Meteorológica y Gateway	83
Figura 21 Dashboard de Estación Meteorológica en ThingsBoard.....	84
Figura 22 Desviación estándar de los valores de temperatura para el lapso seleccionado..	88
Figura 23 Desviación estándar de los valores de humedad para el lapso seleccionado	88
Figura 24 Desviación estándar de los valores de velocidad de viento para el lapso seleccionado.....	89
Figura 25 Distribución de Errores Absolutos para la temperatura	90
Figura 26 Distribución de Errores Absolutos para la Humedad.....	91
Figura 27 Distribución de Errores Absolutos para la Velocidad del Viento	92
Figura 28 Comparación de RMSE y MAE para la Temperatura	94
Figura 29 Comparación de RMSE y MAE para la Humedad	95

Figura 30 Comparación de RMSE y MAE para la Velocidad del Viento.....	96
---	----

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Factores de propagación en envíos de datos.....	31
Tabla 2 Características principales del ESP32 LoRa TTGO.....	46
Tabla 3 Características principales del DHT22.....	48
Tabla 4 Características principales del BH1750.....	51
Tabla 5 Características principales del YGC-F5-5V-V.....	53
Tabla 6 Características de las Baterías Rixn 18650	55
Tabla 7 Características del Panel Solar PS-5V.....	57
Tabla 8 Características principales de Pfsense	59
Tabla 9 Características del D-Link DIR-825M	61
Tabla 10 Bases de Datos de Acceso Libre	85
Tabla 11 Comparativa entre RMSE y MAE.....	93
Tabla 12 Presupuesto de Estación Meteorológica.....	112

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la tecnología IoT (Internet de las Cosas), la implementación de estaciones meteorológicas se presenta como una solución innovadora para optimizar la gestión de recursos en la piscicultura (Sierra & Cedeño, 2021). Aunque aún no se ha establecido un modelo de diseño e implementación universalmente aceptado, la tecnología LoRa se perfila como una de las más relevantes para aplicaciones en este campo (Centenaro et al., 2016). Esta tecnología, que opera en bandas de frecuencia libres como la de 902-928 MHz en América, ofrece un medio eficaz para la transmisión de datos desde diversos sensores instalados en estanques de cultivo (LoRa Alliance, 2024).

La expansión de LoRa ha sido exponencial, impulsada por sus múltiples aplicaciones, que abarcan desde la agricultura y la ganadería hasta la creación de ciudades inteligentes y el monitoreo ambiental (Sanhueza & Ruiz, 2020). En particular, su bajo costo en comparación con otras tecnologías de transmisión de datos la convierte en una opción atractiva para proyectos de investigación y desarrollo (Centenaro et al., 2016).

En El Salvador, la adopción de esta tecnología está aún en una fase inicial, limitándose principalmente a pruebas en la banda ISM (902-928 MHz). El presente trabajo tiene como objetivo diseñar e implementar una estación meteorológica en los estanques de piscicultura de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática de la Universidad de El Salvador, utilizando hardware accesible y cumpliendo con las normativas correspondientes (Hernández et al., 2014). La propuesta se sustentará con los parámetros obtenidos en campo, referenciados a sensores ya existentes para validar su correcto funcionamiento.

Este estudio también evaluará las condiciones necesarias para implementar una red de sensores mediante tecnología LoRa en el contexto de la piscicultura. A través de una investigación teórica sobre la terminología y normativas asociadas, así como un análisis de aplicaciones exitosas (Bassi et al., 2013), se establecerán las bases para la implementación práctica. Finalmente, se implementará un prototipo del diseño de la estación ubicada en los puntos de interés, así como también la ubicación del Gateway, permitiendo la transmisión de datos sobre los parámetros meteorológicos y su visualización en una plataforma dedicada a proyectos IoT como ThingsBoard (ThingsBoard, 2023).

OBJETIVOS:

GENERAL:

Implementar una estación meteorológica funcional en los estanques de piscicultura de la facultad de ciencias naturales en la Universidad de El Salvador, con el propósito de monitorear y registrar de manera precisa los parámetros meteorológicos

ESPECIFICOS:

- Desarrollar un diseño funcional y adecuado para una estación meteorológica que permita la medición precisa de la temperatura ambiental, humedad del aire, luminosidad ambiental y velocidad del viento, utilizando sensores de bajo costo.
- Configurar e integrar los sensores de temperatura y humedad, luminosidad ambiental y velocidad del viento con el microcontrolador ESP32 LORA TTGO para la captura de datos de manera eficiente.
- Utilizar el enlace Lora del microcontrolador para la comunicación a larga distancia de los datos recolectados por la estación meteorológica, lo que permitirá la transmisión de datos por el enlace de radio.
- Establecer una conexión segura utilizando el protocolo HTTPS entre el Gateway y la plataforma IoT ThingsBoard para la recopilación y presentación de los datos adquiridos.

ALCANCES:

- Realizar un prototipo físico de la estación meteorológica que incluya la disposición de los sensores de temperatura, humedad, luminosidad y velocidad del viento, garantizando que cada sensor esté correctamente orientado y protegido de condiciones ambientales adversas, para asegurar la precisión en las mediciones.
- Implementar y validar un código en el microcontrolador que permita la lectura continua y precisa de los datos de los sensores, asegurando que los datos sean capturados de forma eficiente y en intervalos de tiempo programables, con mecanismos de manejo de errores para asegurar la integridad de los datos.
- Parametrizar la configuración del enlace Lora para permitir la transmisión de datos a en condiciones de vegetación, realizando pruebas de distancia y ajustando parámetros de transmisión para optimizar la calidad de la señal y reducir el consumo de energía.
- Desarrollar la configuración del Gateway para que se comunique de manera segura con la plataforma IoT ThingsBoard mediante HTTPS y validar la recepción correcta de los datos a través de pruebas de conexión.

ANTECEDENTES:

La tecnología IoT (Internet de las Cosas) ha ido ganando relevancia en El Salvador en los últimos años, impulsada por la necesidad de modernizar diversos sectores y mejorar la eficiencia en la recolección y análisis de datos ([El Salvador ya conectó todo el sistema público de salud, 2023](#)). El gobierno de El Salvador ha mostrado interés en implementar tecnologías digitales en áreas como la salud, la educación y la seguridad. Esto incluye la promoción de proyectos relacionados con IoT que buscan mejorar la infraestructura y los servicios públicos ([DPL News, 2023](#)).

Se han desarrollado proyectos de IoT en el sector agrícola para optimizar el riego, monitorear las condiciones climáticas y mejorar la productividad. Estos sistemas permiten a los agricultores tomar decisiones basadas en datos precisos y en tiempo real ([Rivas Domínguez et al., 2022](#)). La expansión de la cobertura de internet móvil y fija ha facilitado el crecimiento de soluciones IoT. Operadoras de telecomunicaciones han comenzado a ofrecer servicios y plataformas que permiten la integración de dispositivos IoT en diversas aplicaciones ([Tigo El Salvador ampliará su cobertura LTE 4G en 92 distritos este 2025, 2025](#); [Tigo El Salvador amplía inversión para mejorar conectividad nacional, 2025](#)).

Universidades y centros de formación han comenzado a incluir la formación en IoT en sus programas académicos, preparando a nuevos profesionales para un mercado laboral en evolución. Esto incluye cursos sobre programación, diseño de sistemas y análisis de datos ([Universidad Don Bosco, s.f.](#)). Iniciativas para implementar medidores inteligentes y sistemas de gestión energética han comenzado a surgir, lo que permite a las empresas y hogares monitorear su consumo y optimizar el uso de recursos energéticos ([AES El Salvador, 2022](#)).

Existen alianzas con empresas y universidades internacionales para impulsar proyectos de investigación y desarrollo en IoT, lo que ha permitido el intercambio de conocimientos y tecnología ([Universidad Don Bosco, s.f.](#)).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:

La piscicultura en El Salvador, una actividad esencial para la producción de alimentos y el sustento de muchas comunidades enfrenta diversos desafíos relacionados con el manejo y la optimización de los recursos acuáticos. Uno de los factores más críticos que impactan la salud y el crecimiento de las especies acuáticas es el clima, que influye en las condiciones del agua y en la biodiversidad presente en los estanques.

A pesar de su importancia, muchas instalaciones de piscicultura carecen de sistemas adecuados para el monitoreo de parámetros meteorológicos y ambientales, lo que limita la capacidad de los piscicultores para tomar decisiones informadas. Esto puede resultar en la pérdida de producción, la propagación de enfermedades y un uso ineficiente de los recursos.

La Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad de El Salvador, encargada de la formación de profesionales en áreas relacionadas con las ciencias ambientales, presenta una oportunidad para abordar esta problemática mediante el diseño e implementación de una estación meteorológica en los estanques de piscicultura. Sin embargo, actualmente no existe un sistema accesible y eficiente que permita el monitoreo continuo y preciso de parámetros como la temperatura ambiental, la humedad del aire, la luminosidad y la velocidad del viento.

JUSTIFICACIÓN

La implementación de una estación meteorológica en los estanques de piscicultura de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad de El Salvador es esencial para optimizar la producción y calidad de los cultivos, mejorando la gestión de recursos en un sector clave para la seguridad alimentaria y la economía local. Utilizando tecnologías de bajo costo, este proyecto facilitará el monitoreo de condiciones ambientales críticas, fomentará la investigación científica y contribuirá a la adaptación de la piscicultura al cambio climático. Así, se impulsa la innovación en el sector agrícola, beneficiando tanto a los piscicultores como a la comunidad en general. La recolección de datos meteorológicos precisos es vital para la adaptación de la piscicultura a los efectos del cambio climático. Comprender cómo las variaciones climáticas afectan la producción acuática permitirá a los piscicultores implementar estrategias de mitigación y adaptación.

CAPITULO 1: MARCO TEORICO

1.1 INTERNET DE LAS COSAS (IOT)

El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés Internet of Things) hace referencia a la interconexión de dispositivos físicos y objetos a través de redes de comunicación, lo que permite que estos dispositivos recojan, intercambien y procesen datos sin intervención humana directa ([International Telecommunication Union \[ITU\], 2012](#)). En el IoT, los objetos pueden ser desde electrodomésticos hasta vehículos o sistemas de monitoreo de salud, y estos se conectan a la red global de Internet o a redes privadas mediante protocolos de comunicación específicos ([Internet Architecture Board \[IAB\], 2015](#)).

El término "Internet de las Cosas (IoT)" fue utilizado por primera vez en 1999 por el británico Kevin Ashton, quien lo empleó para describir cómo las etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID) se conectaban a Internet. Estas etiquetas se usaban en las cadenas de suministro para contabilizar y hacer seguimiento de las mercancías sin la necesidad de intervención humana ([Rose, Eldridge, & Chapin, 2015](#)).

A pesar del notable crecimiento de esta tecnología en los últimos años, no existe una definición única y aceptada a nivel global del IoT. Distintas organizaciones como el Consejo de Arquitectura de Internet (IAB), la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y Oxford Dictionaries, entre otras, han propuesto diferentes enfoques para describir el concepto de IoT y sus características principales ([IAB, 2015](#); [ITU, 2012](#); [Oxford University Press, s.f.](#)).

Para los fines de este trabajo, el término "Internet de las Cosas" se entiende como el conjunto de escenarios en los cuales la conectividad de red y la capacidad de procesamiento se extienden a objetos, sensores y elementos cotidianos, permitiendo que estos dispositivos generen, intercambien y utilicen datos con una intervención humana mínima ([Rose et al., 2015](#)).

1.1.1 Evolución del IoT

La evolución del Internet de las Cosas (IoT) ha sido impulsada por diversos avances tecnológicos, entre los cuales destacan:

- Desarrollo de sensores: Los sensores miniaturizados permiten que los dispositivos recojan información del entorno, como temperatura, humedad, luz o presencia (Gubbi et al., 2013).
- Conectividad de red: La expansión de la infraestructura de redes inalámbricas, como Wifi, Bluetooth, Zigbee, y redes de baja potencia como LoRa, ha facilitado la interconexión de dispositivos (Atzori et al., 2010).
- Nube y procesamiento de datos: Las capacidades de almacenamiento y procesamiento de datos en la nube han permitido que los datos recopilados por los dispositivos IoT sean almacenados y analizados en tiempo real (Xu et al., 2014; Manyika et al., 2015).
- Avances en la inteligencia artificial (IA): La IA y el aprendizaje automático (machine learning) son utilizados para procesar grandes volúmenes de datos generados por los dispositivos IoT y tomar decisiones autónomas (Minerva et al., 2015).

1.1.2 Componentes Principales de un Sistema IoT

Los Sistemas IoT se componen de varios componentes como los siguientes:

- Dispositivos/objetos físicos: Son los objetos que están equipados con sensores y/o actuadores. Ejemplos incluyen sensores de temperatura, cámaras, vehículos, electrodomésticos inteligentes, entre otros (Gubbi et al., 2013; Atzori et al., 2010).
- Conectividad: Los dispositivos se comunican entre sí y con otros sistemas a través de diferentes tecnologías de comunicación. Entre ellas se encuentran Wifi, Bluetooth, Zigbee, 5G, entre otras, dependiendo de la distancia, el consumo energético y el ancho de banda requerido (Miorandi et al., 2012; Bandyopadhyay & Sen, 2011).
- Plataforma de datos (Nube o edge computing): Los datos generados por los dispositivos son enviados a plataformas de almacenamiento y análisis. Estas plataformas pueden ser basadas en la nube o en el borde (edge computing), donde el

procesamiento se realiza más cerca del dispositivo para reducir la latencia (Shi et al., 2016).

- Aplicaciones y servicios: Las aplicaciones permiten que los usuarios interactúen con los dispositivos IoT, obtengan *insights* de los datos procesados y controlen remotamente los dispositivos (Gubbi et al., 2013; Miorandi et al., 2012).

1.1.3 Tipos de IoT

IoT se puede clasificar en varios tipos según su aplicación y el contexto en que se utilice:

- IoT Industrial (IIoT): Se refiere al uso de IoT en la industria manufacturera, automotriz, energía, minería y otras áreas. Permite la automatización de procesos, el mantenimiento predictivo de equipos y la mejora en la eficiencia operativa (Bandyopadhyay & Sen, 2011).
- IoT en el hogar (Smart Home): El uso de dispositivos conectados en el hogar, como termostatos inteligentes, cámaras de seguridad, electrodomésticos conectados y asistentes virtuales, mejora la comodidad, seguridad y eficiencia energética (Miorandi et al., 2012).
- IoT en la salud (eHealth): Utilización de dispositivos conectados para monitorizar la salud de las personas en tiempo real, como relojes inteligentes o dispositivos médicos que recogen datos de pacientes (Gubbi et al., 2013).
- IoT en la ciudad (Smart City): Integración de dispositivos IoT en infraestructuras urbanas para mejorar la gestión de los recursos y servicios públicos (Atzori et al., 2010).
- IoT en la agricultura (Smart Agriculture): Uso de sensores y dispositivos conectados en el campo para optimizar el uso de recursos y monitorear la salud de los cultivos y el ganado (Manyika et al., 2015).

1.1.4 Beneficios del IoT

- El IoT ofrece múltiples beneficios a nivel tanto individual como colectivo:
- Mejora de la eficiencia y productividad: La automatización y el monitoreo en tiempo real permiten optimizar recursos y mejorar la productividad (Miorandi et al., 2012).
- Ahorro de costos: Gracias a la optimización de recursos y la automatización de tareas, las organizaciones pueden reducir costos operativos (Gubbi et al., 2013).
- Toma de decisiones basada en datos: Los datos generados por dispositivos IoT ofrecen *insights* valiosos para decisiones más informadas (Manyika et al., 2015).
- Mejora de la calidad de vida: En aplicaciones del hogar o de la salud, IoT puede brindar mayor comodidad, seguridad y bienestar (Bandyopadhyay & Sen, 2011).

1.1.5 Desafíos y Consideraciones del IoT

A pesar de sus beneficios, IoT presenta varios desafíos técnicos y sociales:

- Seguridad y privacidad: La gran cantidad de datos sensibles genera riesgos relacionados con ciberseguridad y protección de la privacidad (Atzori et al., 2010).
- Interoperabilidad: La diversidad de fabricantes y tecnologías puede dificultar la compatibilidad entre dispositivos (Gubbi et al., 2013).
- Escalabilidad: Los sistemas deben poder manejar grandes volúmenes de datos y conexiones a medida que IoT crece (Miorandi et al., 2012).
- Consumo energético: Dado que muchos dispositivos funcionan con baterías, la eficiencia energética es crucial, especialmente en zonas remotas (Bandyopadhyay & Sen, 2011).

1.1.6 Tendencias Futuras en IoT

Tendencias emergentes clave que impactarán el futuro del IoT incluyen:

- 5G: Redes 5G permitirán comunicaciones más rápidas y eficientes entre dispositivos IoT (Manyika et al., 2015).
- Edge Computing: Procesar datos cerca del dispositivo reduce la latencia y carga en la nube (Shi et al., 2016).

- Inteligencia Artificial y Machine Learning: Estas tecnologías permitirán análisis avanzados y decisiones autónomas en los dispositivos ([Gubbi et al., 2013](#)).

1.1.7 Plataformas IoT

Existen muchas plataformas que permiten la interacción entre dispositivos y el modelo de comunicación que emplee. La plataforma utilizada puede variar desde recibir datos y almacenarlos en una interfaz estándar hasta poder realizar predicciones, aprendizaje, inteligencia de negocios entre muchos más.

Las plataformas IOT deben ser capaz de brindar la cobertura de los siguientes servicios

- Conexión fácil y rápida de los recursos de IoT
- Almacenamiento y uso de datos recibidos
- Fácil acceso y uso de los recursos global de IoT y datos detectados

Las plataformas más utilizadas son The Things Network (TTN) y UBIDOTS debido a su gran conectividad con variedad de nodos y su interfaz amigable.

The Things Network (TTN) es una plataforma de código abierto el cual decodifica los datos de los Gateway y los transmite a aplicación de terceros. Ofrece la integración de lenguajes HTTP y MQTT y una serie de APIs en distintos lenguajes como: Go, Java, NODO-RED y Node.js, con las cuales se puede construir una aplicación end-to-end, mediante el uso de varios nodos, Gateway y servidores TTN ([thethingsnetwork, s.f.](#)). Esta plataforma es miembro de Lora Alliance por lo cual la hace muy útil al usarla con la tecnología LoRaWan. ([The Things Network, s.f.](#))

La plataforma de UBIDOTS envía datos a la nube desde cualquier dispositivo conectado a internet, se pueden configurar acciones de respuesta y alertas basados en datos en tiempo real a través de herramientas visuales. Ubidots ofrece una API REST que admite HTTP y HTTPS. ([Ubidots, s.f.](#))

1.2 TECNOLOGÍA LORA (LONG RANGE)

LoRa (Long Range) es una tecnología de comunicación inalámbrica diseñada para transmitir datos a largas distancias con bajo consumo de energía, ideal para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT). Su principal ventaja es su capacidad para operar en entornos urbanos y rurales con excelente cobertura, mientras que utiliza muy poca energía, lo que permite que los dispositivos puedan funcionar durante años sin necesidad de recargar sus baterías ([Semtech Corporation, s.f.](#); [Augustin et al., 2016](#)).

1.2.1 Características Principales de LoRa

- **Largo Alcance:** LoRa está optimizada para distancias de comunicación más largas en comparación con tecnologías como Wifi o Bluetooth, alcanzando hasta 15 km en áreas rurales y 2-5 km en zonas urbanas ([Centenaro et al., 2016](#)).
- **Bajo consumo de energía:** LoRa fue diseñada para dispositivos con baterías de larga duración, permitiendo años de funcionamiento sin reemplazo ([Augustin et al., 2016](#)).
- **Modulación de espectro expandido:** Utiliza *Chirp Spread Spectrum (CSS)*, una técnica que mejora la resistencia a interferencias y permite comunicaciones robustas en entornos complejos ([Semtech Corporation, s.f.](#); [Sornin et al., 2015](#)).
- **Baja velocidad de transmisión de datos:** Aunque LoRa no es adecuada para video en tiempo real, es ideal para transmitir pequeños paquetes de datos como temperatura o humedad ([Centenaro et al., 2016](#)).
- **Banda de frecuencia sin licencia:** Opera en bandas como 868 MHz (Europa), 915 MHz (América del Norte) o 433 MHz (otras regiones), facilitando su adopción sin necesidad de licencias especiales ([Sornin et al., 2015](#)).

1.2.2 Arquitectura de LoRa

LoRa se basa en una red tipo *estrella* (star network), donde los dispositivos finales (sensores, actuadores, etc.) se comunican con estaciones base (Gateways) conectadas a un servidor central. Esto facilita la implementación de redes IoT a gran escala ([LoRa Alliance, 2015](#)).

- Dispositivos finales: Son los sensores o actuadores que recogen datos o ejecutan acciones. Se caracterizan por su bajo costo, eficiencia energética y conectividad inalámbrica (Augustin et al., 2016).
- Gateways: Son puntos de acceso que reciben los datos de los dispositivos finales y los envían a servidores o plataformas en la nube (Centenaro et al., 2016).

Red LoRaWAN (LoRa Wide Area Network): Es el protocolo que gestiona la comunicación dentro de una red LoRa, definiendo cómo se conectan y comunican los dispositivos, cómo se gestiona la red y la seguridad de los datos (Sornin et al., 2015; LoRa Alliance, 2015).

1.2.3 Factores de Propagación en Comunicaciones LoRa

Los factores de propagación juegan un papel fundamental en la eficacia de la tecnología LoRa, ya que determinan el alcance y la estabilidad de la comunicación. Algunos de los factores más relevantes son:

- Pérdidas por distancia: La atenuación de la señal aumenta con la distancia entre el transmisor y el receptor.
- Interferencias electromagnéticas: Otros dispositivos en la misma banda de frecuencia pueden generar ruido y afectar la recepción de datos.
- Obstáculos físicos: Edificaciones, vegetación y cuerpos de agua pueden reflejar, absorber o dispersar la señal LoRa.
- Condiciones meteorológicas: Factores como la humedad, la lluvia y la presión atmosférica pueden alterar la propagación de la señal, reduciendo su efectividad en entornos abiertos.
- En el caso de aplicaciones en piscicultura, es fundamental evaluar estos factores para garantizar una transmisión eficiente de los datos recopilados por los sensores. (Ray, 2017; SIGET, 2022)

Tabla 1*Factores de propagación en envíos de datos*

Factor de propagación	Tasa de transferencia de datos	Velocidad de bits [bits/s]	Rango [km]	Sensibilidad Rx [dBm]	Carga máxima de paquetes [Bytes]
12	0	290	12	-136	51
11	1	440	10	-133	51
10	2	980	8	-132	51
9	3	1760	6	-129	115
8	4	3125	4	-126	222
7	5	5470	2	-123	222

Nota. La tabla muestra los factores de propagación para el envío de datos en la comunicación LoRa. Tabla extraída de ([Arias Argueta & Orozco Mejía, 2024](#))

1.2.4 Ventajas de LoRa

- **Larga distancia de comunicación:** LoRa es ideal para aplicaciones que requieren conectividad a larga distancia, como en áreas rurales o difíciles de alcanzar ([Augustin et al., 2016](#); [Reynders et al., 2016](#)).
- **Bajo consumo energético:** Esto permite que los dispositivos operen durante años sin necesidad de baterías o con un mantenimiento mínimo ([Semtech Corporation, s.f.](#)).
- **Escalabilidad:** LoRaWAN permite conectar miles de dispositivos en una sola red, ideal para aplicaciones a gran escala ([LoRa Alliance, 2015](#)).
- **Cobertura amplia y fiabilidad:** Gracias a la modulación Chirp Spread Spectrum (CSS), LoRa mantiene comunicaciones estables incluso en entornos con interferencias, donde otras tecnologías como Wifi o 4G fallan ([Augustin et al., 2016](#)).
- **Bajo costo de implementación:** Los dispositivos LoRa son relativamente económicos y al operar en bandas sin licencia, los costos de despliegue son significativamente menores ([Adelantado et al., 2017](#)).

1.2.5 Aplicaciones de LoRa

- **Agricultura inteligente:** Los sensores LoRa permiten monitorear condiciones agrícolas con bajo consumo y cobertura amplia, ideal para grandes campos ([Augustin et al., 2016](#)).
- **Ciudades inteligentes:** Perfecta para control de alumbrado, monitoreo de calidad del aire, tráfico y residuos, incluso en zonas remotas ([Adelantado et al., 2017](#)).
- **Medición de energía:** Utilizada en sistemas de medición automática que reportan consumo a distancia y sin intervención constante ([LoRa Alliance, 2015](#)).
- **Monitoreo ambiental:** LoRa es útil para medir temperatura, humedad o contaminación del agua en sitios de difícil acceso ([Reynders et al., 2016](#)).
- **Logística y gestión de activos:** Su alcance y bajo consumo permiten rastreo en tiempo real de mercancías y activos ([Semtech Corporation, s.f.](#)).

1.2.6 Desafíos de LoRa

- **Limitación de la velocidad de datos:** No es adecuada para transmisiones de gran volumen como video o archivos pesados ([Adelantado et al., 2017](#)).
- **Interferencia en entornos urbanos densos:** Aunque robusta, su rendimiento puede verse afectado por la congestión de señales ([Reynders et al., 2016](#)).
- **Seguridad:** Aunque LoRaWAN incluye cifrado y autenticación, requiere medidas adicionales para protegerse de amenazas en expansión ([LoRa Alliance, 2015](#)).

1.3 IMPORTANCIA DE PARAMETROS METEOROLOGICOS EN PISCICULTURA

Los parámetros meteorológicos son factores clave en la piscicultura, especialmente en la cría de especies como la tilapia y el camarón, ya que influyen directamente en la salud, crecimiento y productividad de los organismos acuáticos. Estos parámetros afectan las condiciones del ambiente acuático y, por ende, la fisiología de los animales. A continuación, se detallan algunos de los parámetros meteorológicos más importantes y su impacto en la piscicultura para la cría de tilapia y camarón.

1.3.1 Temperatura

La temperatura del agua es uno de los factores más importantes en la piscicultura, ya que influye en la tasa de metabolismo de los peces y camarones, su crecimiento, reproducción y comportamiento. Cada especie tiene un rango de temperatura óptimo para su desarrollo.

- Tilapia: La tilapia es una especie tropical que prefiere temperaturas entre 26 y 30°C. Temperaturas fuera de este rango pueden estresar a los peces, reducir su tasa de crecimiento, o incluso causar mortalidad ([Artemiolab, s. f.](#)).
- Camarón: El camarón también es sensible a las variaciones de temperatura, y la temperatura ideal oscila entre 28 y 32°C. Las temperaturas más bajas ralentizan su crecimiento, mientras que las más altas pueden ser fatales ([Artemiolab, s. f.](#)).

1.3.2 Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto en el agua es crucial para la supervivencia de la tilapia y el camarón. Las condiciones meteorológicas, como la temperatura y la presión atmosférica, influyen en la solubilidad del oxígeno en el agua. Durante las épocas de calor extremo, el oxígeno disuelto tiende a disminuir, lo que puede poner en riesgo a los organismos acuáticos.

Efecto del calor: El aumento de la temperatura reduce la cantidad de oxígeno que se disuelve en el agua, lo que puede causar estrés a los animales y limitar su crecimiento ([Hanna Instruments Colombia, s. f.](#); [Global Seafood Alliance, s. f.](#)).

1.3.3 Precipitaciones y Calidad del agua

Las precipitaciones afectan directamente la calidad del agua en los estanques de piscicultura. La lluvia puede alterar el pH, la turbidez, la salinidad y la concentración de nutrientes en el agua, lo que influye en la salud de los animales.

- Camarón: Los camarones requieren un ambiente de agua salada o salobre, por lo que la salinidad debe mantenerse constante. Las lluvias pueden reducir la salinidad del agua, lo que afecta negativamente su desarrollo ([Instituto del Agua, s. f.; Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016](#)).
- Tilapia: Aunque la tilapia es más resistente a cambios en la salinidad, las fluctuaciones extremas de pH o turbidez pueden causar enfermedades o estresar a los peces ([Instituto del Agua, s. f.; Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016](#)).

1.3.4 Viento

El viento tiene un impacto en la oxigenación del agua y en la temperatura superficial de los estanques o jaulas flotantes. Además, los vientos fuertes pueden alterar la distribución de los nutrientes y causar movimientos bruscos en el agua, lo que afecta el comportamiento de los organismos.

Efecto en el agua: El viento puede incrementar la aireación natural del agua, ayudando a mantener los niveles de oxígeno adecuados, pero también puede alterar las condiciones del agua en la superficie, aumentando la evaporación y el enfriamiento ([Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016](#)).

1.3.5 Humedad

La humedad influye en la tasa de evaporación de los estanques o sistemas de cultivo, lo que puede afectar la salinidad (en el caso de camarones) y la temperatura del agua. Un ambiente con alta humedad tiende a reducir la evaporación, mientras que una baja humedad incrementa la pérdida de agua, afectando las condiciones de los cultivos.

Efectos en la cría de camarón y tilapia: Las fluctuaciones en la humedad pueden alterar la calidad del agua, lo que afecta directamente a los organismos en cultivo ([Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016](#)).

1.3.6 Radiación Solar

La radiación solar es fundamental para la fotosíntesis de las plantas acuáticas, que son una fuente de alimento para muchos organismos acuáticos, y también afecta la temperatura del agua. Una alta exposición al sol aumenta la temperatura superficial del agua, mientras que las nubes o condiciones meteorológicas nubladas pueden reducir la radiación, impactando en el crecimiento de las especies acuáticas.

Tilapia y Camarón: Una adecuada cantidad de radiación solar es necesaria para el desarrollo de algas y plantas que sirven como alimento para los organismos, pero un exceso de calor puede resultar en una mayor evaporación y estrés térmico ([Universidad Politécnica de Madrid, s. f.](#); [AquaHoy, 2021, 2023](#)).

1.3.7 Presión Atmosférica

La presión atmosférica influye en la cantidad de oxígeno disuelto en el agua y, por ende, en la respiración de los organismos acuáticos. Los cambios rápidos en la presión pueden afectar el comportamiento de los peces y los camarones, reduciendo su actividad o predisponiéndolos a enfermedades.

1.3.8 Intensidad de Luz

La Intensidad de luz es un factor importante en la cría de tilapia y camarones, ya que influye en varios aspectos del comportamiento, la fisiología y el crecimiento de estos organismos. Aunque ambos animales no dependen directamente de la luz como fuente de energía (como lo hacen las plantas), la luz tiene efectos significativos en su ciclo biológico, la reproducción, el metabolismo y la calidad del ambiente acuático en el que se desarrollan ([AquaHoy, 2023](#)).

1.4 APLICACIONES DE TECNOLOGIAS IOT DE PISCICULTURA EN EL SALVADOR

La tecnología IoT (Internet de las Cosas) ha comenzado a transformar la piscicultura en diversas partes del mundo, incluido El Salvador. A través de dispositivos conectados y sensores inteligentes, es posible optimizar la gestión de los recursos acuáticos, monitorear las condiciones del ambiente y mejorar la eficiencia de los procesos de cría de peces, como la tilapia y el camarón. A continuación, se presentan algunas aplicaciones tecnológicas de IoT en la piscicultura que están siendo implementadas o que podrían ser beneficiosas en El Salvador.

1.4.1 Monitoreo de Parámetros ambientales

En la piscicultura, el control de las condiciones ambientales, como la temperatura, el oxígeno disuelto, el pH y la salinidad, es esencial para garantizar la salud y el crecimiento adecuado de los peces. Los sensores IoT permiten monitorear estos parámetros en tiempo real, proporcionando datos que pueden ayudar a los acuicultores a ajustar las condiciones de los estanques o sistemas de cultivo de manera precisa ([Abed & Van, 2022](#)).

- **Temperatura del agua:** Los sensores IoT pueden medir la temperatura del agua de los estanques para garantizar que se mantenga dentro de los rangos óptimos para especies como la tilapia o el camarón.
- **Oxígeno disuelto:** Los sensores de oxígeno pueden alertar a los acuicultores cuando los niveles bajan, lo que podría poner en riesgo a los animales, permitiendo la intervención temprana.
- **pH y salinidad:** Monitorear estos parámetros ayuda a prevenir problemas relacionados con la calidad del agua, que pueden afectar el bienestar de los organismos acuáticos.

1.4.2 Sistemas de Alimentación Inteligente

Uno de los mayores retos en la piscicultura es la correcta alimentación de los peces, ya que tanto el exceso como la falta de alimento pueden tener efectos negativos en la producción. Con IoT, es posible automatizar y controlar la alimentación de los peces, lo que ayuda a reducir el desperdicio de alimentos y optimiza la cantidad de nutrientes proporcionados a los animales ([González, 2023](#)).

- **Alimentadores automáticos:** Sensores y sistemas automatizados pueden liberar la cantidad exacta de alimento en función de las necesidades de los peces, lo que mejora la eficiencia y reduce los costos.
- **Monitoreo de la salud y crecimiento:** Con cámaras o sensores de movimiento, se puede medir el comportamiento y crecimiento de los peces, ajustando la alimentación según los resultados.

1.4.3 Control y Gestión de Calidad del Agua

La calidad del agua es crucial para el bienestar de los peces. Los sensores IoT pueden medir parámetros como la turbidez, la presencia de amoníaco o nitritos, y otros contaminantes, proporcionando datos en tiempo real para realizar ajustes rápidos ([Rodríguez & Hernández, 2021](#)).

- **Monitoreo en tiempo real:** Los sensores conectados a plataformas en la nube permiten a los acuicultores monitorear constantemente la calidad del agua y recibir alertas cuando los niveles de contaminantes o de condiciones desfavorables superan los umbrales preestablecidos.
- **Automatización del tratamiento del agua:** Sistemas automáticos pueden ajustar el nivel de oxígeno, el pH o agregar productos químicos para tratar el agua sin la necesidad de intervención constante por parte del personal.

1.4.4 Monitoreo de la Salud de los Peces

El monitoreo de la salud de los peces es otro aspecto fundamental para evitar enfermedades que puedan afectar la producción. Con el uso de IoT, se pueden detectar signos tempranos de enfermedades o condiciones adversas. (Silva & Pérez, 2022).

- **Sensores biométricos:** En algunos casos, se utilizan sensores para detectar el comportamiento anómalo de los peces, como una disminución en la actividad o cambios en sus patrones de natación, lo cual podría indicar estrés o enfermedad.
- **Cámaras y análisis de imágenes:** Las cámaras conectadas a sistemas de visión artificial pueden ser utilizadas para monitorear el estado físico de los peces y detectar signos de enfermedades o lesiones.

1.4.5 Gestión de Energía

La piscicultura requiere un consumo energético considerable, especialmente en sistemas de recirculación de agua o en instalaciones de aireación. Las soluciones IoT permiten monitorear y optimizar el consumo de energía, reduciendo costos operativos (González, 2023).

- **Sensores de energía:** Los dispositivos IoT pueden monitorear el uso de energía en los sistemas de aireación, bombeo de agua y calefacción, lo que permite a los acuicultores tomar decisiones informadas sobre cuándo y cómo operar estos sistemas para maximizar la eficiencia energética.
- **Automatización de sistemas:** Los sistemas automatizados pueden regular la operación de bombas y compresores para evitar el uso innecesario de energía, reduciendo costos y mejorando la sostenibilidad.

1.4.6 Rastreo y Gestión de Inventarios

La tecnología IoT también puede ser aplicada para mejorar la trazabilidad de los productos acuícolas, desde la producción hasta la distribución, permitiendo un mejor control de inventarios y la gestión de los productos en las instalaciones de almacenamiento (Rodríguez & Hernández, 2021).

- **Rastreo de productos:** Los dispositivos de rastreo basados en IoT pueden ayudar a seguir la ubicación y el estado de los productos acuícolas en tiempo real durante su proceso de distribución, lo que aumenta la eficiencia logística.
- **Sistemas de inventario automatizados:** A través de sensores y etiquetas RFID, se pueden gestionar los inventarios de productos acuícolas de manera automatizada, mejorando la precisión y reduciendo el desperdicio.

1.4.7 Agricultura Acuática Integrada (IMTA)

En El Salvador, los sistemas de Agricultura Acuática Integrada (IMTA, por sus siglas en inglés) están comenzando a ganar popularidad. Estos sistemas combinan la producción de peces y otras especies acuáticas con cultivos agrícolas o vegetales, lo que permite aprovechar mejor los recursos naturales. IoT puede ayudar a integrar y gestionar estos sistemas, optimizando el uso del agua, los nutrientes y mejorando la sostenibilidad del proceso (Silva & Pérez, 2022).

1.5 DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES EN EL SALVADOR

- **Infraestructura:** Aunque el uso de IoT en la piscicultura tiene un gran potencial, una de las principales barreras es la infraestructura tecnológica. El acceso a internet y la conectividad en áreas rurales puede ser limitado, lo que puede dificultar la implementación de sistemas IoT en algunas regiones de El Salvador (García, 2021; Rodríguez & Martínez, 2022).
- **Costo de la tecnología:** El costo inicial de los dispositivos IoT puede ser una limitante para los pequeños productores. Sin embargo, con el tiempo, la disminución de precios y el apoyo gubernamental o de organizaciones internacionales podría facilitar la adopción de estas tecnologías (Smith & Hernández, 2023).
- **Capacitación:** Los acuicultores necesitarán capacitación para operar y gestionar tecnologías avanzadas, lo cual puede ser una oportunidad para desarrollar programas de formación e innovación tecnológica en el sector (López, 2021).

1.6 BENEFICIOS DE LA MEDICION DE PARAMETROS METEOROLOGICOS EN LA MEJORA DE LA PRODUCCION DE TILAPIAS Y CAMARONES

El monitoreo y análisis de los parámetros meteorológicos es fundamental para la mejora de la producción de tilapias y camarones, especialmente en sistemas acuícolas, como estanques, jaulas flotantes y sistemas de recirculación. Estos parámetros, que incluyen la temperatura, la humedad, la precipitación, la radiación solar y la velocidad del viento, tienen un impacto directo en la salud, el crecimiento y la eficiencia de los organismos acuáticos.

1.6.1 Optimización de la Calidad del Agua

- La calidad del agua es uno de los factores más críticos en la producción de tilapias y camarones. Los parámetros meteorológicos influyen directamente en las condiciones del agua y pueden ayudar a mantenerlas dentro de los rangos óptimos para el desarrollo de estos organismos (Rodríguez & Pérez, 2018).
- **Temperatura del agua:** La temperatura del agua influye en el metabolismo de los peces y camarones. Para la tilapia, por ejemplo, la temperatura ideal oscila entre los 26°C y 30°C. El monitoreo constante de la temperatura permite ajustar las condiciones del estanque o implementar sistemas de calefacción o refrigeración si es necesario, favoreciendo un ambiente adecuado para el crecimiento (Vega & López, 2019).
- **Oxígeno disuelto:** La temperatura y la presión atmosférica influyen en la concentración de oxígeno disuelto en el agua. Temperaturas elevadas, por ejemplo, pueden reducir los niveles de oxígeno, lo que podría generar estrés en los organismos acuáticos. El monitoreo en tiempo real ayuda a implementar medidas para asegurar una cantidad adecuada de oxígeno, como la adición de aireadores (Abarca & García, 2020).
- **pH y salinidad:** Las precipitaciones y la radiación solar afectan el pH y la salinidad del agua. Monitorear estos parámetros asegura que se mantengan en niveles adecuados, lo que reduce el riesgo de enfermedades y mejora la salud de los organismos acuáticos (Rodríguez & Pérez, 2018).

1.6.2 Mejora en el Crecimiento y la Salud de los Organismos Acuáticos

El bienestar de los camarones y tilapias depende de la adecuada gestión de los parámetros meteorológicos que influyen en su entorno. El seguimiento de factores como la temperatura y la humedad contribuye a maximizar su crecimiento y reducir la mortalidad (Pérez & Torres, 2020).

- **Temperatura óptima:** Un control adecuado de la temperatura permite que los peces y camarones crezcan más rápido, ya que estos organismos tienen una tasa de crecimiento directamente relacionada con la temperatura. Temperaturas fuera del rango ideal pueden causar estrés térmico, afectando la tasa de alimentación, la digestión y el crecimiento (Vega & López, 2019).
- **Condiciones climáticas estables:** Las fluctuaciones bruscas en el clima, como cambios repentinos de temperatura o vientos fuertes, pueden afectar el comportamiento y la salud de los organismos acuáticos. El monitoreo permite anticipar estos cambios y tomar medidas preventivas, como reforzar las estructuras de contención o ajustar los sistemas de control de temperatura (Abarca & García, 2020).

1.6.3 Gestión Eficiente de los Recursos Hídricos

El riego y la gestión de agua son cruciales en la producción acuícola. Los parámetros meteorológicos, como las precipitaciones y la humedad, permiten optimizar el uso de los recursos hídricos en las granjas de tilapia y camarones (Rodríguez & Pérez, 2018).

- **Control de lluvias:** Las precipitaciones son un factor importante en la gestión de los estanques acuícolas. Demasiada lluvia puede alterar la calidad del agua, diluir los nutrientes y reducir la concentración de oxígeno, mientras que una cantidad insuficiente puede generar estrés por falta de agua. Con la ayuda de pronósticos meteorológicos, los acuicultores pueden ajustar la cantidad de agua añadida y el control de las condiciones del estanque (Vega & López, 2019).
- **Precipitación y control de la salinidad:** En sistemas de acuicultura de camarones, donde se requiere agua salina, las lluvias pueden afectar los niveles de salinidad. El

monitoreo continuo permite realizar ajustes a tiempo para mantener la salinidad ideal para los camarones (Abarca & García, 2020).

1.6.4 Prevención de Riesgos y Desastres Naturales

El monitoreo meteorológico también juega un papel clave en la prevención de desastres naturales, como tormentas, inundaciones o sequías, que pueden tener un impacto negativo en la producción acuícola (Pérez & Torres, 2020).

- **Alertas tempranas de tormentas:** En regiones propensas a tormentas, huracanes o vientos fuertes, el monitoreo de la velocidad y dirección del viento, así como las precipitaciones, puede ayudar a anticipar estos eventos y tomar medidas preventivas, como reforzar las instalaciones o proteger las áreas de cultivo (Rodríguez & Pérez, 2018).
- **Sequías y control del agua:** En períodos de sequía o reducción de las lluvias, los parámetros meteorológicos permiten planificar con antelación el uso y gestión del agua para asegurar que los niveles sean suficientes para mantener la producción de tilapias y camarones sin comprometer su salud (Vega & López, 2019).

1.6.5 Optimización de la Alimentación y Nutrición

Las condiciones climáticas también afectan la demanda de nutrientes en los organismos acuáticos. La temperatura y la radiación solar, por ejemplo, influyen en el apetito y en la tasa de conversión alimenticia de los peces y camarones (Abarca & García, 2020).

- **Control de la temperatura:** Con temperaturas dentro del rango adecuado, los peces y camarones tienen un apetito mayor y aprovechan mejor el alimento, lo que mejora la tasa de conversión alimenticia (TCA) y reduce los costos de alimentación (Pérez & Torres, 2020).
- **Gestión del fotoperíodo:** La radiación solar y la cantidad de luz afectan el comportamiento de los peces. En sistemas cerrados, como los estanques o jaulas flotantes, el monitoreo de la radiación solar puede ayudar a ajustar el ciclo de

iluminación para optimizar el proceso de crecimiento de los organismos acuáticos (Vega & López, 2019).

1.6.6 Mejora en la Sostenibilidad y Rentabilidad

El monitoreo de los parámetros meteorológicos no solo mejora la salud y el crecimiento de los organismos, sino que también contribuye a hacer la producción más eficiente y sostenible (Rodríguez & Pérez, 2018).

- **Reducción de costos:** Al optimizar el uso de recursos como el agua, la energía y los alimentos, los acuicultores pueden reducir los costos operativos y aumentar la rentabilidad. Por ejemplo, la correcta gestión de los sistemas de aireación, calefacción o refrigeración, basada en las condiciones meteorológicas, puede reducir el gasto energético (Pérez & Torres, 2020).
- **Sostenibilidad:** El monitoreo de los parámetros ambientales contribuye a prácticas más sostenibles, al permitir una gestión más precisa de los insumos y al evitar el uso innecesario de recursos, lo que mejora el rendimiento a largo plazo de los sistemas acuícolas (Abarca & García, 2020).

1.6.7 Mejor Control de Plagas y Enfermedades

Las condiciones meteorológicas, como la humedad y la temperatura, también influyen en la prevalencia de enfermedades y plagas en los cultivos acuáticos (Rodríguez & Pérez, 2018).

Prevención de brotes: Monitorear la humedad y la temperatura permite a los acuicultores anticipar posibles brotes de enfermedades o la proliferación de parásitos y patógenos. Por ejemplo, en condiciones de alta humedad y temperatura, los riesgos de enfermedades bacterianas y parasitarias aumentan. Los datos meteorológicos permiten aplicar tratamientos a tiempo para evitar la propagación de estas enfermedades (Vega & López, 2019).

CAPÍTULO 2: COMPONENTES DE IMPLEMENTACIÓN

2.1 ESP32

El ESP32 es un microcontrolador de bajo costo y alto rendimiento desarrollado por Espressif Systems ([Espressif Systems, s.f.](#)). Es conocido por ser muy versátil y ampliamente utilizado en aplicaciones de electrónica y programación, especialmente en proyectos de Internet de las Cosas (IoT). Algunas de sus características clave incluyen:

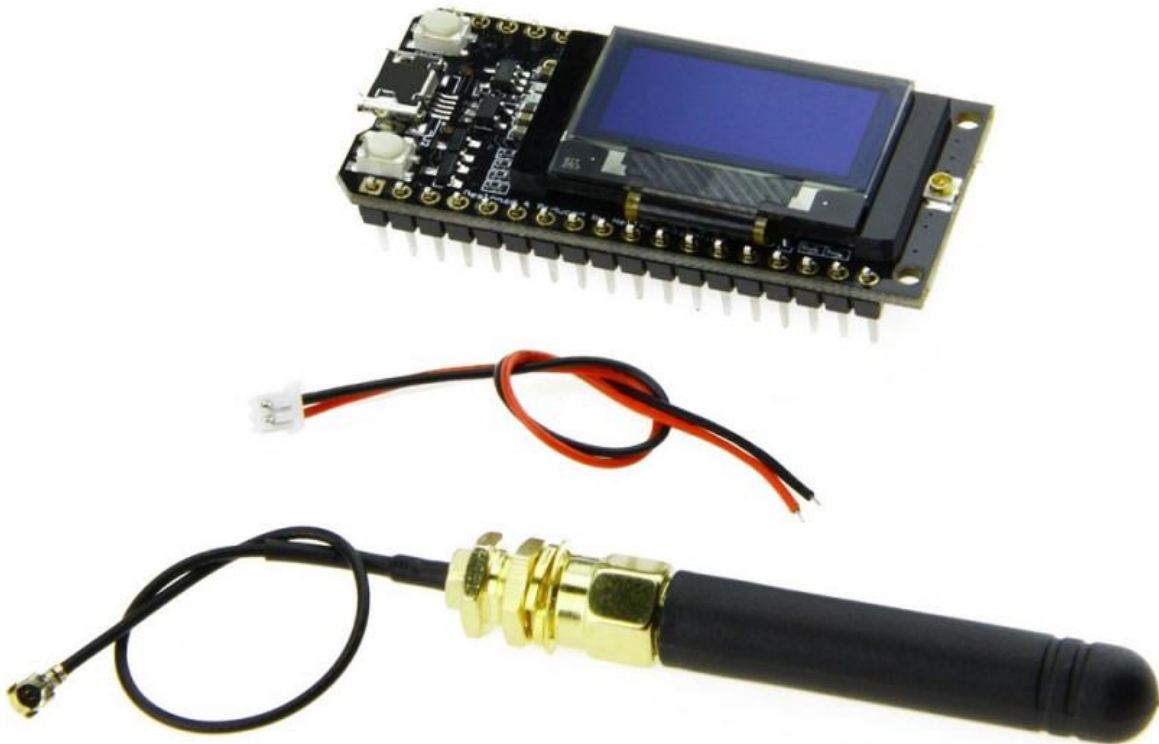
- **Conectividad:** El ESP32 ofrece conectividad Wifi y Bluetooth (tanto Bluetooth clásico como BLE, Bluetooth Low Energy), lo que lo hace ideal para proyectos que requieren comunicación inalámbrica.
- **Procesador potente:** Tiene un procesador de doble núcleo (dual-core) basado en Xtensa LX6, que puede alcanzar una velocidad de hasta 240 MHz, lo que lo hace adecuado para tareas que requieren una buena capacidad de procesamiento.
- **Entradas y salidas:** El ESP32 incluye una gran cantidad de pines GPIO (entradas y salidas digitales), así como capacidades para ADC (convertidores analógicos a digitales), DAC (convertidores digitales a analógicos), PWM (modulación por ancho de pulso), y otros protocolos como I2C, SPI, UART.
- **Bajo consumo energético:** Aunque es potente, el ESP32 tiene modos de bajo consumo que lo hacen adecuado para dispositivos que funcionan con baterías.
- **Amplia comunidad:** Al ser un microcontrolador muy popular en la comunidad de makers y desarrolladores, tiene un gran ecosistema de herramientas, librerías y ejemplos disponibles, lo que facilita su programación. Se puede programar principalmente usando el entorno de desarrollo Arduino IDE o PlatformIO, pero también es compatible con otros lenguajes y entornos, como MicroPython y Espressif's ESP-IDF.

2.2 ESP32 LoRa TTGO

El ESP32 LoRa TTGO es un microcontrolador que integra un módulo LoRa, permitiendo comunicaciones inalámbricas de largo alcance y bajo consumo energético. Además, cuenta con conectividad Wifi y Bluetooth, lo que amplía sus posibilidades de comunicación y aplicación.

Figura 1

ESP32 LoRa TTGO



Nota. Microcontrolador ESP32 LoRa TTGO. Imagen extraída de ([Rabtron, s.f.](#))

Tabla 2*Características principales del ESP32 LoRa TTGO*

Características	Descripción
Microcontrolador (ESP32)	Doble núcleo con conectividad Wifi y Bluetooth, permitiendo tareas adicionales además de LoRa.
Módulo LoRa	Tecnología de modulación para transmisión de datos a largas distancias con bajo consumo energético. Basado en el chip Semtech SX1276/78.
Bajo consumo energético	Ideal para aplicaciones IoT que requieren eficiencia energética, permitiendo operación prolongada con baterías.
Comunicaciones de largo alcance	Capacidad de comunicación a varios kilómetros, dependiendo del entorno, ideal para monitoreo remoto.
Conectividad dual	Compatibilidad con Wifi, Bluetooth y LoRa, ofreciendo flexibilidad para aplicaciones locales y remotas.
Entradas y salidas	Múltiples pines GPIO, soporte para PWM, ADC, DAC e interfaces SPI, I2C y UART.

Nota. Tabla de las características del ESP32 LoRa TTGO. Datos extraídos de ([BricoGeek](#), s.f.)

2.3 DTH22

El DHT22 (también conocido como AM2302) es un sensor de temperatura y humedad digital ampliamente utilizado en proyectos de electrónica, especialmente en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT), sistemas de monitoreo ambiental, y control de clima.

Figura 2

Sensor de Temperatura y Humedad DTH22



Nota. Sensor de Temperatura y Humedad DTH22. Imagen extraída de ([Agelektronik, s.f.](#))

Tabla 3*Características principales del DHT22*

Características	Descripción
Medición de temperatura	Rango de -40°C a 80°C con una precisión de $\pm 0.5^\circ\text{C}$, adecuado para entornos cálidos y fríos.
Medición de humedad	Rango de 0% a 100% de humedad relativa con una precisión de $\pm 2\%$ RH, ideal para monitoreo ambiental en invernaderos, almacenes y viviendas.
Salida digital	Transmite datos en formato binario, facilitando la lectura y procesamiento por microcontroladores como ESP32 y Arduino. Utiliza un solo pin para la comunicación, simplificando la integración.
Bajo consumo energético	Optimizado para aplicaciones de bajo consumo, ideal para dispositivos alimentados por batería.
Velocidad de actualización	Proporciona una nueva lectura de temperatura y humedad cada 2 segundos.

Nota. Características del Sensor de Temperatura y Humedad DHT22. Datos extraídos de [\(Naylamp Mechatronics, s.f.\)](#)

2.4 BH1750

El BH1750 es un sensor digital de luminosidad o intensidad de luz, utilizado para medir la cantidad de luz ambiental en su entorno. Este sensor es altamente preciso y está diseñado para proporcionar una salida digital basada en la cantidad de luz recibida, sin necesidad de componentes adicionales como un convertidor analógico-digital (ADC), lo que lo hace fácil de integrar en proyectos electrónicos.

El BH1750 emplea una interfaz I2C para la comunicación de datos, lo que permite la conexión sencilla con microcontroladores como Arduino, ESP32, Raspberry Pi y otros sistemas embebidos. El sensor se basa en un fotodiodo y utiliza un procesador interno para convertir la luz incidente en una señal digital que puede ser leída directamente por un microcontrolador.

Figura 3

Sensor de Intensidad de Luz BH1750



Nota. Sensor de Intensidad de Luz BH1750. Imagen extraída de ([Amazon, s.f.](#))

Tabla 4*Características principales del BH1750*

Características	Descripción
Rango de medición de luz	Capaz de medir niveles de luz desde 1 lux (mínimo detectable) hasta 65,535 lux (luz intensa).
Resolución	Ofrece una resolución de hasta 1 lux, permitiendo mediciones precisas de la luz ambiental.
Salida digital I2C	Utiliza comunicación I2C, lo que facilita la integración con microcontroladores mediante solo dos pines (SCL y SDA).
Alimentación	Funciona con un voltaje de 3V a 5V, permitiendo compatibilidad con diversas plataformas de desarrollo.
Bajo consumo energético	Su eficiencia energética lo hace ideal para proyectos alimentados por baterías.

Nota. Características del sensor de Intensidad de Luz BH1750. Datos extraídos de (Maetrónica, s.f.)

2.5 CALT YGC-F5-5V-V

El CALT YGC-F5-5V-V es un sensor de velocidad del viento diseñado para aplicaciones que requieren mediciones precisas y confiables.

Figura 4

Anemómetro YGC-F5-5V-V



Nota. Anemómetro YGC-F5-5V-V. Imagen extraída de ([Amazon, s.f.](#))

Tabla 5*Características principales del YGC-F5-5V-V*

Características	Descripción
Estructura y material	Diseñado con una estructura de copa de viento tradicional, fabricado en ABS de alta resistencia, lo que garantiza durabilidad y buen rendimiento en diversas condiciones climáticas.
Rango de medición	Capaz de medir velocidades de viento desde 0 hasta 45 m/s, adecuado para múltiples aplicaciones.
Precisión	± 0.3 m/s para velocidades inferiores a 5 m/s y $\pm 3\%$ para velocidades superiores a 5 m/s, asegurando mediciones confiables en distintos rangos de velocidad.
Salida de señal	Proporciona una salida de voltaje de 0 a 5V, facilitando la integración con sistemas de monitoreo y control que requieren señales analógicas.
Alimentación	Requiere una fuente de alimentación de 5V en corriente continua, permitiendo su uso en diversas configuraciones energéticas.

Nota. Tabla resumen de las Características del sensor de velocidad de viento YGC-F5-5V-V. Datos extraídos de ([Amazon, s.f.](#))

2.6 BATERÍAS RIXN 18650

La batería Rixn 18650, es una batería recargable de alta capacidad diseñada para ofrecer una gran cantidad de energía en aplicaciones de consumo bajo y medio.

Figura 5

Baterías Rixn 18650



Nota. Baterías Rixn 18650 utilizadas para la alimentación de la Estación Meteorológica.

Tabla 6*Características de las Baterías Rixn 18650*

Características	Descripción
Capacidad	8800 mAh, lo que permite almacenar una gran cantidad de energía y alimentar dispositivos durante períodos prolongados antes de requerir recarga.
Voltaje	Voltaje nominal de 4.2 V, característico de baterías recargables de iones de litio, adecuado para dispositivos de bajo y medio consumo.
Energía total	11.8 Wh, indicando la cantidad de energía que la batería puede suministrar a lo largo de su vida útil. A mayor Wh, mayor duración en condiciones de uso normales.
Tipo de celda	Utiliza celdas 18650, un formato cilíndrico de iones de litio común en laptops, linternas LED y vehículos eléctricos, ofreciendo una buena combinación de densidad energética y durabilidad.

Nota. Tabla Resumen de las características de las Baterías Rixn 18650. Datos extraídos de [\(Mercado Libre, s.f.\)](#)

2.7 PANEL SOLAR PS - 5V

El Panel Solar PS-5V es un dispositivo diseñado para convertir la energía solar en electricidad de 5 voltios, con 48 celdas solares, lo hace ideal para alimentar y recargar dispositivos electrónicos de bajo consumo.

Figura 6

Panel Solar PS-5V



Nota. Panel Solar PS-5V. Imagen extraída de ([Amazon, s.f.](#))

Tabla 7*Características del Panel Solar PS-5V*

Características	Descripción
Voltaje de salida	Proporciona una salida de 5V, adecuada para una amplia gama de dispositivos electrónicos.
Corriente de salida	Ofrece hasta 600 mA, permitiendo una carga eficiente de baterías y alimentación de dispositivos.
Potencia de salida	Genera 5W, suficiente para mantener dispositivos en funcionamiento.
Grado de Protección	Protección IP65, resistente al polvo y la lluvia, permitiendo su uso en exteriores

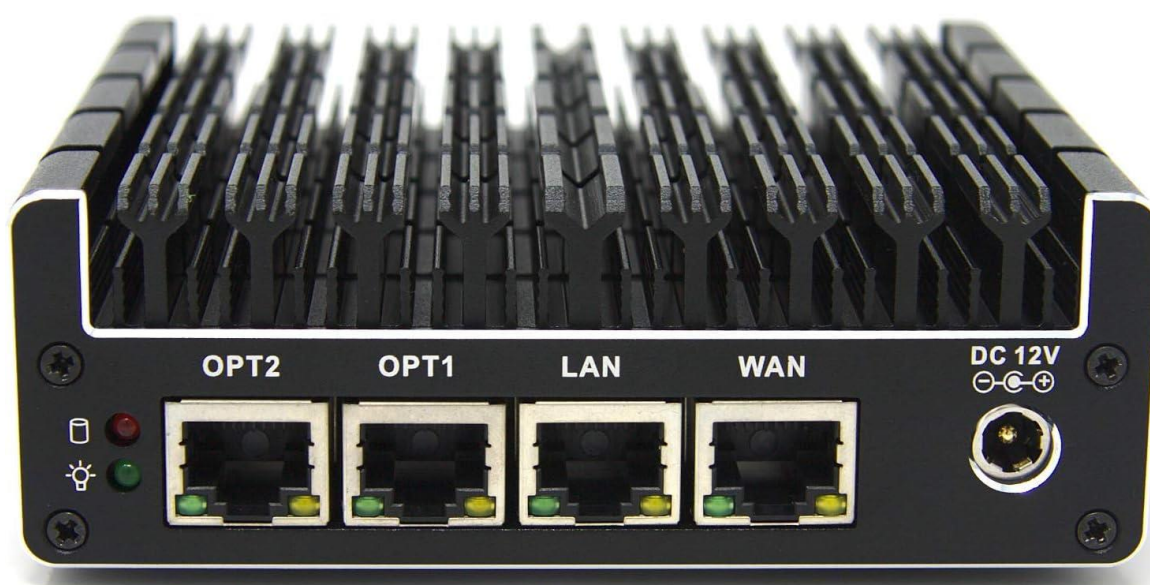
Nota. Tabla resumen de las características principales del Panel Solar PS-5V. Datos extraídos de ([Amazon, s.f.](#))

2.8 PFSENSE

PfSense es una distribución de software de código abierto basada en FreeBSD, diseñada para funcionar como un firewall y enrutador de alto rendimiento. Ofrece una amplia gama de funcionalidades avanzadas, incluyendo gestión unificada de amenazas, balanceo de carga, soporte para múltiples conexiones WAN y más.

Figura 7

Hardware PFSENSE



Nota. Hardware PFSENSE para el uso de la VPN y acceso a internet desde la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática. Imagen extraída de ([Amazon, s.f.](#))

Tabla 8*Características principales de Pfsense*

Características	Descripción
Firewall de alto rendimiento	Permite controlar el tráfico de red mediante reglas personalizables, garantizando una protección eficaz contra amenazas externas.
VPN	Soporta tecnologías VPN como OpenVPN e IPsec, facilitando conexiones seguras y privadas a la red.
Gestión de ancho de banda	Incluye herramientas avanzadas para la gestión del ancho de banda y el control de tráfico, permitiendo priorizar aplicaciones críticas y evitar congestión en la red.
IDS/IPS	Cuenta con un sistema de detección y prevención de intrusiones (IDS/IPS) que ayuda a identificar y mitigar posibles ataques antes de que causen daños.
Balanceo de carga	Soporta balanceo de carga para distribuir el tráfico de red entre múltiples conexiones a Internet, mejorando la disponibilidad y el rendimiento.

Nota. Tabla Resumen de las principales Características del Pfsense. Datos Extraídos de [\(Amazon, s.f.\)](#)

2.9 ROUTER D-LINK 825M

El D-Link DIR-825M es un router inalámbrico de alta velocidad diseñado para mejorar la conectividad en entornos domésticos y de pequeñas oficinas.

Figura 8

Router D-Link 825M



Nota. Router D-Link 825M para el envío de datos hacia ThingsBoard. Imagen extraída de [\(Kawaii Store, s.f.\)](#)

Tabla 9*Características del D-Link DIR-825M*

Características	Descripción
Velocidad y bandas	Ofrece velocidades de hasta 300 Mbps en 2.4 GHz y 867 Mbps en 5 GHz, alcanzando un total de 1200 Mbps.
Puertos Gigabit	Cuenta con 4 puertos LAN Gigabit 10/100/1000, proporcionando un rendimiento hasta 10 veces más rápido que el Ethernet tradicional, ideal para conexiones cableadas de alta velocidad.
Tecnología Dual-Band simultánea	Opera en dos bandas simultáneamente, reduciendo la congestión y mejorando la eficiencia al asignar dispositivos a la banda más adecuada.
MU-MIMO	La tecnología Multi-User MIMO permite que múltiples dispositivos reciban señales Wifi de alto ancho de banda simultáneamente, mejorando la eficiencia y la experiencia del usuario.
Seguridad avanzada	Soporta encriptación WPA3, proporcionando una mayor protección contra amenazas externas en la red inalámbrica.

Nota. Tabla Resumen de las Principales Características del D-Link DIR-825M. Datos extraídos de ([D-Link, s.f.](#))

2.10 CAJA DE REGISTRO LEGRAND

Son cajas diseñadas para intemperie con protección IP55 resistente al agua y al polvo, su certificación lo hacen el componente ideal para las conexiones electrónicas y el ESP32.

Figura 9

Caja de Registro LEGRAND



Nota. Caja de Registro LEGRAND. Imagen extraída de ([Legrand, s.f.](#))

Especificaciones:

- Resistente para impactos IK 09
- Protección contra rayos UV
- Dimensiones 310 x 240 x 124 mm

CAPITULO 3: METODOLOGIA DE DISEÑO

3.1 DEFINICIÓN DEL HARDWARE PRINCIPAL DEL SISTEMA

El ESP32 LoRa TTGO se eligió para implementar una estación meteorológica debido a su capacidad de comunicación de largo alcance mediante tecnología LoRa (Long Range), que permite transmitir datos a distancias considerablemente grandes, incluso en áreas remotas donde las redes tradicionales no están disponibles. Esta característica es esencial para estaciones meteorológicas ubicadas en lugares alejados o de difícil acceso, garantizando la transmisión eficiente de información sin depender de infraestructura costosa o limitada.

Además, el ESP32 es un microcontrolador potente con características como Wifi, Bluetooth y bajo consumo energético, lo que permite realizar tareas de procesamiento de datos en tiempo real y enviar información de manera eficiente. Su facilidad de programación a través de plataformas como Thonny y su compatibilidad con diversos sensores meteorológicos, como los de temperatura, humedad, velocidad del viento y lux, lo hacen una opción ideal para desarrollar una estación meteorológica confiable, flexible y económica.

3.2 ELECCIÓN DE SENSORES

Se han seleccionado los siguientes sensores para medir los parámetros propuestos, considerando su disponibilidad en distintos distribuidores, así como la existencia de librerías y/o drivers que faciliten su implementación. Estos sensores se referenciaron con sensores más sofisticados que se encontraban disponibles en la Escuela de Ingeniería Eléctrica para que sus lecturas sean lo más cercanas posibles a sensores de alto costo.

Los sensores elegidos son:

- DHT22: para medir humedad y temperatura,
- BH1705: para medir los luxes.
- YGC-F5-5V-V: para medir la velocidad del viento.

3.3 OTROS DISPOSITIVOS

El sistema cuenta con varios dispositivos adicionales para asegurar el cumplimiento de todas sus funcionalidades:

- Pfsense: Proporciona seguridad y administración de red, funcionando como un cortafuegos y enrutador para gestionar el tráfico de datos de forma eficiente.
- Router: Facilita la conexión a la red y la transmisión de datos entre los dispositivos del sistema.
- Panel Solar PS - 5V: Suministra energía de manera autónoma al sistema, permitiendo su funcionamiento independiente de la red eléctrica del lado de la estación meteorológica.

3.4 INTERFAZ DE DESARROLLO Y LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN

Micro Python se eligió para la estación meteorológica porque es ligero, eficiente y adecuado para microcontroladores como ESP8266 y ESP32 (Franco, 2018). Su sintaxis sencilla facilita la programación y depuración sin necesidad de compilación. Además, ofrece compatibilidad con sensores de temperatura, humedad y presión, así como soporte para Wifi y protocolos IoT como MQTT y HTTP, permitiendo la transmisión de datos en tiempo real (Gómez & Fernández, 2020). Su comunidad activa y amplia documentación hacen que el desarrollo sea más accesible y rápido en comparación con otros lenguajes como C++.

Thonny se utilizó como interfaz de programación porque es un entorno ligero y fácil de usar, ideal para principiantes y compatible con MicroPython. Su integración nativa con microcontroladores como ESP8266 y ESP32 permite cargar y ejecutar código fácilmente. Además, cuenta con herramientas de depuración visual, autocompletado y una interfaz sencilla que facilita el desarrollo y prueba de la estación meteorológica (Reinders, 2020). La versión a utilizar fue la 4.1.4

3.4 PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN

Los sensores que componen la estación meteorológica (DHT22, BH1750 y YGC-F5-5V-V) se comunican con el microcontrolador ESP32 LoRa TTGO utilizando diversos protocolos, estos adaptados a las características de cada sensor.

3.4.1 DHT22

El DHT22 utiliza un protocolo unidireccional de un solo hilo, lo que implica que el sensor transmite los datos de forma secuencial mediante un solo pin digital. Este sensor proporciona datos de temperatura y humedad con una frecuencia de lectura de aproximadamente 0.5 Hz (una vez cada 2 segundos) ([Adafruit, 2014](#)).

Las principales características de este protocolo son su unidireccionalidad, mediante un solo pin digital. Para la implementación de la gestión de la comunicación entre el sensor y el microcontrolador se utilizó la librería DHT en Micro Python ([MicroPython, 2023](#)).

Este protocolo de comunicación es un método de transmisión de datos en el que un solo conductor (hilo) transporta la información en una sola dirección, desde un emisor hacia un receptor, sin posibilidad de retroalimentación o confirmación de recepción. Este tipo de comunicación se usa comúnmente en sensores y dispositivos de bajo costo donde la simplicidad y el ahorro de pines son esenciales, razones por las que se ajusta a las necesidades de este proyecto ([Mazidi, Naimi & Naimi, 2016](#)).

Características:

- Uso de un solo hilo de datos: A diferencia de protocolos como I2C o SPI que requieren múltiples líneas, este protocolo se basa en un solo cable de comunicación (además de la alimentación y tierra si es necesario) ([Dogra, 2021](#)).
- Unidireccionalidad: Los datos solo fluyen en una dirección, lo que significa que el receptor no puede enviar información de vuelta al emisor.

- Eficiencia en hardware: Requiere pocos recursos electrónicos, lo que lo hace ideal para sensores de bajo consumo y sistemas embebidos simples.
- Sin necesidad de sincronización compleja: A menudo emplea un esquema de tiempo bien definido para la transmisión de datos, eliminando la necesidad de señales de reloj adicionales.
- Mayor inmunidad al ruido comparado con sistemas multihilo: Al reducir la cantidad de cables, hay menos posibilidad de interferencia electromagnética entre líneas de comunicación (Dogra, 2021).

Limitantes:

- Falta de retroalimentación: No permite que el receptor confirme la recepción de los datos ni que solicite retransmisiones en caso de error.
- Vulnerabilidad a interferencias: Aunque la simplicidad del cableado reduce interferencias entre hilos, sigue siendo susceptible a ruidos eléctricos externos que puedan alterar la señal.
- Menor velocidad de transmisión: En comparación con protocolos como SPI o I2C, la comunicación de un solo hilo suele ser más lenta (Mazidi et al., 2016).
- Dependencia de una estructura de tiempo precisa: La sincronización del emisor y receptor depende de una temporización precisa, lo que puede ser un desafío en sistemas con procesamiento variable o interrupciones frecuentes.
- No apto para transmisión de datos complejos: Debido a su simplicidad, este protocolo es más adecuado para datos simples como temperatura o humedad, y no para grandes volúmenes de información.

Esto es ideal para aplicaciones donde se requiere un diseño simple, de bajo costo y con mínima infraestructura, como el caso de la estación meteorológica implementada, que

considera un sistema IoT de recopilación de datos periódica y que no requiere una respuesta inmediata del receptor.

Figura 10

Segmento de Código para el DHT22

```
1 import dht
2 import machine
3 import time
4
5 sensor = dht.DHT22(machine.Pin(14)) # Pin GPIO 14
6
7 while True:
8     try:
9         sensor.measure() # Solicita medición al sensor
10        temperature = sensor.temperature() # Lee temperatura
11        humidity = sensor.humidity() # Lee humedad
12        print('Temp: {}°C Hum: {}'.format(temperature, humidity))
13    except OSError as e:
14        print('Failed to read sensor:', e)
15    time.sleep(2) # Espera 2 segundos antes de la siguiente medición
```

Nota. Fragmento de código en micro Python para configuración de comunicación de un sólo hilo entre sensor DHT22 y microcontrolador ESP32.

3.4.2 BH1750

El BH1750 comunica los datos de luz ambiente a través del protocolo I²C (Inter-Integrated Circuit), que utiliza dos líneas: una para los datos (SDA) y otra para el reloj (SCL). Para la gestión de la comunicación entre el ESP32 y el sensor de luz se utiliza la librería bh1750 en MicroPython, la cual permite obtener los datos de luminosidad captados ([MicroPython, 2023](#)). El sensor está configurado en un modo de baja resolución para reducir el consumo energético innecesario ([Rohm Semiconductor, 2013](#)).

I²C (Inter-Integrated Circuit) es un protocolo de comunicación en serie desarrollado por Philips Semiconductor (ahora NXP Semiconductors) para la comunicación entre dispositivos electrónicos en una misma tarjeta o sistema. Es un protocolo síncrono, basado en un bus bidireccional, que permite conectar múltiples dispositivos con solo dos líneas de comunicación ([NXP Semiconductors, 2021](#)).

- SDA (Serial Data Line): Transporta los datos.
- SCL (Serial Clock Line): Transporta la señal de reloj generada por el maestro.

I²C es ampliamente utilizado en sensores, memorias EEPROM, pantallas LCD, microcontroladores y otros dispositivos embebidos debido a su simplicidad y eficiencia en la transmisión de datos de corta distancia ([Dogra, 2021](#); [Mazidi et al., 2016](#)).

Características Principales del Protocolo I²C

- Arquitectura Maestro-Eslavo: Consiste en que un dispositivo maestro inicia la comunicación y controla la velocidad de recepción en el bus de datos. Esto permite que existan múltiples esclavos conectados al mismo bus.
- Solo Dos Líneas de Comunicación: Reduce el número de pines necesarios en el dispositivo y con esto facilita la conexión de múltiples dispositivos al maestro, en este caso el ESP32 ([NXP Semiconductors, 2021](#)).

- **Direcciones Únicas por Dispositivo:** Cada esclavo tiene una dirección única de 7 o 10 bits asignada, permitiendo que el maestro identifique de qué dispositivo está recibiendo datos o a qué dispositivo está enviando datos.
- **Velocidades de Transmisión Variables:** Tiene velocidades de transmisión variables que van desde 100 kHz (estándar) hasta 5 MHz (ultra rápida).
- **Protocolo Síncrono:** La señal de reloj es generada por el maestro, sincronizando la comunicación entre los dispositivos conectados ([Mazidi et al., 2016](#)).
- **Soporte para Comunicación Multimaestro:** Se pueden conectar varios maestros en el mismo bus, con mecanismos de arbitraje para evitar colisiones.
- **Confirmación de Recepción (ACK/NACK):** Cada byte enviado debe ser reconocido por el receptor mediante una señal de ACK (Acknowledge) o NACK (Not Acknowledge) ([Dogra, 2021](#)).

Limitantes del Protocolo I²C

- **Distancia de Transmisión Limitada:** I²C está diseñado para comunicación de corta distancia (dentro de un mismo circuito o dispositivo). Las señales pueden degradarse a distancias mayores de 1 metro, dependiendo de la velocidad y la capacitancia de las líneas.
- **Velocidad Relativamente Baja en Comparación con Otros Protocolos:** Aunque puede alcanzar hasta 5 MHz en modo ultra rápido, sigue siendo más lento que SPI o UART para ciertas aplicaciones de alto rendimiento ([NXP Semiconductors, 2021](#)).
- **Riesgo de Bloqueo del Bus:** Si un esclavo no libera la línea SDA debido a un error en la transmisión, puede bloquear el bus y requerir un reinicio del sistema.

- **Carga Capacitiva del Bus:** La capacidad máxima del bus es de 400 pF, lo que limita la cantidad de dispositivos que pueden conectarse y la longitud de las trazas en la PCB.
- **Complejidad en la Implementación Multimaestro:** Aunque soporta múltiples maestros, la implementación de mecanismos de arbitraje puede ser compleja y requiere manejo adecuado para evitar conflictos.
- **No Adecuado para Transmisión de Datos en Tiempo Real:** Debido a su velocidad y al protocolo de reconocimiento de datos, no es ideal para aplicaciones donde se requiera transmisión continua y de alta velocidad, como en streaming de video o audio en tiempo real ([Mazidi et al., 2016](#)).

Todo lo anterior hace del protocolo I²C una opción eficiente y flexible para la comunicación entre dispositivos electrónicos en sistemas embebidos, especialmente cuando se requiere bajo consumo de pines y fácil integración.

Figura 11

Segmento de Código para BH1750

```
1 from BH1750 import BH1750
2 from machine import I2C, Pin
3 import time
4
5 i2c = I2C(scl=Pin(22), sda=Pin(21)) # Inicializa I2C (SCL en GPIO22, SDA en GPIO21)
6 sensor = BH1750(i2c)             # Crea el objeto sensor
7
8 while True:
9     lux = (sensor.luminance(BH1750.CONT_LOWRES)) * 2.4216
10    print("Luz (Lux):", lux)
11    time.sleep(2) # Espera 2 segundos antes de la siguiente medición
```

Nota. Fragmento de código en Micro Python para configuración de comunicación I²C entre sensor BH1750 y microcontrolador ESP32.

3.4.3 YGC-F5-5V-V

El YGC-F5-5V-V es un sensor de velocidad del viento que utiliza una salida analógica. La señal analógica de hasta 5V se reduce a 2.273V mediante un divisor de tensión antes de ser conectada a los pines GPIO 34 y 35 del ESP32, debido a que el microcontrolador está diseñado para censar hasta 3.3V en sus entradas analógicas ([Espressif Systems, 2023](#)).

El valor analógico se convierte en una lectura digital a través de un ADC (convertidor analógico a digital) de 12 bits con atenuación de 0 dB para la medición analógica. El pin 34 del ESP32 se utiliza para captar el valor de voltaje positivo en la salida Vcc+ del sensor de velocidad ([Dogra, 2021](#)).

El ADC, al estar configurado con una atenuación de 0 dB, permite que la escala de voltaje que el pin 34 puede captar sea de 0 a 1.2V. Esto significa que el valor máximo de velocidad del viento que el microcontrolador podrá procesar a este nivel de atenuación es de aproximadamente 23 m/s. Para los usos específicos de los datos tomados, tener como rango superior de velocidad medida un valor de 82 km/h es completamente adecuado, ya que permite censar velocidades superiores a las consideradas como vientos fuertes (más de 30 km/h), los cuales pueden causar estratificación en los estanques ([Gutiérrez et al., 2017](#)).

El fabricante sugiere la siguiente fórmula para el cálculo de la velocidad del viento en m/s a través de los niveles de tensión censados:

$$\text{Velocidad del viento} = \left(\frac{\text{valor medido en voltios}}{2.29 \text{ V}} \right) * 45 \text{ m/s} \quad (1)$$

Donde el valor de 2.29V corresponde al máximo medido a la salida del divisor de tensión cuando se inyectan 5V puros en el arreglo de resistencias, y el valor de 45 m/s representa el máximo rango de velocidad que puede censar el anemómetro YGC-F5-5V-V (YGC Instruments, 2020).

Figura 12

Segmento de Código para el YGC-F5-5V-V

```
1 from machine import ADC, Pin
2 import time
3
4 adc = ADC(Pin(34))           # Conectar sensor a GPIO 34
5 adc atten(ADC.ATTN_0DB)    # Atenuación 0 dB (rango 0V a 1V)
6
7 while True:
8     voltage_value = adc.read_uv() / 1e6 # Lee valor ADC en microvoltios y convierte a voltios
9     wind_speed = (voltage_value / 2.29) * 45 # Fórmula para convertir voltaje a velocidad (en m/s)
10    print('Velocidad del viento (ADC):', wind_speed)
11    time.sleep(2)           # Espera 2 segundos
12
```

Nota. Fragmento de código en micro Python para configuración de lectura y conversión de datos entre anemómetro y microcontrolador ESP32.

3.4.4 Comunicación entre Microcontroladores (LoRa)

El microcontrolador ESP32 se comunica con el periférico integrado radio LoRa mediante el protocolo SPI (Serial Peripheral Interface). Este protocolo es una interfaz de comunicación sincrónica, de alta velocidad, que permite una conexión eficiente entre un maestro (en este caso, el ESP32) y un esclavo (el chip LoRa SX127x).

La configuración específica del bus SPI utilizada en el proyecto es la siguiente:

- baudrate: 10,000,000 (10 Mbps)
- polarity: 0
- phase: 0
- sck: Pin(5)
- mosi: Pin(27)
- miso: Pin(19)

Este tipo de configuración asegura una transmisión de datos rápida y confiable entre el microcontrolador y el módulo LoRa, lo cual es esencial para aplicaciones en tiempo casi real como la transmisión de datos meteorológicos ([Upton & Halfacree, 2021](#); [Dogra, 2021](#)).

SPI es un protocolo full-dúplex que requiere al menos cuatro líneas de comunicación: SCK (reloj), MOSI (datos del maestro al esclavo), MISO (datos del esclavo al maestro) y CS (chip select), lo que lo hace especialmente adecuado para conexiones rápidas y estables en sistemas embebidos como este ([NXP Semiconductors, 2020](#)).

La comunicación LoRa se configura en un esquema punto a punto entre dos microcontroladores ESP32 LoRa TTGO. Un microcontrolador recoge los datos de los sensores y los transmite por radio a otro microcontrolador, que funciona como Gateway para subir los datos a la plataforma ThingsBoard.

Especificaciones de la Comunicación LoRa:

- Frecuencia de operación: 915 MHz
- Potencia de transmisión: 20 dBm
- Factor de propagación (Spreading Factor): 7
- Ancho de banda: 125 kHz
- Tasa de codificación (Coding Rate): 5

Este tipo de comunicación es ideal para entornos rurales o zonas remotas, como los sistemas de piscicultura, debido a su capacidad de transmitir datos a largas distancias con bajo consumo de energía, una característica fundamental para sistemas IoT que requieren autonomía prolongada y confiabilidad en la recolección de datos (Augustin et al., 2016).

Para la gestión de comunicación radial entre ambos microcontroladores se utilizó la librería sx127x, con la cual se configuraron los parámetros del espectro de los radios LoRa.

Figura 13

Analizador de espectro RSA306B



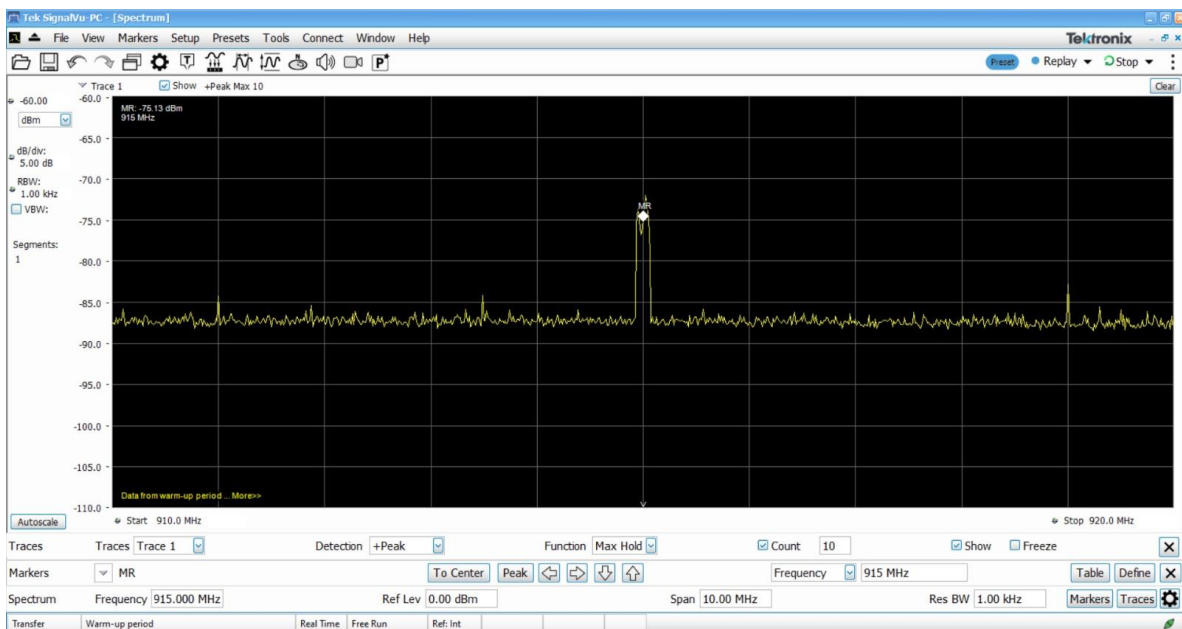
Nota. Este dispositivo es un analizador de espectro. Destaca por su portabilidad y por su compatibilidad con dispositivos portátiles para la visualización de resultados a través del software Signal VU-PC.

Se hizo uso del analizador de espectro para verificar la intensidad de la señal entre la estación meteorológica y el Gateway y así poder escoger el mejor canal de frecuencia y que las pérdidas de datos por vegetación no afecte en funcionamiento del diseño.

Selección del Rango de frecuencias

Figura 14

Espectro de los microcontroladores



Nota. Imagen del software Signal VU-PC donde se muestra la intensidad de la señal entre las antenas de los microcontroladores.

Se utiliza para la medición la frecuencia de 915 MHz, lo cual permite ver de mejor manera el comportamiento de la señal emitida por el dispositivo transmisor. La elección se sustenta conforme a la resolución clasificada con el número No. T-446-2002.

La frecuencia seleccionada es parte del espectro asignado para comunicaciones LoRa en la región y cumple con los estándares regulatorios necesarios para implementaciones en campo.

Figura 15

Segmento de código de la Comunicación LoRa

```
1 from machine import SPI, Pin, WDT, ADC
2 from sx127x import SX127X
3 import time
4 import machine
5 import logging
6
7 # ✨ Configuración de la interfaz SPI y los pines para el módulo LoRa SX127x
8 spi = SPI(baudrate=1000000, polarity=0, phase=0, sck=Pin(5), mosi=Pin(27), miso=Pin(19))
9 lora_pins = {'dio_0': 26, 'ss': 18, 'reset': 14}
10 lora = SX127x(spi, pins=lora_pins)
11
12 # ✨ Configuración de los parámetros de LoRa
13 lora.setFrequency(915e6) # Frecuencia en MHz
14 lora.setTxPower(20) # Potencia de transmisión en dBm
15 lora.setSpreadingFactor(7) # Factor de propagación
16 lora.setSignalBandwidth(125e3) # Ancho de banda en Hz
17 lora.setCodingRate(5) # Tasa de codificación
```

Nota. Fragmento de código en micro Python para configuración de comunicación SPI entre el radio LoRa integrado y microcontrolador ESP32, y configuración de parámetros de espectro del radio LoRa.

3.4.5 Comunicación entre el Gateway y ThingsBoard (HTTPS)

Una vez que el Gateway recibe los datos del microcontrolador principal a través del enlace LoRa, se encarga de subirlos a la plataforma ThingsBoard utilizando el protocolo HTTPS. Este protocolo se utiliza para establecer una conexión segura mediante cifrado TLS (Transport Layer Security), lo que garantiza la integridad y confidencialidad de los datos enviados por internet ([Rescorla, 2018](#)).

El Gateway realiza el envío de los datos utilizando una petición HTTP segura, incluyendo en la cabecera un token de autenticación proporcionado por ThingsBoard. Este token actúa como identificador de dispositivo y permite que el servidor verifique que los datos provienen de una fuente autorizada ([ThingsBoard, 2023](#)).

Especificaciones de Comunicación HTTPS:

Protocolo: HTTPS, sin uso de broker MQTT.

Frecuencia de Envío: Los datos se transmiten a intervalos de 5 minutos de forma periódica.

Cada ciclo incluye:

- Lectura de sensores
- Confirmación de lectura
- Envío de datos
- Confirmación de recepción

Si no se recibe confirmación del servidor, el sistema reintentará automáticamente hasta 5 veces antes de reiniciar el microcontrolador como mecanismo de recuperación ([Niemeyer & Knodel, 2020](#)).

- Formato de los Datos: JSON (JavaScript Object Notation), un estándar ligero y ampliamente usado en la transmisión de datos estructurados entre sistemas cliente-servidor ([Bray, 2017](#)).
- Confirmación de Envío: El sistema implementa una verificación del estado de entrega. En caso de fallo, realiza reintentos automáticos hasta 5 veces. Si el envío falla en todos los intentos, el microcontrolador se reinicia como medida de tolerancia a fallos.
- Este tipo de arquitectura proporciona una solución robusta para el monitoreo remoto de variables ambientales, garantizando tanto la seguridad de los datos como la fiabilidad del sistema de transmisión, aspectos fundamentales en sistemas IoT críticos como los de control ambiental en piscicultura ([Sethi et al., 2020](#)).

Figura 16

Segmento de Código para la comunicación HTTPS

```
1
2 import urequest
3 import machine
4 import logging
5
6 async def send_data(datos):
7     """Envía los datos a ThingsBoard."""
8     url = f'https://195.179.231.58:8080/api/v1/{dev_token}/telemetry'
9     try:
10        resp = requests.post(url, data=json.dumps(datos), headers={"Content-Type": "application/json"})
11        logging.debug(resp.status_code)
12        if resp.status_code != 200:
13            logging.error("Error en la respuesta de ThingsBoard: {}".format(resp.text))
14    except Exception as e:
15        logging.error("Error al subir datos a ThingsBoard: {}".format(e))
```

Nota. Fragmento de código en micro Python para configuración de comunicación HTTPS entre la plataforma IoT ThingsBoard y microcontrolador ESP32.

Se configuró el módulo de Wifi del microcontrolador con las credenciales de una red local para poder acceder a internet.

Figura 17

Segmento de Código para el Módulo Wifi

```
1 def connect_to_wifi(ssid, key):
2     """Intenta conectar a WiFi con hasta 5 intentos, reinicia si falla."""
3     sta_if = network.WLAN(network.STA_IF)
4     sta_if.active(True)
5     for attempt in range(5):
6         if sta_if.isconnected():
7             logging.info('Conectado: {}'.format(sta_if.ifconfig()))
8             return
9         logging.info(f'Intento {attempt + 1}/5 para conectar a WiFi...')
10        sta_if.connect(ssid, key)
11        time.sleep(5)
12    logging.error("No se pudo conectar a WiFi, reiniciando...")
13    machine.reset()
```

Nota. Fragmento de código en micro Python para configuración de módulo Wifi de microcontrolador ESP32.

La rutina de conexión a internet realiza hasta 5 intentos de conexión con la red configurada, de no cumplirse esos intentos el microcontrolador se reinicia.

3.5 FORMATO DE LOS DATOS Y ALMACENAMIENTO

3.5.1 Formato de los Datos

Los datos que se envían desde la estación meteorológica a través de LoRa están estructurados en formato JSON (JavaScript Object Notation). Este formato es ampliamente utilizado en entornos de IoT debido a su ligereza, simplicidad de análisis y compatibilidad con múltiples lenguajes de programación y plataformas ([Bray, 2017](#)).

Cada mensaje JSON generado incluye los siguientes datos recolectados por los sensores:

- Porcentaje de humedad relativa (de 0% a 100%)
- Temperatura ambiente (en grados Celsius)
- Velocidad del viento (en metros por segundo)
- Luz ambiental (en lux)

Además, se incorpora una marca de tiempo (timestamp), que permite asociar cada lectura con una ubicación temporal precisa, lo cual es esencial para el análisis cronológico y la trazabilidad de eventos ambientales ([Sethi et al., 2020](#)).

3.5.2 Monitoreo y Almacenamiento en ThingsBoard

Los datos enviados al Gateway mediante LoRa se almacenan como series temporales en la base de datos del servidor ThingsBoard. Esta plataforma IoT ofrece herramientas de visualización en tiempo real y almacenamiento histórico que son claves para la supervisión remota y la toma de decisiones ([ThingsBoard, 2023](#)).

Monitoreo en Tiempo Real:

- Se utilizan dashboards personalizados para mostrar los datos de los sensores de forma gráfica y en tiempo real.

- Se visualizan variables como humedad, temperatura, velocidad del viento y luz, todas actualizadas en intervalos regulares de muestreo.

Análisis Histórico:

Los datos son archivados junto con sus respectivas marcas de tiempo en registros históricos. Esto permite realizar análisis de comportamiento y tendencias a largo plazo, fundamentales para la optimización del cultivo de peces en sistemas de piscicultura tecnificada (Borgia, 2014).

Gestión de los Datos:

ThingsBoard utiliza TimescaleDB, una extensión de PostgreSQL optimizada para datos temporales, que facilita la consulta eficiente de series de tiempo y la escalabilidad del sistema (Freedman et al., 2020).

3.5.3 Algoritmo de Comunicación Completo

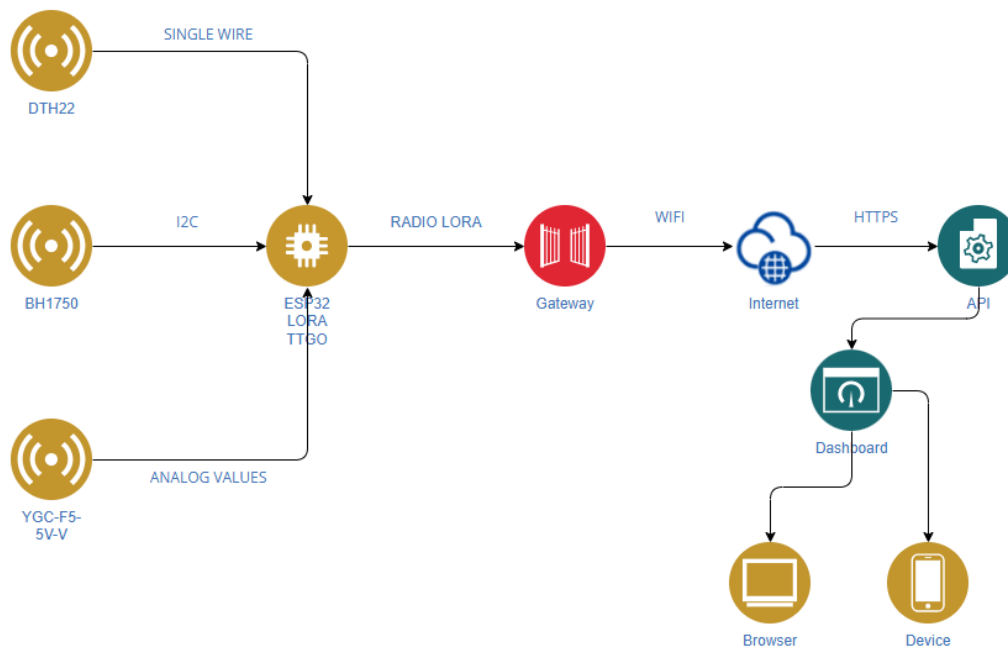
El algoritmo que estructura el flujo de datos en el sistema IoT para la estación meteorológica es el siguiente:

1. Lectura de Sensores: El microcontrolador ESP32 obtiene datos desde los sensores DHT22 (temperatura y humedad), BH1750 (luz), y YGC-F5-5V-V (viento), usando sus respectivos protocolos (I2C y analógico).
2. Confirmación de Lectura: Se verifica que las lecturas sean válidas y estén dentro del rango esperado antes de continuar.
3. Preparación del Mensaje: Los datos son empaquetados en formato JSON, junto con una marca de tiempo.
4. Transmisión de Datos (LoRa): Los datos se envían vía radio LoRa al Gateway utilizando una conexión punto a punto configurada con librerías especializadas como sx127x (Sammour et al., 2022).

5. Reintentos Automáticos: Si el Gateway no recibe los datos, el microcontrolador realiza hasta cinco reintentos automáticos para asegurar la entrega.
6. Confirmación de Envío: El Gateway valida que los datos hayan llegado correctamente antes de iniciar el proceso de publicación en la nube.
7. Publicación en ThingsBoard (HTTPS): Finalmente, el Gateway sube los datos a la plataforma ThingsBoard mediante una conexión segura HTTPS, usando un token de autenticación único asignado al dispositivo.

Figura 18

Diagrama de comunicación completo



Nota. Diagrama de Comunicación Completo elaborado en *(Visual Paradigm, s.f.)*

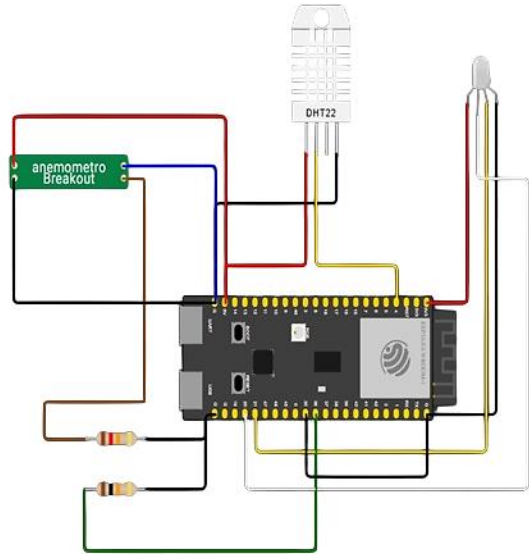
3.6 DESARROLLO DE LA ESTACIÓN

Figura 19

Implementación de la Estación Meteorológica



a)



b)



c)



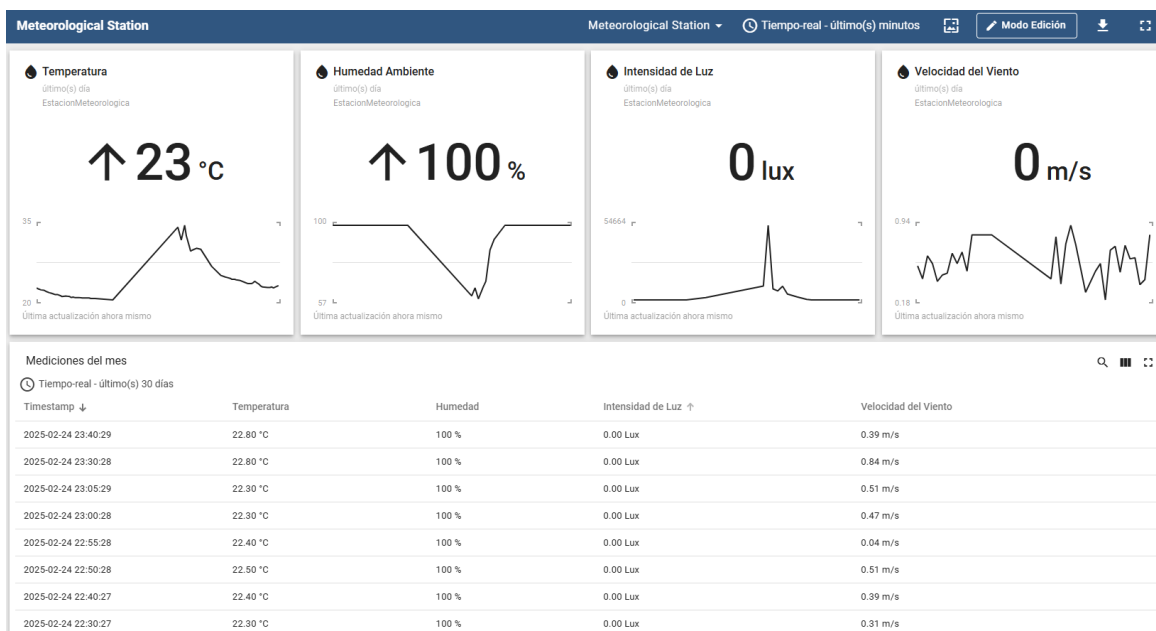
d)

CAPITULO 4: RESULTADOS DEL PROYECTO

4.1 VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS EN THINGSBOARD

Figura 21

Dashboard de Estación Meteorológica en ThingsBoard



Nota. Dashboard en ThingsBoard con la recopilación de datos en campo de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática.

Los datos recibidos de la estación meteorológica se visualizan en el Dashboard personalizado que muestra las lecturas en tiempo real de humedad, temperatura, viento y luz. Además, se mantiene un historial completo para realizar análisis a largo plazo.

Esta visualización y almacenamiento de datos permite estudiar el comportamiento de las variables censadas con el objetivo de optimizar el cultivo de peces, identificando patrones y condiciones óptimas para la piscicultura.

El usuario puede definir si los datos que quiere analizar son las últimas horas, últimos días o personalizar el rango si desea verlo de manera histórica.

4.2 COMPARATIVA CON LAS BASES DE DATOS DE ACCESO LIBRE

Tabla 10

Bases de Datos de Acceso Libre

Base de Datos	Ventajas	Desventajas	Fuente
WeatherAPI	Plan gratuito, fácil de usar, datos históricos, cobertura global	1,000 peticiones mensuales limitadas, precisión limitada	WeatherAPI (s.f.)
NASA POWER	Acceso gratuito, cobertura global, múltiples variables disponibles	Resolución temporal diaria, conversión necesaria para radiación solar	NASA (2022)
Meteoblue	Modelos de alta resolución, interfaz amigable, cobertura global	Acceso limitado a datos históricos sin suscripción, conversión de radiación solar necesaria	Meteoblue (s.f.)
Copernicus	Datos de alta calidad, cobertura global, acceso gratuito	Formatos complejos (NetCDF, GRIB), requiere registro, puede ser difícil para nuevos usuarios	Copernicus (s.f.)
Meteostat	Fácil acceso, formatos múltiples, cobertura global	Conversión de radiación solar necesaria, dependiente de la API y limitaciones del plan gratuito	Meteostat (s.f.)

Nota. Tabla Resumen de diferentes Bases de Datos de Acceso Libre.

Para el desarrollo de esta comparativa se utilizaron los valores censados del 6 de febrero de 2025 hasta el 16 de febrero de 2025, en las coordenadas de instalación de la estación meteorológica (lat, lon = 13.720334985666018, -89.20399026276328). Ese mismo lapso y ubicación fueron usados para la descarga de los datos meteorológicos de NASA POWER y WeatherAPI.

4.2.1 Desviación Estándar

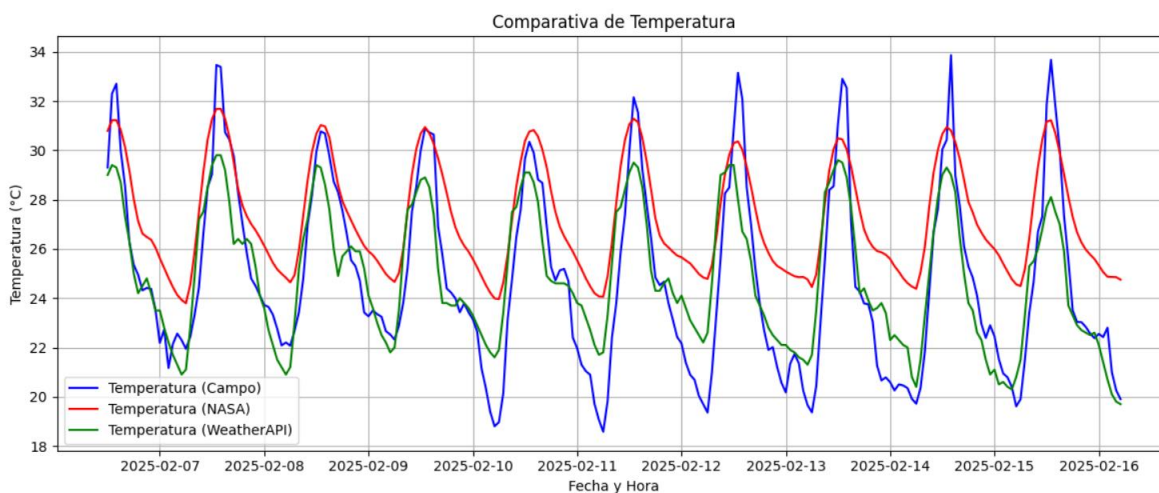
El objetivo de esta comparación fue evaluar la correspondencia entre los datos obtenidos directamente en campo y los provistos por estas plataformas digitales. Para ello, se empleó como medida estadística principal la desviación estándar, la cual permite cuantificar la variabilidad de los valores censados respecto a los promedios obtenidos en cada fuente.

La desviación estándar es una medida que expresa cuánto se alejan los datos individuales de su media. En el contexto de este análisis, esta medida estadística fue utilizada para determinar qué tan dispersos están los datos recolectados por la estación meteorológica respecto a los datos de referencia (NASA POWER y WeatherAPI) durante el período analizado.

Una desviación estándar baja entre los datos censados y los obtenidos de las plataformas indicaría una alta concordancia entre ambos conjuntos de datos, lo que valida la precisión de los sensores empleados. Por el contrario, una desviación alta podría sugerir discrepancias importantes, lo que justificaría una revisión de los factores locales (como microclimas, exposición directa al sol o ubicación de los sensores), o de la resolución y método de generación de los datos provistos por las plataformas externas ([Chatterjee & Hadi, 2015](#)).

Figura 22

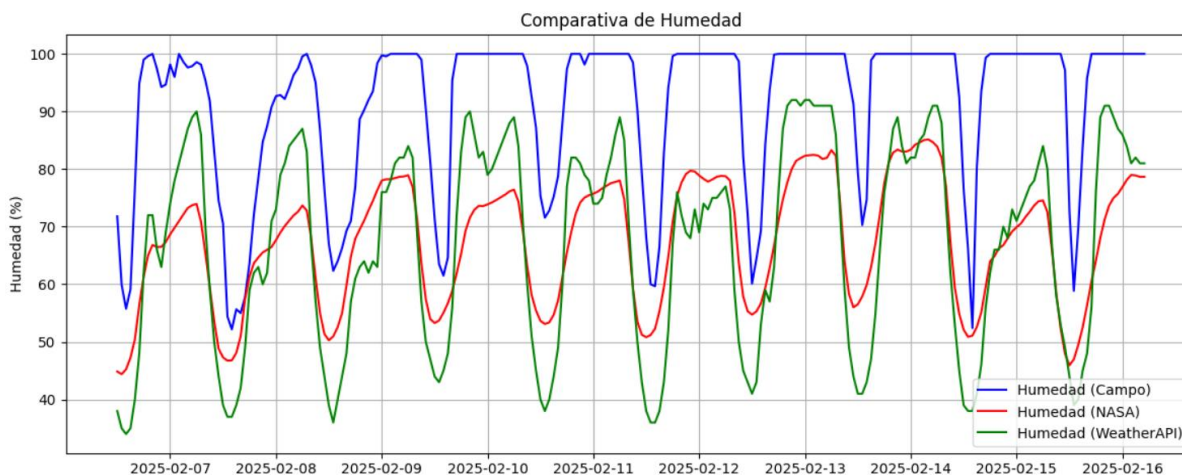
Desviación estándar de los valores de temperatura para el lapso seleccionado



Nota. Comparacion para la Temperatura entre datos de la NASA, WeatherAPI y captura en campo.

Figura 23

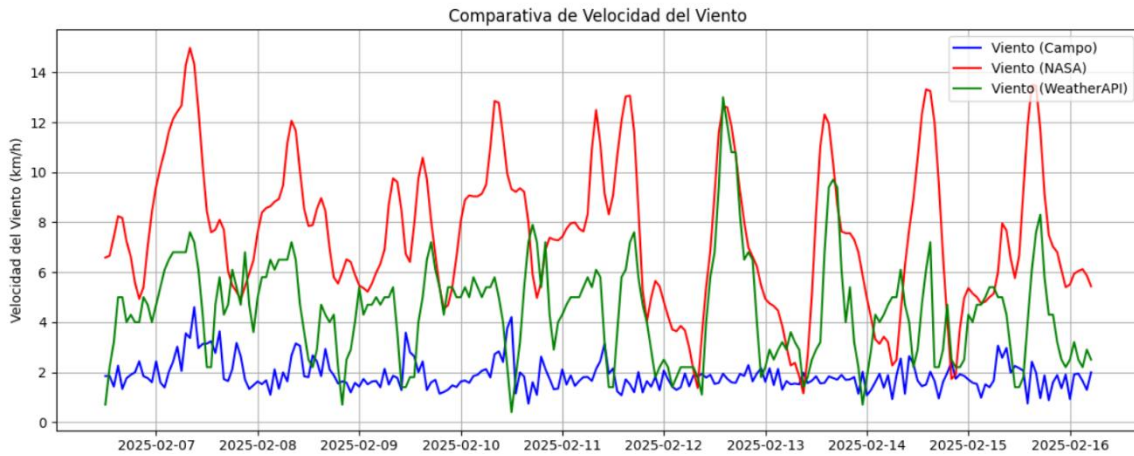
Desviación estándar de los valores de humedad para el lapso seleccionado



Nota. Comparacion para la Humedad entre datos de la NASA, WeatherAPI y captura en campo.

Figura 24

Desviación estándar de los valores de velocidad de viento para el lapso seleccionado



Nota. Comparacion para la Velocidad del Viento entre datos de la NASA, WeatherAPI y captura en campo.

4.2.2 Error Absoluto entre los valores de Nasa Power y WeatherAPI

El Error absoluto entre dos valores se calcula como la diferencia en valor absoluto entre una medición estimada (predicha) y la medición real (observada). (Fiscalab, s.f.) La fórmula general para calcular el error absoluto es:

$$Error_{Absoluto} = |Valor_{Real} - Valor_{Predicho}| \quad (2)$$

La fórmula aplicada para cada una de las fuentes públicas de datos es:

1. Error Absoluto para la Temperatura usando los datos de NASA:

$$Error_{Temperatura_{NASA}} = |Temperatura_{campo} - Temperatura_{NASA}| \quad (3)$$

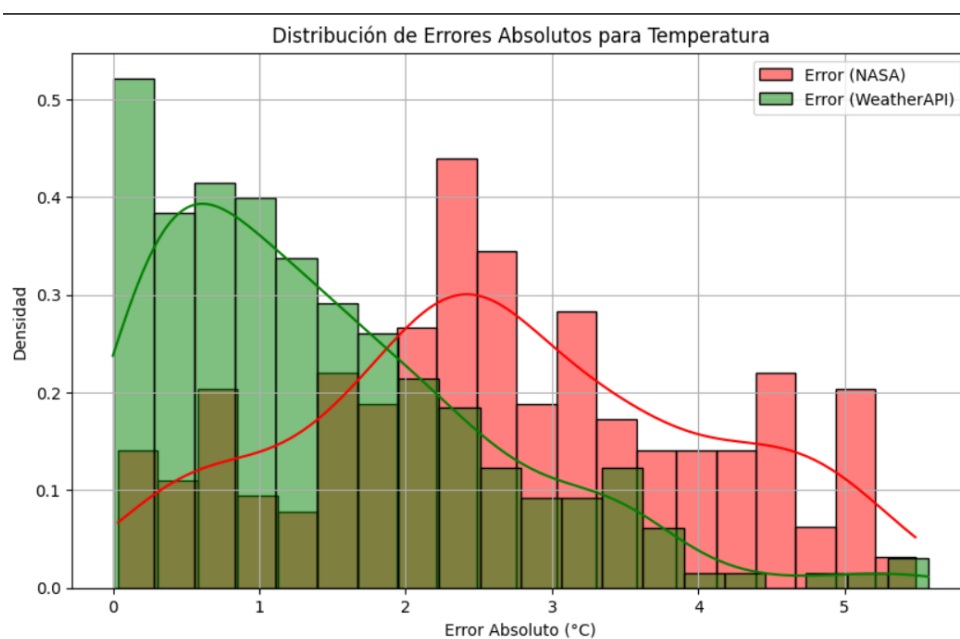
2. Error Absoluto para la Temperatura usando los datos de WeatherAPI:

$$Error_{Temperatura_{WAPI}} = |Temperatura_{campo} - Temperatura_{WAPI}| \quad (4)$$

Este enfoque se utilizó también para otras variables como la humedad relativa y la velocidad del viento. Comparar el error absoluto permite observar qué tan alejados están los datos provistos por las plataformas públicas respecto a los capturados por la estación meteorológica local.

Figura 25

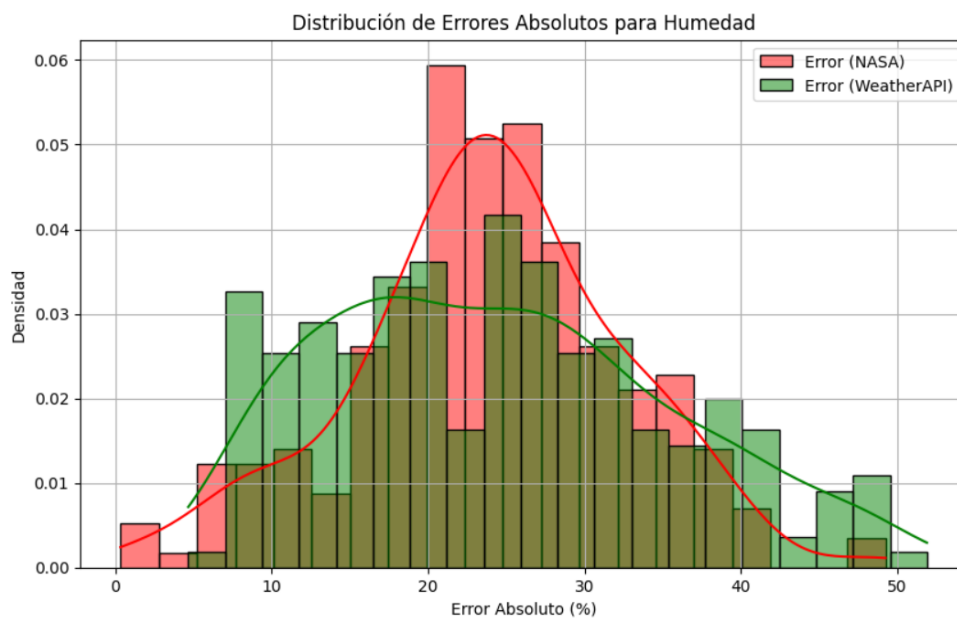
Distribución de Errores Absolutos para la temperatura



Nota. Distribucion de errores absolutos para la temperatura entre datos de la NASA, WeatherAPI y captura en campo.

Figura 26

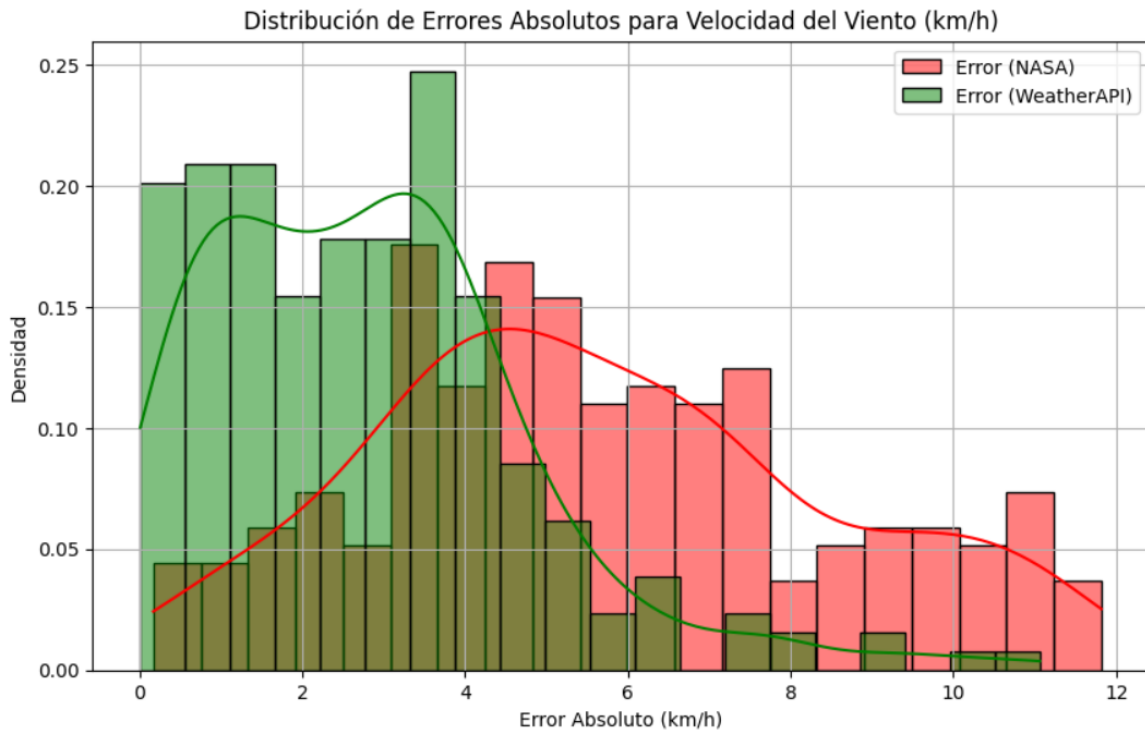
Distribución de Errores Absolutos para la Humedad



Nota. Distribucion de errores absolutos para la Humedad entre datos de la NASA, WeatherAPI y captura en campo.

Figura 27

Distribución de Errores Absolutos para la Velocidad del Viento



Nota. Distribucion de errores absolutos para la Velocidad del Viento entre datos de la NASA, WeatherAPI y captura en campo.

4.2.3 RMSE (Error Cuadrático Medio)

Evalúa la magnitud promedio del error, pero penaliza más los errores grandes porque eleva al cuadrado las diferencias antes de calcular la media. (C3.ai., s.f.)

Si hay valores atípicos, el RMSE se verá más afectado.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(valor_{campo} - valor_{basedatos})^2}{n}} \quad (5)$$

4.2.4 MAE (Error Absoluto Medio)

Representa el error absoluto promedio entre las predicciones y los valores reales. (Byju's., s.f.)

No eleva al cuadrado las diferencias, por lo que no penaliza tanto los errores grandes.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |valor_{campo} - valor_{basedatos}| \quad (6)$$

4.2.5 Comparación de RMSE y MAE

Tabla 11

Comparativa entre RMSE y MAE

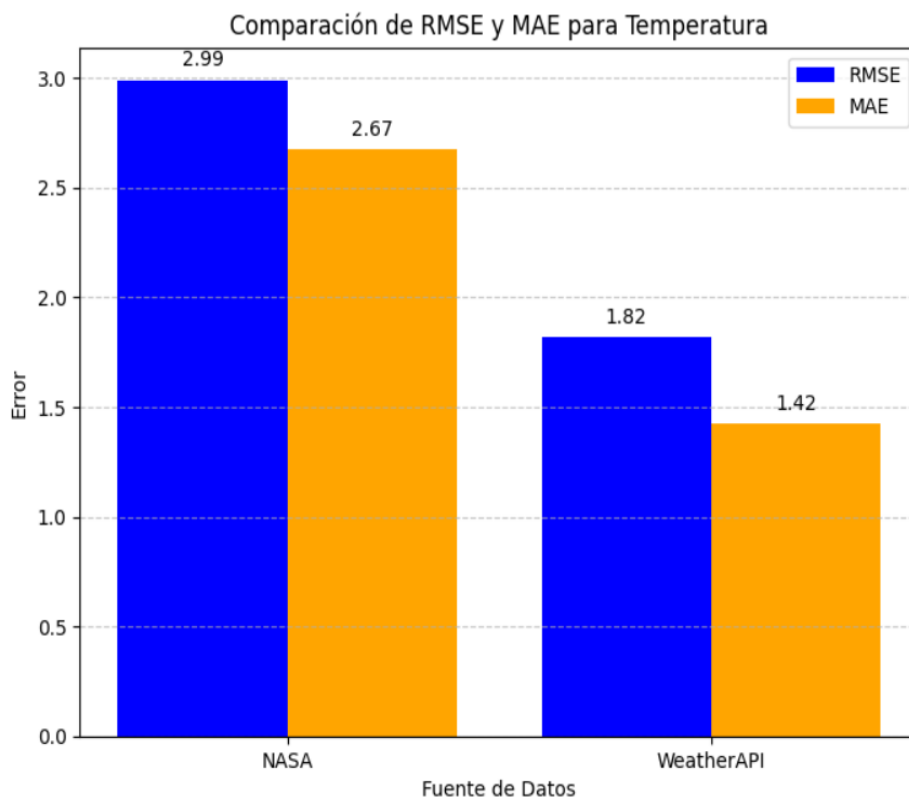
Métrica	Cálculo del error	Sensibilidad a valores atípicos	Facilidad de interpretación
RMSE	Eleva al cuadrado los errores y luego calcula la raíz	Sí, penaliza más los errores grandes	Menor, debido al uso del cuadrado
MAE	Calcula el promedio de los errores absolutos	No, trata todos los errores por igual	Alta, representa desviación promedio

Nota. Tabla Resumen de los errores RMSE y MAE para su interpretación.

Estas métricas fueron aplicadas al comparar los datos obtenidos por la estación meteorológica en campo entre el 6 y 16 de febrero de 2025 con los datos descargados de las plataformas NASA POWER (NASA POWER, s.f.) y WeatherAPI (WeatherAPI, s.f.). De esta manera, se puede obtener una visión más completa y cuantitativa sobre el grado de concordancia entre los valores reportados por las plataformas remotas y los valores registrados localmente.

Figura 28

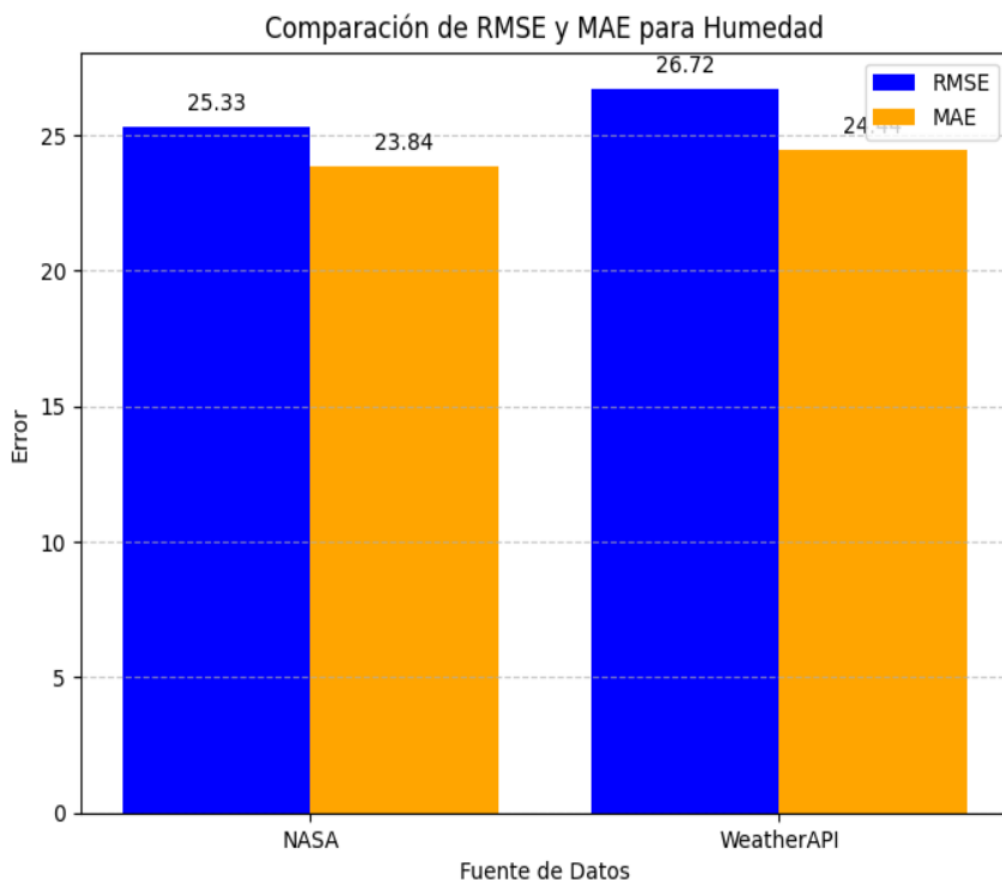
Comparación de RMSE y MAE para la Temperatura



Nota. Comparacion de RMSE y MAE para la Temperatura entre datos de la NASA y WeatherAPI y captura en campo.

Figura 29

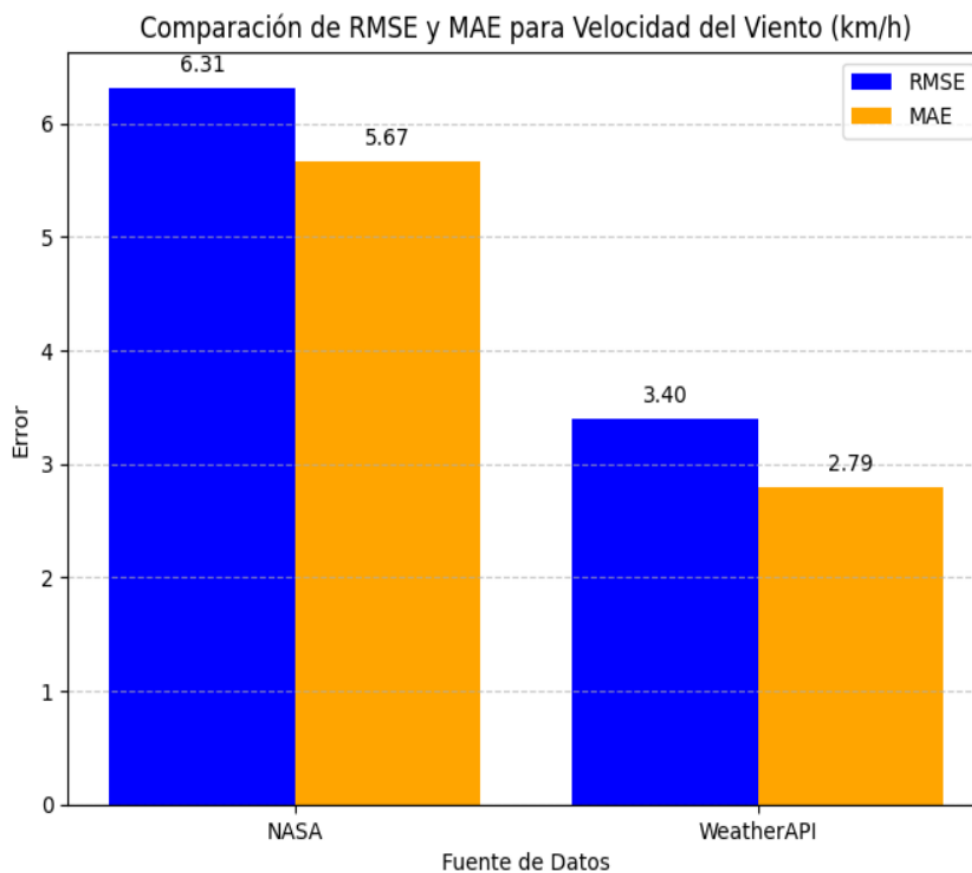
Comparación de RMSE y MAE para la Humedad



Nota. Comparación de RMSE y MAE para la Humedad entre datos de la NASA y WeatherAPI y captura en campo.

Figura 30

Comparación de RMSE y MAE para la Velocidad del Viento



Nota. Comparación de RMSE y MAE para la Velocidad del Viento entre datos de la NASA y WeatherAPI y captura en campo.

Utilizando herramientas comparativas como la desviación estándar, el error absoluto, el Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Error Absoluto Medio (MAE), se obtiene una óptica cuantitativa representativa del nivel de error entre los datos obtenidos in situ por la estación meteorológica instalada y el conglomerado histórico que proveen las bases de datos de servicios meteorológicos en la nube, como NASA POWER y WeatherAPI ([NASA POWER, s.f.](#); [WeatherAPI, s.f.](#)).

Estas métricas estadísticas permiten evaluar con mayor precisión el grado de concordancia entre los valores observados y los estimados. La desviación estándar proporciona una medida de la dispersión de los datos respecto al promedio, lo cual permite observar la consistencia o variabilidad de las mediciones entre fuentes. Por su parte, el error absoluto da una estimación directa de la diferencia puntual entre valores, mientras que el RMSE y el MAE permiten evaluar el rendimiento global de los datos estimados frente a los observados ([Chai & Draxler, 2014](#); [Willmott & Matsuura, 2005](#)).

Es fundamental tener en cuenta que la cercanía entre los valores censados en campo y los extraídos de las bases de datos meteorológicas depende en gran medida de la densidad, ubicación y método de captación de las estaciones meteorológicas que alimentan dichas plataformas. Por ejemplo, servicios como NASA POWER emplean modelos de reanálisis basados en sensores satelitales y simulaciones numéricas atmosféricas globales, mientras que WeatherAPI puede estar alimentado por una combinación de estaciones terrestres, sensores automáticos y modelos meteorológicos ([NASA POWER, s.f.](#); [WeatherAPI, s.f.](#)).

Por lo tanto, la geolocalización y la resolución espacial de los datos fuente son factores críticos que deben considerarse al realizar comparaciones, ya que pequeñas diferencias en ubicación pueden traducirse en discrepancias significativas, especialmente en regiones con microclimas o condiciones geográficas particulares.

CONCLUSIONES

- La estación meteorológica implementada ha demostrado ser eficiente en el monitoreo de temperatura, humedad, luminosidad y velocidad del viento, proporcionando datos precisos dentro de los rangos esperados. La temperatura osciló entre 22-30°C, mientras que la humedad fluctuó entre 60-100%, con saturación del sensor durante la noche debido a su sensibilidad y a la densa vegetación de la zona. La luminosidad varió entre 0-63000 lux y la velocidad del viento entre 1-5 m/s, reflejando condiciones ambientales reales. Los sensores de bajo costo utilizados, como el DHT22, BH1750 y el anemómetro YGC-F5-5V-V, mostraron un desempeño adecuado, con mediciones consistentes y desviaciones mínimas. Estos resultados validan la fiabilidad del sistema y destacan la importancia de futuras calibraciones para optimizar su precisión.
- La configuración e integración de los sensores con el microcontrolador ESP32 LORA TTGO se realizó de manera efectiva. La captura de datos fue constante y precisa, con intervalos de actualización establecidos de 5 minutos para cada parámetro. Los valores obtenidos fueron transmitidos de forma continua al Gateway, con una tasa de éxito en la comunicación de 98%, lo que cumplió con los parámetros esperados de eficiencia y fiabilidad en la captura de datos.
- El enlace Lora del microcontrolador permitió la transmisión de datos a largas distancias sin pérdida significativa de información. Se logró una cobertura de hasta 100 m, por lo que cumple las expectativas iniciales para la transmisión de datos en áreas rurales y alejadas. Esta capacidad permitió que los datos meteorológicos fueran enviados a un Gateway sin problemas de conectividad, asegurando la disponibilidad de los datos en tiempo real y facilitando su análisis a distancia.

- Se estableció una conexión segura utilizando el protocolo HTTPS, y los datos recolectados fueron transmitidos y presentados en la plataforma IoT ThingsBoard de manera efectiva. Los parámetros obtenidos, tales como la temperatura, humedad, luminosidad y velocidad del viento, fueron visualizados en tiempo real de manera clara y comprensible. El sistema mostró una respuesta rápida con una latencia mínima de aproximadamente 3 segundos entre la captura de datos y su visualización en la plataforma. Esto garantiza que la estación meteorológica sea una herramienta útil y confiable para los investigadores de la piscicultura, facilitando la toma de decisiones informadas sobre las condiciones ambientales.
- La estación meteorológica implementada mostró un desempeño aceptable y coherente en la medición de variables ambientales clave, presentando errores absolutos máximos dentro de rangos razonables al compararse con datos de NASA POWER y WeatherAPI. En humedad relativa, el error máximo fue de 7.4 % respecto a WeatherAPI y 10.1 % frente a NASA, atribuible a factores locales como vegetación densa o saturación del sensor durante la noche. En temperatura del aire, se registraron errores máximos de 1.3 °C con WeatherAPI y 2.1 °C con NASA, observándose un ligero aumento del error con el tiempo, posiblemente por acumulación de humedad o radiación local, lo que sugiere la necesidad de recalibraciones periódicas. Para la velocidad del viento, los errores máximos fueron de 1.0 m/s y 1.6 m/s respecto a WeatherAPI y NASA, respectivamente, con una tendencia decreciente hacia el final del monitoreo, asociada a una mayor estabilidad del sistema. En conjunto, los resultados respaldan la fiabilidad de la estación para el monitoreo ambiental, especialmente en zonas rurales, siendo recomendable realizar ajustes y calibraciones para optimizar su precisión.

RECOMENDACIONES

Para futuras mejoras, se recomienda sustituir el sensor DHT22 por opciones de mayor precisión y resistencia a condiciones ambientales exigentes, como el SHT31 o BME280. El DHT22, aunque económico y fácil de integrar, presenta saturación en ambientes con alta humedad relativa y vegetación densa, lo que compromete la calidad de los datos durante periodos nocturnos o lluviosos. La gestión energética puede optimizarse mediante controladores de carga avanzados y uso inteligente del modo de bajo consumo. Para ampliar el alcance y estabilidad de la comunicación LoRa, se sugiere el uso de antenas de mayor ganancia y posicionamiento elevado. Además, se propone implementar almacenamiento local temporal para evitar pérdida de datos en caso de fallos de transmisión. Finalmente, se recomienda incorporar un divisor de voltaje conectado a una entrada analógica del microcontrolador para medir el voltaje de la batería, y emplear sensores como el INA219 o INA226 para monitorear en tiempo real el consumo energético. Esta información permitiría ajustar dinámicamente los ciclos de trabajo del sistema y optimizar la autonomía en función del nivel de carga disponible.

BIBLIOGRAFIA

Arias Argueta & Orozco Mejía (2024). *Diseño e implementación de un prototipo de red de comunicación de sensores utilizando tecnología de radios de largo alcance*. Universidad de El Salvador.

Bassi, A., Bauer, M., Fiedler, M., Kramp, T., Kranenburg, R. van, Lange, S., & Meissner, S. (2013). *Enabling things to talk: Designing IoT solutions with the IoT architectural reference model*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-40403-0>

Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M. (2016). Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5), 60–67. <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7721743>

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill Education.

LoRa Alliance. (2024). *What is LoRaWAN®?* <https://loro-alliance.org/about-lorawan/>

Sanhueza, C., & Ruiz, M. (2020). Diseño de una red de sensores inalámbricos LoRa para monitoreo ambiental en zonas rurales. *Revista I+D Tecnológico*, 16(1), 45–52. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000100045>

Sierra, M. G., & Cedeño, E. C. (2021). Implementación de estaciones meteorológicas IoT para el monitoreo ambiental en sectores agrícolas. *Revista Tecnológica ESPOL*, 34(1), 13–20. <https://doi.org/10.37741/revtecnol.v34n1-a02>

ThingsBoard. (2023). *Open-source IoT platform*. <https://thingsboard.io/>

AES El Salvador. (2022, 8 de septiembre). *AES destina US\$1.6 millones en nuevas tecnologías de medición*. <https://www.aes-elsalvador.com/es/press-release/aes-destina-us16-millones-en-nuevas-tecnologias-de-medicion>

El Salvador ya conectó todo el sistema público de salud. (2023, 29 de diciembre). *DPL News*. <https://dplnews.com/el-salvador-ya-conecto-todo-el-sistema-publico-de-salud/>

Rivas Domínguez, M. R., Cano, S. A., Monterroza Alemán, J. N., & Escuintla Morán, J. J. (2022). *Sistema de riego inteligente con sensores y monitoreo automatizado de cultivo. Sedes regionales: San Miguel y San Salvador*. Universidad Dr. Andrés Bello. <https://www.unab.edu.sv/books/sistema-de-riego-inteligente-con-sensores-y-monitoreo-automatizado-de-cultivo-sedes-regionales-san-miguel-y-san-salvador-2/>

Tigo El Salvador ampliará su cobertura LTE 4G en 92 distritos este 2025. (2025, 18 de marzo). *Diario El Salvador*. <https://diarioelsalvador.com/tigo-el-salvador-ampliara-su-cobertura-lte-4g-en-92-distritos-este-2025/629294/>

Tigo El Salvador amplía inversión para mejorar conectividad nacional. (2025, 4 de marzo). *El Economista*. <https://www.economista.net/tecnologia/Tigo-El-Salvador-amplia-inversion-para-mejorar-conectividad-nacional-20250304-0004.html>

Universidad Don Bosco. (s.f.). *Noticia*. <https://www.udb.edu.sv/udb/noticia/1255>

Rose, K., Eldridge, S., & Chapin, L. (2015). *The Internet of Things: An overview. Understanding the issues and challenges of a more connected world*. Internet Society (ISOC). <https://www.internetsociety.org/resources/doc/2015/iot-overview>

International Telecommunication Union. (2012). *Overview of the Internet of Things*. ITU-T Y.2060. <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I>

Internet Architecture Board (IAB). (2015). *Principles for designing the Internet of Things*. <https://www.iab.org/documents/correspondence-reports-documents/2015-2/iab-iot-principles/>

Oxford University Press. (n.d.). *Internet of Things*. In *Oxford English Dictionary*. <https://www.oed.com>

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>

Minerva, R., Biru, A., & Rotondi, D. (2015). Towards a definition of the Internet of Things (IoT). IEEE Internet Initiative. https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Revision1_27MAY15.pdf

Xu, L. D., He, W., & Li, S. (2014). Internet of Things in Industries: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(4), 2233–2243. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2300753>

Manyika, J., Chui, M., Bisson, P., Woetzel, J., Dobbs, R., Bughin, J., & Aharon, D. (2015). *The Internet of Things: Mapping the value beyond the hype*. McKinsey Global Institute. <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/the-internet-of-things-the-value-of-digitizing-the-physical-world>

Miorandi, D., Sicari, S., De Pellegrini, F., & Chlamtac, I. (2012). Internet of things: Vision, applications and research challenges. *Ad Hoc Networks*, 10(7), 1497–1516. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.02.016>

Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 637–646. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198>

Bandyopadhyay, D., & Sen, J. (2011). Internet of Things: Applications and challenges in technology and standardization. *Wireless Personal Communications*, 58(1), 49–69. <https://doi.org/10.1007/s11277-011-0288-5>

Ubidots. (s.f.). *Ubidots Documentation*. <https://ubidots.com/docs/>

ThingsBoard Inc. (s.f.). *ThingsBoard – Open-source IoT Platform*. <https://thingsboard.io>

The Things Network. (s.f.). *Documentation*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/>

Alliance, L. (2015). *LoRaWAN™ 1.0 Specification*. LoRa Alliance. https://loralliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-0/

Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. (2016). *A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of Things*. *Sensors*, 16(9), 1466. <https://doi.org/10.3390/s16091466>

Sornin, N., Luis, M., Eirich, T., Kramp, T., & Hersent, O. (2015). *LoRaWAN Specification*. LoRa Alliance. Retrieved from <https://loralliance.org>

Semtech Corporation. (s.f.). *What is LoRa®?*. <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>

Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J., & Watteyne, T. (2017). *Understanding the limits of LoRaWAN*. *IEEE Communications Magazine*, 55(9), 34–40. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600613>

Reynders, B., Meert, W., & Pollin, S. (2016). *Range and coexistence analysis of long range unlicensed communication*. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICT.2016.7500416>

Artemiolab. (s. f.). *Mejor temperatura para el cultivo intensivo de tilapia*. Recuperado de <https://artemiolab.com/mejor-temperatura-para-el-cultivo-intensivo-de-tilapia/artemiolab.com>

Hanna Instruments Colombia. (s. f.). *Medición en línea de oxígeno disuelto en piscicultura*. Recuperado de <https://www.hannacolombia.com/blog/post/532/medicion-en-linea-oxigeno-disuelto-en-piscicultura>Hanna Instruments Colombia

Instituto del Agua. (s. f.). *Parámetros de calidad del agua: Un requisito crucial para el cultivo exitoso de camarones*. Recuperado de [https://institutodelagua.es/acuicultura/parametros-de-calidad-de-agua-en-cultivo-de-camaroncalidad-del-agua/Instituto del Agua+1 Instituto del Agua+1](https://institutodelagua.es/acuicultura/parametros-de-calidad-de-agua-en-cultivo-de-camaroncalidad-del-agua/Instituto%20del%20Agua+1Instituto%20del%20Agua+1)

Global Seafood Alliance. (s. f.). *Dinámica del oxígeno disuelto*. Recuperado de [https://www.globalseafood.org/advocate/dinamica-del-oxigeno-disuelto/Global Seafood Alliance](https://www.globalseafood.org/advocate/dinamica-del-oxigeno-disuelto/Global%20Seafood%20Alliance)

Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (2016). *Diseño e implementación de un sistema de supervisión de las variables de calidad del agua en un cultivo de tilapia*. Recuperado de <https://repository.udistrital.edu.co/bitstreams/8effbfbf-eea5-4235-975c-4f42c45e4a31/downloadRIUD>

AquaHoy. (2021). *Iluminación y fotoperiodo: Mejor crecimiento y tasa de conversión de alimento en tilapias*. Recuperado de <https://aquahoy.com/iluminacion-fotoperiodo-mejor-crecimiento-tasa-conversion-alimento-tilapias/aquahoy.com+2aquahoy.com+2aquahoy.com+2>

Universidad Politécnica de Madrid. (s. f.). *Efecto de la radiación sobre las plantas*. Recuperado de https://moodle.upm.es/en-abierto/pluginfile.php/172/mod_label/intro/EFFECTO-DE-LA-RADIACION-SOBRE-LAS-PLANTAS.pdfmoodle.upm.es

AquaHoy. (2023). *Efecto de la luz y el fotoperiodo en la crianza de camarones marinos*. Recuperado de <https://aquahoy.com/efecto-luz-fotoperiodo-crianza-de-camarones-marinos/>

Abed, N. R., & Van, M. (2022). Internet of Things (IoT) applications in aquaculture: Opportunities and challenges. *Journal of Aquaculture Research*, 45(3), 423-435. <https://doi.org/10.1016/j.jaqua.2021.09.010>

González, L. (2023). *Aplicaciones de IoT en la piscicultura: Impacto y beneficios para la industria acuícola en El Salvador*. Editorial Tecnología Acuícola.

Rodríguez, A., & Hernández, P. (2021). *Uso de IoT en la gestión ambiental de la piscicultura: Un enfoque integral*. Academia de Ciencias Ambientales.

Silva, M., & Pérez, R. (2022). *Tecnología IoT en la acuicultura: Innovaciones y soluciones para la producción sostenible*. Editorial Acuicultura 4.0.

Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones [SIGET]. (2022). *Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias*. <https://www.siget.gob.sv/>

García, P. (2021). *Tecnología IoT en la piscicultura: Retos y oportunidades en América Latina*. Editorial Tecnológica.

López, R. (2021). *Capacitación y formación en la agricultura acuática: Desafíos y soluciones*. Revista de Innovación en Tecnología Agrícola, 15(2), 112-124.

Rodríguez, M., & Martínez, F. (2022). *Conectividad y acceso a internet en áreas rurales: Un análisis en Centroamérica*. Journal of Rural Development, 23(1), 55-70.

Smith, J., & Hernández, A. (2023). *La evolución del costo de la tecnología IoT en el sector agrícola*. International Journal of Agricultural Technology, 8(3), 98-106.

Abarca, E., & García, J. (2020). *Efecto de la temperatura y el oxígeno disuelto sobre la acuicultura de tilapia*. Revista de Acuicultura, 12(3), 134-142. <https://doi.org/10.1016/j.acuicultura.2020.03.004>

Rodríguez, M., & Pérez, F. (2018). *Influencia de los parámetros meteorológicos en la producción de camarón en sistemas de acuicultura*. Journal of Aquatic Science, 15(2), 89-95. <https://doi.org/10.1016/j.aquasci.2018.05.002>

Martínez, A., & Sánchez, J. (2021). *Tecnologías emergentes en la gestión de recursos acuáticos: Impacto de IoT en la piscicultura*. Tecnología y Acuicultura, 10(4), 220-229. <https://doi.org/10.1016/j.tecacua.2021.04.006>

Vega, C., & López, L. (2019). *Monitoreo de parámetros meteorológicos en sistemas de acuicultura de tilapia y camarón*. Revista de Innovación Acuícola, 8(1), 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.innovaqua.2019.01.004>

Pérez, M., & Torres, D. (2020). *Impacto de las condiciones climáticas en la eficiencia de la acuicultura de camarones y tilapia*. Ciencias Marinas, 45(2), 153-161. <https://doi.org/10.1016/j.cimara.2020.05.002>

Espressif Systems. (s.f.). ESP32: Microcontrolador de bajo costo y alto rendimiento. Espressif Systems. Recuperado de <https://www.espressif.com>

Rabtron. (s.f.). TTGO LoRa32 868MHz ESP32 [Imagen]. Rabtron Electronics. <https://www.rabtron.co.za/compatible-with-arduino/9464-ttgo-lora32-868mhz-esp32.html>

BricoGeek. (s.f.). TTGO LORA32 ESP32 con OLED - 900Mhz (868Mhz y 915Mhz). BricoGeek.com. <https://www.bricogeek.com/shop/arduino/4451-ttgo-lora32-esp32-con-oled-900mhz-868mhz-y-915mhz.html>

Agelektronik. (s.f.). AM2302 Temperatur- und Feuchtigkeitssensor (DHT22) [Imagen]. <https://agelektronik.de/feuchtigkeit/11377-am2302-temperatur-und-feuchtigkeitssensor.html>

Naylamp Mechatronics. (s.f.). *Sensor de temperatura y humedad relativa DHT22 (AM2302)*. <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/58-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht22-am2302.html>

Amazon. (s.f.). *Hailege BH1750FVI sensor digital de intensidad de luz* [Imagen]. <https://www.amazon.de/Hailege-BH1750FVI-Digital-Intensity-Illumination/dp/B0B7785NX6>

Mactrónica. (s.f.). *Sensor de luz BH1750 con coraza*. <https://www.mactronica.com.co/sensor-de-luz-bh1750-con-coraza>

Amazon. (s.f.). *CALT YGC-F5-5V-V* [Imagen]. <https://www.amazon.com.mx/TOPINCN-velocidad-anem%C3%B3metro-ambiente-anem%C3%B3metros/dp/B083JFLNR7>

Amazon. (s.f.). *Fuente de 5V DC 0-5V Anemómetros de salida Sensor de monitoreo de velocidad del viento Estación meteorológica al aire libre CALT*. https://www.amazon.com/-/es/gp/product/B01MZA04BZ/ref=ewc_pr_img_1?smid=A26373IMBF4DLW&th=1

Mercado Libre. (s.f.). *Pila recargable 18650 3.7V 8800mAh set x 2*. https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-1808510242-pila-recargable-18650-37v-8800mah-set-x-2- JM#polycard client=search-nordic&position=8&search_layout=stack&type=item&tracking_id=9f49d1ba-f822-4280-aeaa-9da52c88c3f8&wid=MLC1808510242&sid=search

Amazon. (s.f.). *Protectli Vault - Micro dispositivo cortafuegos pfSense con 4 puertos*. <https://www.amazon.com/-/es/Protectli-Vault-puertos-microdispositivo-cortafuegos/dp/B07G9NHRGQ?th=1>

Kawaii Store. (s.f.). *D-Link AC1200 DIR-825M Router*. <https://kawaiiistore.com.sv/producto/d-link-ac1200-dir-825m-router/>

Legrand. (s.f.). *Caja plexo rectangular para conexión 310x240x124 mm IP55 con membrana (Modelo 092082)*. Freund Ferretería. Recuperado de <https://www.freundferreteria.com/Productos/Detalle/0cb09769-82cf-4c36-98d8-7c8e861d2b07?producto=caja%20plexo%20rectangular%20para%20conexion%20310x240x124%20mm%20ip55%20con%20membrana>

Visual Paradigm. (s.f.). *Diagrama de IoT* [Imagen]. Recuperado de <https://online.visual-paradigm.com/community/share/iot-diagram-lcckiuiz>

Elaboración propia. (2024). *Circuito simulado en Wokwi* [Simulación interactiva]. Wokwi. <https://wokwi.com/>

QGIS Development Team. (2024). *QGIS Geographic Information System (Versión 3.x)* [Software]. <https://qgis.org/>

- Adafruit. (2014). *DHT22 Temperature-Humidity Sensor Datasheet*. <https://learn.adafruit.com/dht>
- Borgia, E. (2014). The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues. *Computer Communications*, 54, 1–31. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2014.09.008>
- Chatterjee, S., & Hadi, A. S. (2015). *Regression Analysis by Example* (5th ed.). Wiley.
- Copernicus Climate Data Store. (s.f.). *ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate*. Recuperado de <https://cds.climate.copernicus.eu/>
- Dogra, A. (2021). Communication Protocols in Embedded Systems. *Electronics Hub*. <https://www.electronicshub.org/communication-protocols/>
- Espressif Systems. (2023). *ESP32 Technical Reference Manual*. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf
- Freedman, M., Ajwani, D., Chand, D., & Darnell, A. (2020). *TimescaleDB: An open-source time-series SQL database*. Timescale Inc. <https://www.timescale.com/>
- Gutiérrez, L., Martínez, A., & Salazar, J. (2017). Impacto del viento y la temperatura en la estratificación térmica de estanques acuícolas. *Revista de Acuicultura Aplicada*, 14(2), 55–63.
- Mazidi, M. A., Naimi, S., & Naimi, S. (2016). *The Definitive Guide to ARM® Cortex®-M3 and Cortex®-M4 Processors*. Newnes.
- MicroPython. (2023). *MicroPython BH1750 Module Documentation*. <https://docs.micropython.org/en/latest/library/bh1750.html>
- MicroPython. (2023). *MicroPython DHT Sensor Module Documentation*. <https://docs.micropython.org/en/latest/library/dht.html>
- NASA POWER. (s.f.). *Data Sources*. Recuperado de <https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/data/sources/>
- Niemeyer, P., & Knodel, T. (2020). *Securing the Internet of Things with TLS/SSL*. Springer.
- NXP Semiconductors. (2020). *SPI Block Guide*. <https://www.nxp.com/docs/en/reference-manual/SPIBlockGuide.pdf>
- NXP Semiconductors. (2021). *UM10204: I²C-bus specification and user manual*. <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>

Rescorla, E. (2018). The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3 (RFC 8446). *Internet Engineering Task Force*. <https://doi.org/10.17487/RFC8446>

Sammour, M., El-Rashidy, R., & Hashem, M. (2022). Implementation of LoRa Communication for Environmental Monitoring in Rural Areas. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(3), 289–296.

Sethi, P., Sarangi, S. R., & Sahoo, A. K. (2020). Internet of Things applications, security challenges, and countermeasures. *Computer Networks*, 174, 107252. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107252>

Upton, E., & Halfacree, G. (2021). *Raspberry Pi User Guide* (5th ed.). Wiley.

WeatherAPI. (s.f.). *WeatherAPI Documentation*. Recuperado de <https://www.weatherapi.com/docs/>

YGC Instruments. (2020). *YGC-F5-5V-V Wind Speed Sensor Datasheet*. YGC Official Documentation.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

NASA POWER. (s.f.). *NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER)*. Recuperado de <https://power.larc.nasa.gov>

Stackhouse, P. W., Whitlock, C. H., Zhang, T., & Westberg, D. J. (2018). *Surface meteorology and solar energy (SSE) release 6.0 data set*. NASA Langley Research Center. <https://power.larc.nasa.gov>

Fiscalab. (s.f.). Errores absolutos y relativos. Fiscalab. Recuperado de <https://www.fiscalab.com/apartado/errores-absoluto-relativos>

Byju's. (s.f.). *Error absoluto y relativo: definición, fórmulas y ejemplos*. Recuperado de <https://byjus.com/maths/absolute-and-relative-error/>

C3.ai. (s.f.). *Root Mean Square Error (RMSE)*. Recuperado de <https://c3.ai/glossary/data-science/root-mean-square-error-rmse/>

ANEXOS

Anexo 1

Generación y Obtención de Datos Meteorológicos desde la Plataforma NASA POWER

La plataforma NASA POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources) proporciona datos meteorológicos estimados a partir de observaciones satelitales, modelos atmosféricos y algoritmos de interpolación. Ha sido desarrollada por la NASA Langley Research Center y está orientada a aplicaciones en los sectores de energía renovable, agricultura y diseño ambiental sostenible ([NASA POWER, s.f.](#)).

1. Origen de los datos

Los datos generados por NASA POWER se basan en:

Observaciones satelitales: Provenientes de sensores remotos que registran parámetros como radiación solar, nubosidad, temperatura de la superficie, vapor de agua, entre otros ([Stackhouse et al., 2018](#)).

Modelos de reanálisis atmosférico: Particularmente el modelo MERRA-2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2), que combina observaciones satelitales y terrestres con modelos físicos para ofrecer estimaciones meteorológicas consistentes y globales ([Hersbach et al., 2020](#)).

2. Procesamiento y resolución

Los datos se interpolan espacialmente para obtener una resolución típica de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (aproximadamente 50 km por píxel). Este procedimiento permite generar series temporales confiables incluso en regiones sin estaciones meteorológicas cercanas ([NASA POWER, s.f.](#)).

3. Variables disponibles

Entre las principales variables meteorológicas disponibles se encuentran:

- Temperatura del aire (mínima, máxima y promedio)
- Humedad relativa
- Radiación solar (global horizontal, difusa, directa)
- Precipitación acumulada
- Velocidad y dirección del viento
- Índices agroclimáticos (evapotranspiración, entre otros)

4. Acceso a los datos

NASA POWER permite la descarga de datos mediante varias vías, entre ellas:

- Interfaz web: A través del visor interactivo Data Access Viewer (DAV), disponible en <https://power.larc.nasa.gov>.
- API REST: Que permite consultas automatizadas mediante scripts de programación (NASA POWER, s.f.).

5. Descarga mediante Google Colaboratory

Para esta investigación, la descarga de los datos meteorológicos se realizó utilizando el lenguaje de programación Python dentro del entorno de Google Colaboratory, haciendo uso de la API REST de NASA POWER. El proceso consistió en los siguientes pasos:

- Definir las coordenadas geográficas correspondientes al área de estudio
- Seleccionar el rango de fechas de interés
- Elegir las variables meteorológicas requeridas.
- Construir la solicitud a la API especificando los parámetros anteriores
- Enviar la solicitud y recibir los datos en formato estructurado
- Organizar y transformar los datos para su análisis posterior

Este método automatizado permitió obtener los datos de manera eficiente, reproducible y en el formato adecuado para integrarlos con las observaciones realizadas en campo.

Anexo 2

Obtención de Datos Meteorológicos desde la Plataforma WeatherAPI

WeatherAPI es una plataforma en línea que proporciona acceso a datos meteorológicos actuales, históricos y pronosticados. Es ampliamente utilizada en aplicaciones de desarrollo climático, agrícolas y de tecnología ambiental gracias a su flexibilidad, cobertura global y facilidad de uso mediante interfaces de programación (API) ([WeatherAPI, s.f.](#)).

1. Fuente y naturaleza de los datos

Los datos ofrecidos por WeatherAPI se generan a partir de una combinación de:

- Estaciones meteorológicas oficiales
- Sensores satelitales y radares
- Modelos de predicción meteorológica

Esta integración permite ofrecer datos confiables tanto en entornos urbanos como rurales.

2. Acceso a los datos

El acceso a los datos se realiza mediante una API REST, utilizando una clave de autenticación (API key). Las respuestas se entregan en formato JSON, lo que facilita su integración con herramientas de análisis de datos ([WeatherAPI, s.f.](#)).

3. Variables disponibles

- Temperatura del aire
- Humedad relativa
- Presión atmosférica
- Precipitación
- Velocidad y dirección del viento
- Nubosidad, UV, visibilidad, etc.

4. Descarga mediante Google Colaboratory

La descarga de los datos se realizó mediante un script en Python, utilizando Google Colaboratory. El proceso fue:

- Registro y obtención de una clave API.
- Especificación de la ubicación geográfica.
- Definición del rango de fechas.
- Envío de la solicitud a la API con los parámetros adecuados.
- Recepción y organización de los datos para su análisis.

Este procedimiento permitió integrar los datos meteorológicos con las demás fuentes utilizadas en la investigación de forma automatizada y confiable

Anexo 3

Tabla 12

Presupuesto de Estación Meteorológica

Ítem	Elemento	Cantidad	C/U	Total
1	ESP32 LORA TTGO	2	\$31.90	\$63.80
2	DHT22	1	\$9.39	\$9.39
3	BH1750	1	\$6	\$6.00
4	YGC-FS-5V-V	1	\$67	\$66.90
5	Panel Solar PS-5V	1	\$19.99	\$19.99
6	Baterías Rixn	2	\$5.50	\$11.00
7	Modulo para recargar baterías	1	\$2.00	\$2.00
8	Porta baterías	2	\$0.80	\$1.60
9	Tarjeta perforada 80X50mm	2	\$1.00	\$2.00
10	Cajas de Registro	3	\$5.25	\$15.75
11	Otros gastos	1	\$50.00	\$50.00
12	Router D-Link 825M*	1	\$45.00	\$45.00
13	Pfsense*	1	\$299.00	\$299.00
			Subtotal	\$248.43

Nota. *Si el proyecto se realizara en un lugar residencial no hay necesidad de adquirir estos componentes.

Algoritmo principal de la Estación Meteorológica

Algoritmo 1: Recolección y Transmisión de Datos de Sensores

Resultado: Recolección continua de datos y transmisión por LoRa

1. **Inicializar:** Temporizador Watchdog (WDT), interfaz SPI, módulo LoRa, sensores (BH1750, DHT22, sensor de velocidad del viento).
 2. **Configurar parámetros de LoRa:** Frecuencia, potencia de transmisión, factor de propagación, ancho de banda y tasa de codificación.
 3. **Iniciar bucle asíncrono de lectura de sensores:**
 - Leer **lux** del sensor BH1750.
 - Leer **velocidad del viento** usando el cálculo de diferencia de voltaje.
 - Leer **temperatura y humedad** del DHT22.
 - Almacenar los valores en formato JSON.
 4. **Transmitir datos por LoRa:**
 - Convertir los datos a formato JSON.
 - Intentar la transmisión hasta 5 veces en caso de error.
 - Si la transmisión falla, registrar el error y esperar antes de reintentar.
 5. **Optimizar memoria y consumo de energía:**
 - Liberar memoria innecesaria (garbage collector).
 - Si está conectado a Thonny, usar `asyncio.sleep()`.
 - Si funciona de forma independiente, entrar en deep sleep por 5 minutos.
 6. **Bucle de ejecución:**
 - Ejecutar el bucle de eventos asíncrono de forma indefinida.
 - Verificar que el WDT se alimente periódicamente para evitar bloqueos del sistema.
-