

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



**SISTEMA DE INTERNET DE LAS COSAS CON SENSORES,
MÓDULOS DE TRANSMISIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS
PARA EL DESARROLLO DE UNA INFRAESTRUCTURA DE
AGRICULTURA INTELIGENTE**

PRESENTADO POR:

JORGE ALBERTO ANGULO DÍAZ

WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA PARA LA INDUSTRIA, CON
ESPECIALIZACIÓN EN TELECOMUNICACIONES**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO DE 2026

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LCDO. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

MSc. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE POSGRADO

DIRECTOR:

MSc. ELMER ARTURO CARBALLO RUÍZ

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA PARA LA INDUSTRIA, CON
ESPECIALIZACIÓN EN TELECOMUNICACIONES**

Título:

**SISTEMA DE INTERNET DE LAS COSAS CON SENSORES,
MÓDULOS DE TRANSMISIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS
PARA EL DESARROLLO DE UNA INFRAESTRUCTURA DE
AGRICULTURA INTELIGENTE**

Presentado por:

JORGE ALBERTO ANGULO DÍAZ

WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor(a):

MSc. OMAR OTONIEL FLORES CÓRTEZ

SAN SALVADOR, MARZO DE 2026

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

MSc. OMAR OTONIEL FLORES CÓRTEZ

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la culminación de este trabajo.

En primer lugar, a Dios, por darme la fortaleza, la salud y la perseverancia necesarias para llegar hasta aquí.

A mi asesor, el MSc. Omar Otoniel Flores Córtez, por su invaluable guía, dedicación y consejos que enriquecieron este proyecto. Su compromiso y confianza en mi trabajo fueron fundamentales para alcanzar este logro.

Al PhD. Carlos Osmin Pocasangre Jiménez, coordinador de la maestría, por su gestión impecable y por asegurar que cada etapa de este proceso administrativo y académico fuera un camino de aprendizaje y crecimiento.

A mi esposa, por su amor incondicional, paciencia y apoyo constante en cada etapa de este camino. Sus palabras de aliento fueron mi motor en los momentos más difíciles. A mi hijo, quien es mi mayor motor para superarme; espero que este logro sea un ejemplo de que el esfuerzo siempre rinde frutos.

A mis compañeros y amigos, por compartir ideas, motivación y sonrisas en los días de mayor presión.

Jorge Angulo

AGRADECIMIENTOS

Aprovecho la oportunidad para expresar mi más sincero agradecimiento, a todos aquellos que me ayudaron a concluir satisfactoriamente este reto:

En primer lugar, a Dios por haberme brindado salud y perseverancia en los momentos más difíciles de esta etapa.

Al MSc. Omar Otoniel Flores Córtez, por su profesionalismo y guía a lo largo de este proyecto, aspectos claves para la culminación de esta meta.

Al PhD. Carlos Osmin Pocasangre Jiménez, por su apoyo y motivación desinteresada, no solo como coordinador de la Maestría, sino como persona preocupada por el crecimiento personal y académico de sus compañeros de trabajo.

A mi esposa, compañera de toda la vida y mis hijas, por brindarme la inspiración y fortaleza necesaria para afrontar este tipo de retos y, además, por ser la luz que da sentido a mi existencia.

Werner Meléndez

Contenido

Introducción.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos	2
Alcances	3
CAPITULO I: Marco Teórico y Metodología	4
Antecedentes tecnológicos de la agricultura en El Salvador	4
Tecnologías de conectividad	7
Internet de las cosas (IoT): conceptos y características.....	10
Control de calidad del Agua en Acuicultura	11
Proceso de fermentación del Cacao.....	11
Metodología de Investigación y Metodología de Diseño de Prototipos.....	15
CAPITULO II: Diseño del Sistema	18
Definición de requisitos.....	18
Casos de Uso	18
Arquitectura de sistema.	19
Especificación de procesos	21
Piscicultura	21
Fermentación de Cacao:	23
Sensores y calibración.	24
Componentes principales de los prototipos propuestos.....	24
Tarjetas de desarrollo de microcontroladores con radios LoRa incorporados.....	24

Sensores Estación Ambiental.	26
Sensores para fermentación de Cacao	33
Sensores Estación de calidad del agua.....	39
Plataforma IoT.....	51
Características:.....	51
Arquitectura:	52
Herramientas para implementación de VPN	53
Firmware OpenWrt.....	53
Protocolo OpenVPN (OSS)	54
Integración de dispositivos y componentes	55
Fermentación de Cacao.....	55
Estación meteorológica.....	55
Estación de calidad del agua.....	56
Estación de calidad del agua (monitoreo de PH).....	57
Gateway Lora/MQTT	58
Capitulo III: Resultados	59
Ejemplo de extracción de datos desde la Estación meteorológica	62
Estación de calidad del agua.....	78
Estación de fermentación de cacao.....	91
Referencias bibliograficas.....	100

Lista de Tablas

Tabla 1 Factores de propagación en envíos de datos.....	9
Tabla 2 Parámetros estándar de fermentación para cacao tipo criollo.....	15
Tabla 3 Descripción técnica ESP32.....	25
Tabla 4 Características principales del DHT22.....	28
Tabla 5 Características principales del YGC-F5-5V-V.....	30
Tabla 6 Características principales del BH1750.....	31
Tabla 7 Características de los sensores de temperatura y humedad (FS400), y pH (PH4502C). 35	
Tabla 8 Comparación de lecturas de temperatura.....	37
Tabla 9 Especificaciones sensor RS-ZD-N01-1.....	39
Tabla 10 Registros Modbus de sensor RS-ZD-N01-1.....	40
Tabla 11 Especificaciones Sensor de Oxígeno disuelto: RS-LDO-N01-1.....	42
Tabla 12 Registros Modbus de sensor de RS-LDO-N01-1.....	42
Tabla 13 Trama enviada por el <i>sensor de RS-LDO-N01-1</i>	43
Tabla 14 Especificaciones Sensor DS18B20.....	45
Tabla 15 Ejemplo de lecturas: Disco Secchi-Turbidímetro.....	48
Tabla 16 Parámetros para obtener datos de telemetría de ThingsBoard®.....	60
Tabla 17 Primeras líneas de DataFrame Ambiental.....	63
Tabla 18 Estadística descriptiva de parámetros ambientales.....	74
Tabla 19 Estadística descriptiva de variables de calidad del agua.....	87
Tabla 20 Estadística descriptiva de PH.....	90
Tabla 21 Estadística descriptiva de la temperatura y Ph.....	93

Lista de Figuras

Figura 1 Prototipo de fermentador tipo tambor giratorio, utilizado en este proyecto	14
Figura 2 Diagrama de arquitectura del sistema	20
Figura 3 Diagrama de bloques de sistema de monitoreo de estanques de piscicultura	22
Figura 4 Diagrama en bloques del sistema IoT propuesto para el monitoreo del proceso de fermentación del cacao	23
Figura 5 Imagen del dispositivo ESP32 usado como nodo IoT.....	24
Figura 6 Imagen del dispositivo ESP32 usado como nodo IoT.....	25
Figura 7 Imagen del sitio de instalación de la estación meteorológica	27
Figura 8 Sensor de Temperatura y Humedad DTH22	28
Figura 9 Anemómetro YGC-F5-5V-V	29
Figura 10 Sensor de Intensidad de Luz BH1750	31
Figura 11 Prototipo de estación meteorológica armado en su totalidad.....	32
Figura 12 Estructura de montaje de la estación meteorológica	33
Figura 13 Sensor de Temperatura y Humedad FS400-SHT30.....	34
Figura 14 Sensor de PH, modelo PH4502C	34
Figura 15 Sensor de Temperatura Omega HH414.....	36
Figura 16 Sustancias patrón, para calibración del Sensor de pH.....	38
Figura 17 Sustancias patrón para calibración del Sensor de pH, en polvo	38
Figura 18 Turbidímetro.....	39
Figura 19 Sensor de Oxígeno disuelto: RS-LDO-N01-1	41
Figura 20 Sensor DS18B20	44
Figura 21 Disco SECCHI y ejemplos de uso.....	46

Figura 22 Medición de turbidez con disco SECCHI	47
Figura 23 Medición de turbidez con turbidímetro	47
Figura 24 Curva de relación entre datos Secchi y turbidímetro	49
Figura 25 Curva de relación entre datos Secchi y Turbidímetro	49
Figura 26 Sustancia patrón, utilizada para calibrar el sensor de oxígeno disuelto	50
Figura 27 Arquitectura de plataforma IoT	53
Figura 28 Diagrama de bloques de Estación de monitoreo ambiental	56
Figura 29 Diagrama de bloques sistema de monitoreo de calidad del agua	57
Figura 30 Diagrama de bloques de estación de monitoreo de PH	58
Figura 31 Panel de monitoreo de Calidad de Agua	59
Figura 32 Gráfico de temperatura vs tiempo	64
Figura 33 Gráfico de Humedad vs tiempo	65
Figura 34 Gráfico de Intensidad de luz vs tiempo	65
Figura 35 Gráfico de velocidad del viento de luz vs tiempo	66
Figura 36 Gráfico de temperatura vs tiempo	67
Figura 37 Gráfico de Intensidad de luz vs tiempo	67
Figura 38 Gráfico de Humedad vs tiempo	68
Figura 39 Gráfico de velocidad del viento de luz vs tiempo	68
Figura 40 Gráfico de temperatura vs Hora del día	69
Figura 41 Gráfico de humedad vs Hora del día	70
Figura 42 Gráfico de Intensidad de la luz vs Hora del día	70
Figura 43 Gráfico de Velocidad del Viento vs Hora del día	71
Figura 44 Gráfico de Promedio de temperatura vs Hora del día	72

Figura 45 Gráfico de Promedio de humedad vs Hora del día.....	72
Figura 46 Gráfico de Promedio de Intensidad de la luz vs Hora del día	73
Figura 47 Gráfico de Promedio de Velocidad del viento vs Hora del día.....	73
Figura 48 Correlación entre variables ambientales.....	75
Figura 49 Comparación de datos de temperatura	75
Figura 50 Grafica de comparación de humedad entre Mediciones en campo y otras fuentes.....	76
Figura 51 Grafica de comparación de velocidad del viento entre Mediciones en campo y otras fuentes	77
Figura 52 Vista aérea de la zona de ubicación del estanque de peces	78
Figura 53 Gráfico de oxígeno disuelto vs tiempo.....	80
Figura 54 Gráfico de temperatura vs tiempo	80
Figura 55 Gráfico de turbidez vs tiempo	81
Figura 56 Gráfico de profundidad secci vs tiempo.....	81
Figura 57 Gráfico de oxígeno disuelto vs Hora del día	82
Figura 58 Gráfico de temperatura del agua vs Hora del día	83
Figura 59 Gráfico de profundidad Secci vs hora del día	83
Figura 60 Gráfico de Turbidez vs hora del día	84
Figura 61 Gráfico de Promedio de oxígeno disuelto del agua vs Hora del día	85
Figura 62 Gráfico de Promedio de Temperatura del agua vs Hora del día	85
Figura 63 Gráfico de Promedio de profundidad Secci vs Hora del día	86
Figura 64 Gráfico de Promedio de Turbidez vs Hora del día.....	86
Figura 65 Correlación entre variables de calidad del agua.....	88
Figura 66 Gráfica de PH vs tiempo	88

Figura 67 Gráfico de PH vs hora del día	89
Figura 68 Gráfico de promedio de PH vs hora del día	89
Figura 69 Gráfico de temperatura de pulpa de cacao vs tiempo.....	92
Figura 70 Gráfico de pH de cacao versus tiempo.....	92
Figura 71 Variaciones de Temperatura vs Volumen de carga.....	95
Figura 72 Variaciones de Humedad vs Volumen de carga.....	95
Figura 73 Variaciones de pH vs Volumen de carga	96
Figura 74 Comparación de resultados de variación de temperatura obtenidos con ambas tómbolas.....	96
Figura 75 Comparación de resultados de pH obtenidos con ambas tómbolas.....	97

Introducción.

En la actualidad, la agricultura enfrenta el desafío de producir alimentos de manera más eficiente y sostenible para satisfacer las demandas de una población en constante crecimiento. En respuesta a esta necesidad, el Internet de las Cosas (o IoT, por su acrónimo en inglés) ha surgido como una herramienta innovadora que puede transformar la forma en que se llevan a cabo los procesos agrícolas, en ese sentido, la presente propuesta tiene como finalidad, evaluar las opciones de sensores apropiados para este tipo de aplicaciones, así como las diversas alternativas para la transmisión y procesamiento de datos, de tal forma que se pueda proponer e implementar, un prototipo adecuado a las condiciones de El Salvador, que sirva de base para valorar su uso en otras zonas del país. Específicamente, este sistema estará compuesto por hardware especializado capaz de recopilar datos en tiempo real sobre diversos parámetros relevantes para la agricultura, como la temperatura, humedad del suelo, nivel de agua, calidad del aire, entre otros. Estos datos transmitidos, procesados y analizados mediante algoritmos específicos para proporcionar información precisa y oportuna sobre el estado y las condiciones del entorno agrícola. Se espera que los resultados obtenidos contribuyan al avance del conocimiento en este campo y proporcionen herramientas prácticas y efectivas para la mejora de la productividad y la rentabilidad del agro.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Diseñar un sistema de sensores, transmisión y procesamiento de datos, basado en tecnologías de Internet de las Cosas, orientado al campo de la agricultura inteligente en El Salvador

Objetivos específicos

1. Identificar el proceso agrícola y los parámetros de interés que deben ser monitoreados remotamente y gestionados automáticamente, para la implementación de un sistema de agricultura inteligente.
2. Evaluar las opciones de hardware disponibles en el mercado, que permitan el despliegue de un sistema apropiado a las condiciones de nuestro país.
3. Analizar las tecnologías de transmisión inalámbrica disponibles en El Salvador, que permitan el desarrollo de este tipo de aplicaciones.
4. Definir las herramientas de software adecuadas para el procesamiento automático de la información propia de estas aplicaciones, incluyendo la posibilidad de uso de infraestructura en la "Nube" y/o aprendizaje automático.
5. Proponer el diseño de un prototipo que cumpla con los requerimientos correspondientes, mostrando sus características de desempeño teórico, haciendo uso de las herramientas apropiadas para ello.
6. Realizar prueba piloto con el prototipo propuesto, en alguna zona apropiada en El Salvador, que permita establecer su viabilidad de uso en otras áreas del país.

Alcances

- El presente estudio incluye algunos procesos que afectan la producción de chocolate y el cultivo de tilapias en estanques cerrados, y se evalúan alternativas de tecnologías IoT capaces de mejorar estos procesos, de acuerdo a expertos consultados al efecto.
- Por limitaciones logísticas, las pruebas a realizar, se limitarán a la zona central de El Salvador, aunque los resultados que se obtengan, se consideran aplicables al resto del país.
- El funcionamiento de los sensores, en la medida de lo posible, se espera validar tomando en cuenta información de fuentes confiables o procesos de calibración recomendados por los fabricantes de estos sensores.

CAPITULO I: Marco Teórico y Metodología

Antecedentes tecnológicos de la agricultura en El Salvador

La agricultura, pilar fundamental de la economía de El Salvador, proporciona medios de vida y empleo a una parte significativa de la población. Los desafíos actuales del sector, incluyen: los efectos del cambio climático, la escasez de recursos hídricos y la necesidad de mejorar la eficiencia y la productividad, para satisfacer la creciente demanda [1]. En este contexto, el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) ofrece soluciones innovadoras para transformar las prácticas agrícolas tradicionales, optimizar el uso de recursos y mejorar la toma de decisiones mediante el análisis de datos en tiempo real.

El sector agrícola salvadoreño enfrenta varios desafíos importantes, como la baja productividad, la falta de modernización y la dependencia de métodos agrícolas tradicionales. Bravo-Ureta et al. [2] observaron que la falta de adopción de tecnologías avanzadas constituye un obstáculo significativo para la productividad agrícola en el país. Esto resalta la necesidad de promover la adopción y difusión de tecnologías mejoradas y de fortalecer los servicios de extensión agrícola para optimizar las capacidades de gestión. La implementación de tecnologías modernas en el agro salvadoreño, han arrojado resultados dispares. Un estudio realizado por Norton [3] evaluó el potencial competitivo del sector agrícola salvadoreño. El estudio reveló que, si bien ciertas tecnologías han mejorado la competitividad de ciertos cultivos, la falta de infraestructura y recursos técnicos limita su adopción generalizada. Sin embargo, este estudio también destaca el potencial de estas tecnologías, sugiriendo que, con el desarrollo de procedimientos prácticos para cuantificar el contenido de conocimiento de los costos de producción, podríamos observar una mejora significativa en la eficiencia y la competitividad agrícola.

El presente trabajo tiene como finalidad, proponer la implementación de tecnologías IoT en tres procesos de producción importantes para el sector agrícola salvadoreño, siendo éstos:

1. Producción de chocolate: concretamente lo referente a la fermentación del cacao
2. Cultivo de tilapia: enfocado en el monitoreo de calidad de agua
3. Aunado a estos, se incluye el monitoreo climático, dada su influencia en los procesos agrícolas en general, y a los dos antes mencionados en particular.

Para lo anterior, se hace una evaluación detallada de la infraestructura necesaria para su implementación incluyendo sensores, sistemas de comunicación, almacenamiento de información y metodologías de gestión y análisis de datos; así mismo, se muestran ejemplos de implementación que resaltan la importancia de su aplicación en la mejora de estos procesos.

El Salvador es un país que tiene un gran potencial en la producción de cacao, destacando en concursos internacionales; en 2023 la “International Cocoa Organización” (ICCO), reconoció a El Salvador entre los 20 países que exportan cacao fino en el mundo [4], y a pesar de estos logros, en El Salvador, aún prevalecen técnicas subjetivas como base para controlar este tipo de producciones. La fermentación juega un papel importante en la calidad del producto final, y es usual que (en nuestro medio) su control se haga mediante procedimientos empíricos, lo que afecta la homogenización de resultados.

La fermentación del cacao es un proceso biológicamente complejo y dependiente de la temperatura, crucial para realzar el aroma, el sabor y la acidez en la elaboración del chocolate. Durante esta etapa de la pos-cosecha, los granos de cacao experimentan transformaciones

microbianas y enzimáticas impulsadas por la actividad metabólica de levaduras, bacterias lácticas y acéticas. Estas transformaciones están fuertemente influenciadas por variables físicas como la temperatura, la humedad y el pH, que requieren un control minucioso para garantizar la consistencia y la calidad del producto final [5] [6], y por ello el uso de tecnologías IoT resultan propicias para el monitoreo y control de estas variables.

Igual de importante es la acuicultura ya que, conforme se indica en el documento “Política Nacional de Pesca y Acuicultura, 2015 – 2030”, publicado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería de El Salvador [7], esta actividad contribuye a la seguridad alimentaria, genera ingresos y empleo en comunidades, y promueve la autosuficiencia económica. Además, es una fuente importante de alimento; aunado a lo anterior, reduce la presión sobre las poblaciones de peces silvestres y fomenta la organización y competitividad de las comunidades que dependen de esta actividad.

En cuanto al monitoreo meteorológico, en los últimos años se ha experimentado una evolución importante en las tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) y en los protocolos de comunicación inalámbrica, lo que ha facilitado el desarrollo de sistemas eficientes y rentables para el monitoreo ambiental. Estos avances son particularmente relevantes en la acuicultura y en los procesos de fermentación del cacao, donde las condiciones climáticas, como la temperatura ambiente, la humedad relativa, la radiación solar y la velocidad del viento, juegan un papel fundamental tanto en la salud, el crecimiento y la productividad de los organismos acuáticos, como en el desarrollo de los procesos físico-químicos al interior de cámaras fermentadores. En países

tropicales como El Salvador, la variabilidad atmosférica afecta directamente a los procesos agrícolas [8] [9].

Tecnologías de conectividad

Se evaluaron diferentes alternativas, tomando en cuenta los siguientes criterios:

- Disponibilidad en zonas rurales
- Cobertura
- Costo
- Facilidad de integración con otras tecnologías

Y en este análisis se consideraron opciones como: servicios LTE-M, redes WiFi y tecnologías LoRa. En lo que respecta a LTE-M, los principales operadores móviles en El Salvador (Claro, Tigo, Movistar, y Digicel) han estado enfocándose en la expansión y mejora de sus redes 4G LTE y en la preparación para el 5G. Si bien se publicita (por parte de los operadores) una cobertura LTE significativa en el territorio, es notoria la ausencia de anuncios específicos para LTE-M, a pesar de la disponibilidad en nuestro medio de dispositivos compatibles con LTE-M o NB-IoT.

En el mismo orden, la conectividad WiFi es una alternativa de uso muy limitado en el entorno rural de nuestro país, por sus características de propagación o cobertura. Por lo anterior, la evaluación se centró en la tecnología LoRa.

LoRa® (o Long Range) hace referencia a tecnologías de comunicación inalámbricas de largo alcance (hasta 15 kilómetros en determinadas condiciones); operan a baja potencia, utilizando canales de radio que operan en una banda de frecuencias de uso libre (es decir, que no requiere concesión o licencia de uso). Por sus características de propagación, son ideales para enlaces de datos a largas distancias. Utilizan técnicas de modulación de espectro ensanchado (o Spread Spectrum) y además emplean el protocolo de redes LoRaWAN® (Long Range Wide Area Network) (LoRa Alliance®, 2025). Su bajo consumo energético, funcionamiento en bandas de frecuencia de uso libre, y su alcance, las vuelven una opción adecuada para implementar redes de comunicaciones en entornos remotos [10].

LoRa® opera en bandas de frecuencia que dependen de la zona geográfica en la cual se usen. En El Salvador, estas frecuencias se agrupan en la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical) de 902MHz a 928MHz [11]. Estas frecuencias son propicias para el entorno rural salvadoreño, y dado que estos sistemas operan con una potencia muy baja, su funcionamiento con sistemas de baterías se facilita. Además, por el tipo de modulación que usan, permiten recibir señales de muy bajo nivel, incluso por debajo del piso de ruido.

Dado que los factores más importantes que afectan el alcance de sistemas inalámbricos [12] son :

- Longitud de trayectos (perdidas de propagación)
- Frecuencia de operación
- Obstáculos (vegetación, montañas, edificios).

- Fenómenos meteorológicos (atenuación por lluvia, despolarización, desvanecimientos, etc.).
- Interferencias electromagnéticas (generadas por dispositivos operando en la misma banda de frecuencias).

LoRa ofrece diversas formas de ajustar sus características de transmisión para reducir el impacto de estos factores, entre lo cual destaca el “Factor de Propagación”, el factor de “Tasa de transferencia de datos” y la “Sensibilidad” (o el nivel de señal más pequeña que puede procesar). Diversas combinaciones de estos parámetros se muestran en la **Tabla 1**.

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. Obtenido de [13]

Estos factores permitieron adaptarse a los diferentes entornos de aplicación que fueron considerados en el presente estudio, lo que facilitó optimizar la cobertura y la disponibilidad de los prototipos propuestos.

Internet de las cosas (IoT): conceptos y características

Este término se refiere a un conjunto o red de dispositivos conectados y a la tecnología que facilita dicha comunicación entre estos dispositivos y servidores en la nube, así como entre los propios dispositivos [14]. El término 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.

En los últimos años la implementación de soluciones a diversas problemáticas, basadas en tecnologías IoT, ha tenido un marcado crecimiento debido a razones tales como:

- Desarrollo de sensores miniaturizados
- Expansión de redes inalámbricas
- Capacidades de procesamiento en la nube
- Avances en inteligencia artificial

Por lo general estas soluciones, toman en cuenta los siguientes componentes [15]:

- Procesador-controlador de sensores remotos
- Sensores
- Tecnologías de comunicación
- Conectividad a Internet (Gateway)
- Almacenamiento-procesamiento y presentación de datos

En el CAPITULO II, se describen los dispositivos específicos utilizados en este proyecto.

Control de calidad del Agua en Acuicultura

La acuicultura se relaciona con las técnicas para fomentar la cría de organismos acuáticos en ambientes controlados. Es una forma de producción de alimentos que se lleva a cabo en estanques y otros medios artificiales [16].

Esta actividad se ve influenciada por factores climáticos propios del entorno en el cual se realiza, así como por factores físico-químicos del sistema cerrado que contiene las especies de interés (temperatura del agua, oxígeno disuelto, pH, turbidez, etc.) [17]. Cuando se aplica a la crianza de peces, la calidad del agua es fundamental para garantizar la supervivencia y crecimiento de estos.

De lo anterior se desprenden los parámetros físico-químicos de interés para el prototipo a implementar y en nuestro caso, se han considerado los siguientes:

- Cantidad de sólidos suspendidos en el agua (tipo de sensor: Turbidímetro)
- Oxígeno disuelto en agua (sensor de oxígeno)
- Acidez o alcalinidad del agua (sensor de pH)
- Temperatura

Proceso de fermentación del Cacao

A diferencia de la estación meteorológica, abordar aplicaciones IoT para el proceso de fermentación del cacao, requirió profundizar en algunos aspectos netamente agrícolas, por ejemplo, el hecho de que la fermentación del cacao es un proceso influenciado por las propiedades fisicoquímicas del mucílago que rodea los granos. El mucílago es la pulpa blanca que rodea estos

granos [18]. La variabilidad en estas características se asocia con los distintos tipos genéticos de cacao. Las principales variedades fenotípicas incluyen el cacao criollo, forastero y trinitario, cada una con perfiles distintivos. Asimismo, Castro et al., [19] indica que “el cacao criollo es valorado por su calidad superior, sus sabores agradables y aroma e. En contraste, el cacao forastero posee una calidad organoléptica inferior, aunque exhibe mayor robustez agronómica. Por último, el cacao trinitario es un híbrido resultante del cruzamiento entre las variedades criolla y forastera, a menudo logrado mediante selección asistida para combinar características deseables de ambos parentales”. Por ende, existen diferencias significativas entre los tipos de cacao.

Así mismo, otro factor importante es el método de fermentación, de los cuales podemos mencionar:

- Fermentación en sacos

Emplea sacos de polietileno o yute, en donde se colocan los granos, se cierran y se cubren con plástico u hojas de banano para conservar la temperatura que se genera al interior de los granos. En todos los casos es vital realizar procedimientos de volteo.

- Fermentación en Montón

Consiste en colocar los granos de cacao encima de un tendedero, ya sea de hojas de plátano, esteras de madera que tengan espacios suficientes para el vertimiento del mucílago y después se cubre con plástico o también con hojas de plátano. Se busca evitar una fuga de calor y también facilitar el drenaje del exudado. No se colocan expuestos directamente al sol.

- Fermentación en Cajón

Los granos de cacao son colocados en una caja de madera con aberturas de entre 5 y 10 mm para lograr la entrada de aire a la masa de granos, esto durante un periodo de 5 días. Se pueden cubrir las cajas con hojas de plátano o costales de yute, para mantener conservado el calor y humedad.

En este método puede afectar la profundidad de la masa de los granos (que debe tener un espesor mínimo de 20 cm, además de la duración de la fermentación, ya que suele variar dependiendo el tipo de grano [20]).

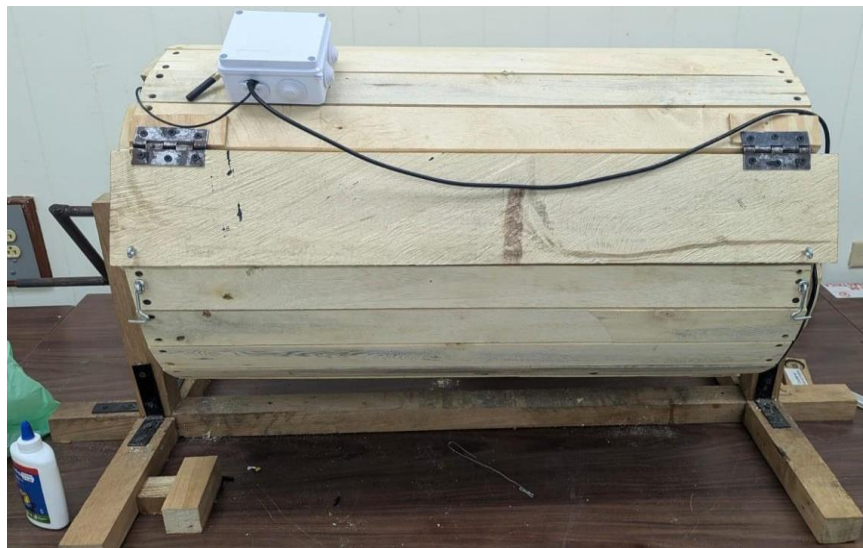
- Fermentación en Tambor Rotatorio

El tambor rotatorio consiste en un cilindro de madera con dos tapas, ver **Figura 1**, una hermética que permite la fermentación anaeróbica y otra tapa con rejillas que permite el paso de aire para la fermentación acética, también tiene una manivela con la cual se puede realizar la rotación, González et al., [21].

Así mismo sugiere que el fermentador debe estar soportado por una base que permita que se encuentre levantado del suelo y que el contenedor se cargue (al menos) hasta el 50% de su capacidad. Este tipo de contenedores permite que los volteos se realicen mediante la rotación del tambor, cada vez que las condiciones internas lo requieran. Este método fue el elegido, en conjunto con el Ing. Agr. Erick Christopher Guardado Derás, quien brindó apoyo en esta parte de la investigación, y además fue parte interesada en los resultados de la misma.

Figura 1

Prototipo de fermentador tipo tambor giratorio, utilizado en este proyecto



Nota. El prototipo fue construido en la Facultad de Ciencias Agronómicas (Guardado Deras, 2024)

En este trabajo se utilizó cacao tipo criollo, el cual proviene de los Departamentos de Usulután y Santa Ana. Es oportuno mencionar que el acceso a este producto es limitado, dado su valor de mercado y por ello solo fue posible obtener alrededor de 200 mazorcas, y dicha cantidad no permitió cumplir el requisito de llenado para el tambor (al menos un 50%), no obstante, esta cantidad permitió verificar el funcionamiento del prototipo, recopilar datos y validar metodologías de análisis del proceso.

En cuanto al comportamiento esperado de las variables bajo estudio, la **Tabla 2** muestra los valores de variación estándar para el cacao tipo criollo.

Tabla 2

Parámetros estándar de fermentación para cacao tipo criollo

Parámetro	Valor típico	Rango observado
Duración de la fermentación	5 - 7 días	4 - 8 días
Temperatura máx. interna	45 - 50 °C	40 - 55 °C
pH	5.5 inicial → 4.5 final	4.0 - 5.5 final
% de Humedad	6 - 8 %	5 - 10 %
Cantidad de volteos	3 - 5 veces	Según duración de fermentación

Nota. Fuentes consultadas (CENTA, 2021) y (Erazo et al. 2019, [22])

Metodología de Investigación y Metodología de Diseño de Prototipos

En el presente estudio, se utilizó la Metodología de Investigación Mixta, dado que esta permite combinar elementos de la investigación cuantitativa y cualitativa en un solo estudio. Este enfoque permite aprovechar las fortalezas de ambos métodos y, por tanto, obtener una comprensión más completa y profunda del fenómeno que están investigando. En ese sentido, se llevaron a cabo entrevistas con diversos especialistas en los campos de interés: procesamiento de cacao, acuicultura y monitoreo de variables climáticas. Así mismo, utilizando prototipos, se recopilaron datos que permitieron analizar estadísticamente (frecuencias, correlaciones, causas, etc.) el comportamiento de las variables de interés, como se explicará en el Capítulo de Resultados.

En cuanto a la metodología de diseño de los prototipos considerados, esta se basó en lo sugerido en el libro: “Internet of Things: A Hands-on Approach”, de Arshdeep Bahga y Vijay Madisetti [23]

De acuerdo a estos autores, la metodología de diseño de sistemas IoT contempla diez pasos estructurados:

1. Propósito y especificación de requisitos: Definir claramente el propósito del sistema, su comportamiento y los requisitos de recolección de datos, análisis, seguridad e interfaz de usuario.
2. Especificación del proceso (Casos de uso): Describir formalmente los casos de uso del sistema IoT, derivados de los requisitos y propósitos iniciales.
3. Especificación del modelo de dominio: Definir un modelo abstracto que describa los conceptos clave, personas, objetos y entidades que conforman el dominio del sistema IoT, así como sus atributos y relaciones, independientemente de la tecnología.
4. Especificación del modelo de información: Detallar la estructura de la información y los datos dentro del dominio, incluyendo atributos y relaciones específicas para su implementación.
5. Especificación de servicios: Definir los servicios que el sistema IoT proporcionará para interactuar con los datos y el dominio, especificando sus interfaces, entradas y salidas.
6. Especificación del nivel de IoT: Determinar el nivel de despliegue del sistema (ej. Nivel 1 - sensor único y aplicación en la nube, Nivel 2, etc.) que mejor se adapte a los requisitos definidos.
7. Especificación de la vista funcional: Describir los componentes funcionales del sistema (ej. dispositivos, comunicación, servicios, seguridad) y cómo interactúan entre sí.

8. Especificación de la vista operacional: Definir los detalles operacionales, como la infraestructura de red, las opciones de conectividad (ej. Wi-Fi, celular), las consideraciones de implementación física y los entornos de desarrollo/prueba.
9. Integración de dispositivos y componentes: Integrar físicamente los dispositivos, sensores y componentes de software para que el sistema funcione como un todo cohesivo.
10. Desarrollo de la aplicación: Crear la aplicación final o la interfaz de usuario que permita a los usuarios interactuar con el sistema y visualizar los datos.

Esta metodología, se tomó de base para la propuesta de los prototipos descritos más adelante.

CAPITULO II: Diseño del Sistema

Definición de requisitos.

El sistema propuesto debe cumplir con los siguientes requisitos de diseño:

- Obtener mediciones periódicas de parámetros de interés para la agricultura como podrían ser temperatura y humedad relativa del ambiente, pH u oxígeno disuelto en el agua, etc.
- Transmitir la información desde el lugar de recolección hacia una plataforma en la nube donde será almacenada.
- Permitir la observación en tiempo real e historial los parámetros monitoreados mediante una interfaz gráfica.
- Permitir extracción de los datos almacenados en algún formato estándar para procesamiento con herramientas externas.
- La recolección de datos se realizará en zonas rurales adonde posiblemente no se cuente con cobertura de redes de telefonía móviles ni energía comercial. Por lo que los dispositivos deben operar con baterías y cargar dichas baterías con un tipo energía renovable como la solar o eólica y utilizar radiotransmisores para enviar la información a un sitio con acceso a internet.

Casos de Uso

Se identificaron 2 casos de uso los cuales se describen a continuación:

- Monitoreo de fermentación de Cacao: Consiste en registrar las variaciones de temperatura, humedad y pH durante el proceso de fermentación de la pulpa de cacao.

- Monitoreo de estanques de piscicultura. Consiste en registrar el comportamiento de parámetros ambientales dentro y fuera del estanque y parámetros de calidad del agua. Este a su vez se puede subdividir en:
 - Monitoreo de condiciones ambientales: Se encarga de supervisar las condiciones que rodean al estanque (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, intensidad de luz solar).
 - Monitoreo de calidad de agua: Se encarga de supervisar los parámetros propios del agua del estanque (temperatura, turbidez, oxígeno disuelto, pH).

Arquitectura de sistema.

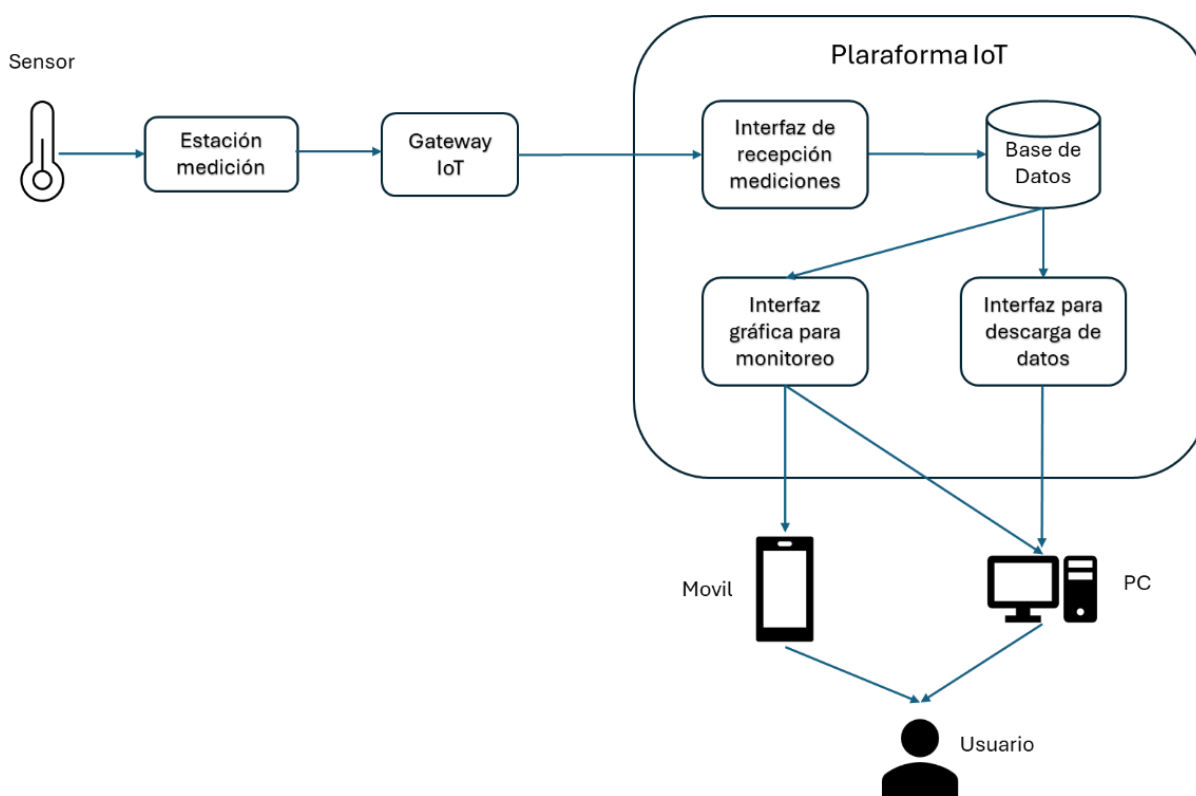
En la **Figura 2** se muestra el diagrama de la arquitectura del sistema y la interacción entre los diferentes componentes:

- Sensor: convierte magnitudes físicas a corriente eléctrica para que pueda ser cuantificado por la estación de medición.
- Estación de medición: Lee los sensores y transmite los resultados hacia la plataforma IoT mpor medio del Gateway IoT.
- Gateway IoT: recibe transmisiones de las estaciones de medición y las reenvía hacia la plataforma IoT.
- Plataforma IoT: recibe transmisiones de las estaciones de medición y almacena la información en su base de datos. Presenta la información en tiempo real o histórica al usuario por medio de su interfaz gráfica. Provee un medio para que el

usuario descargue la información de las diferentes magnitudes físicas registradas en su base de datos.

Figura 2

Diagrama de arquitectura del sistema



Nota: Elaboración propia

Especificación de procesos

Piscicultura

Para cubrir las necesidades que presenta el monitoreo de los estanques de piscicultura se van a desarrollar 3 prototipos:

- Estación de monitoreo ambiental.
- Estación de monitoreo de calidad del agua.
- Gateway IoT.

Transmisión de datos. En lugares rurales, normalmente no se dispone de cobertura de red de telefonía móvil y es por ello que se utilizan radios con modulación LoRA para transmitir la información desde las estaciones de medición hacia el Gateway IoT. Este último estará instalado en una caseta que cuenta con energía comercial y acceso a internet. En el sitio de prueba la distancia entre transmisor y receptor es de 100 metros. Según las hojas de especificación de los radios usados la distancia máxima de transmisión es de 10km, aunque eso depende mucho de las condiciones del terreno y de los posibles obstáculos entre el transmisor y receptor. El Gateway IoT recibirá las transmisiones de radio enviadas desde las estaciones de medición y retransmitirá hacia la plataforma IoT mediante la conexión a internet disponible utilizando el protocolo MQTT.

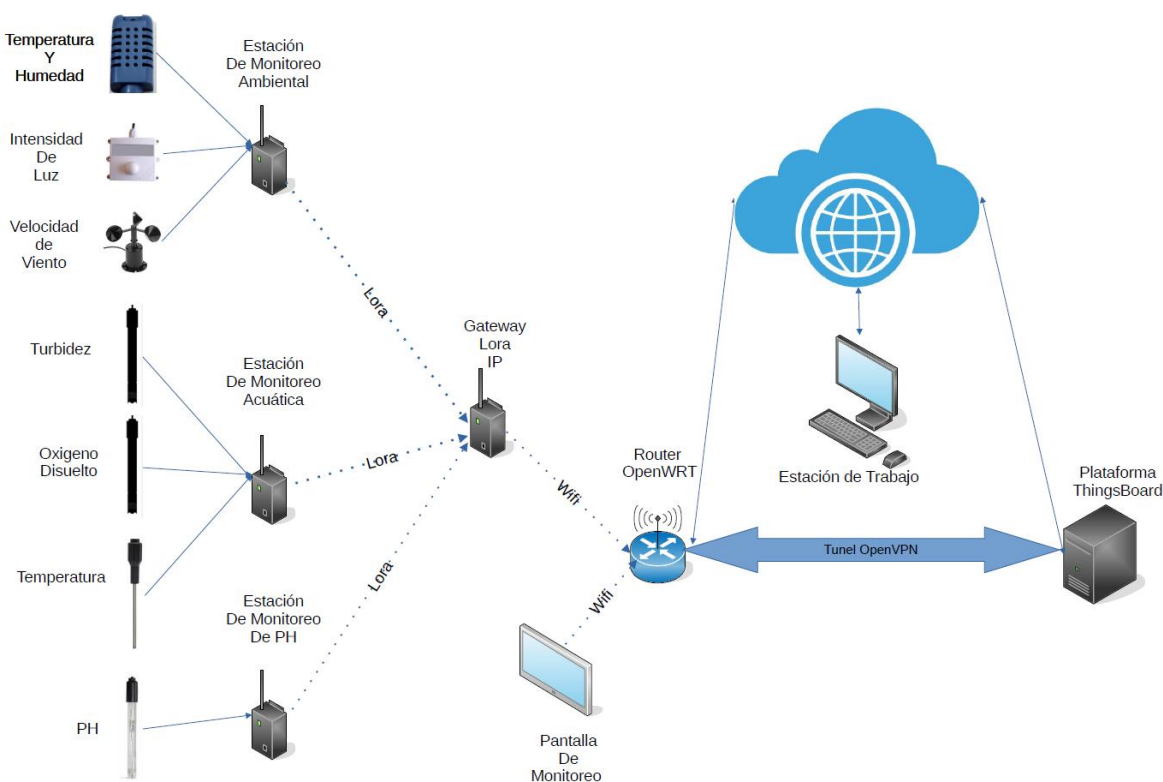
Seguridad. El sitio de prueba está dentro del campo de la UES, específicamente en la escuela de Biología y se aprovecha el acceso a internet provisto por dicha escuela en la caseta en la que está instalado el Gateway IoT. Debido a restricciones impuestas por la administración por motivos de seguridad, solamente se tiene permitido conexiones HTTP/HTTPS hacia servidores

externos. La plataforma IoT está instalada en una nube pública fuera de la universidad y por lo tanto no es posible enviar los datos usando MQTT. Para solucionar este inconveniente, se habilitará un túnel VPN entre la plataforma IoT y la caseta en la que está alojado el gateway IoT. Esto tiene como ventaja adicional, incrementar la seguridad de la transmisión de datos a través de internet.

La figura **Figura 3**, muestra el diagrama de bloques del sistema utilizado para el monitoreo de los estanques de piscicultura.

Figura 3

Diagrama de bloques de sistema de monitoreo de estanques de piscicultura



Nota: Elaboración propia con LibreOffice Draw

Fermentación de Cacao:

Para cubrir las necesidades que presenta el monitoreo de la fermentación de cacao se van a desarrollar 2 prototipos:

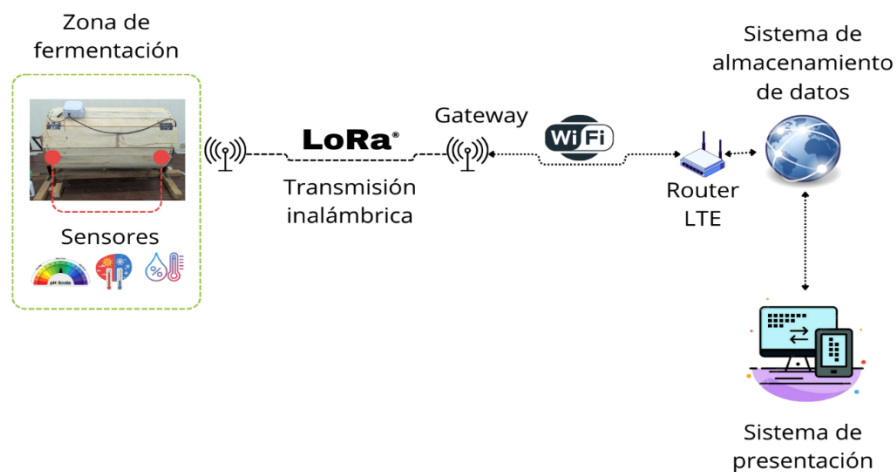
- Estación de monitoreo en la tómbola de fermentación.
- Gateway IoT.

Transmisión de datos. Por razones similares a las del caso de uso de piscicultura, se utilizan radios con modulación LoRA para transmitir la información desde las estaciones de medición hacia el Gateway IoT. El Gateway IoT recibirá las transmisiones de radio enviadas desde las estaciones de medición y retransmitirá hacia la plataforma IoT mediante la conexión a internet que provee un modem móvil LTE utilizando el protocolo MQTT.

La **Figura 4** muestra el diagrama de bloques propuesto para el monitoreo de la fermentación de cacao.

Figura 4

Diagrama en bloques del sistema IoT propuesto para el monitoreo del proceso de fermentación del cacao



Nota. Elaboración propia en (Canva, n.d.) con imágenes adaptadas de (iStockphoto LP, n.d.), (Freepik, n.d.) y (Pngtree, n.d.)

Sensores y calibración.

Los sensores utilizados dependían del proceso a monitorear, su infraestructura y sitio de ubicación; así mismo, algunos de los sensores utilizados podían utilizarse directamente y otros, requirieron de calibración previo a su uso, para garantizar de mejor manera, la validez de los datos obtenidos.

Componentes principales de los prototipos propuestos

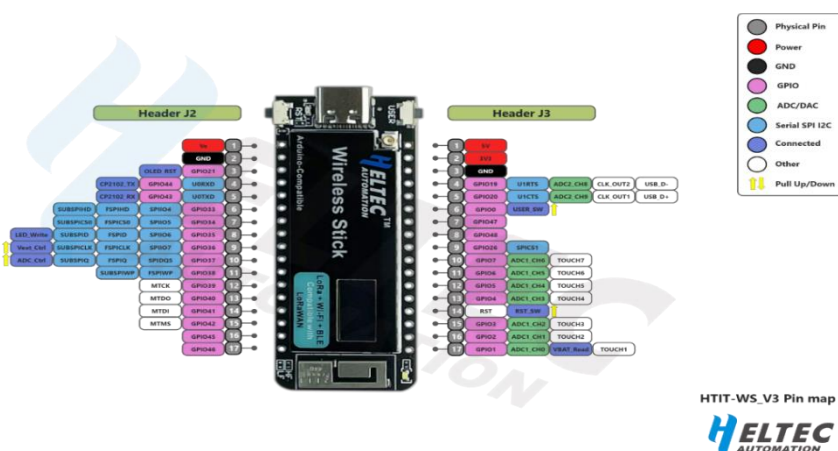
Algunos componentes seleccionados fueron comunes a todos los sistemas propuestos y otros fueron específicos para las diversas aplicaciones, lo que se detalla a continuación.

Tarjetas de desarrollo de microcontroladores con radios LoRa incorporados

En todos los casos, se utilizaron tarjetas de desarrollo que cuentan con un microcontrolador ESP32 y un radio LoRa SX1276/ SX1262, como dispositivo controlador de sensores, y gateway IoT, similar a las mostradas en las **Figura 5** y **Figura 6**.

Figura 5

Imagen del dispositivo ESP32 usado como nodo IoT



Nota. La figura muestra el diagrama de pines del microprocesador ESP32 usado como nodo IoT. Tomado de (Heltec Automation, 2023b)

Figura 6

Imagen del dispositivo ESP32 usado como nodo IoT



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

La descripción técnica de este dispositivo se muestra en la **Tabla 3**.

Tabla 3

Descripción técnica ESP32

Características	Heltec WiFi LoRa 32 V1	Heltec Wireless Stick V3
Microcontrolador	ESP32 (2 núcleos, Wi-Fi, Bluetooth integrado)	ESP32 (2 núcleos, Wi-Fi, Bluetooth integrado)
Chip LoRa	SX1276	SX1262
Factor de forma	Largo, compatibilidad con protoboard	Compacto
Pantalla OLED	128x64 pixeles	64x32 pixeles
Antena	Integrada (reemplazable)	Integrada (no reemplazable)

Batería (conexión)	Puerto BMS integrado	Puerto BMS integrado
Configuración	Puerto micro-USB	Puerto USB-C
Enfoque	Prototipos, desarrollo	Proyectos compactos

Nota. Información tomada de (Heltec Automation, 2023a) y (Heltec Automation, 2023b)

Sensores Estación Ambiental.

La estación se equipó con los sensores siguientes:

- Humedad relativa
- Temperatura ambiente
- Velocidad de viento
- Cantidad de luz solar en el sitio de interés

Y para las pruebas funcionales, esta estación se instaló en el complejo de estanques de piscicultura de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática de la Universidad de El Salvador

La **Figura 7** muestra el sitio en el cual se instaló esta estación de monitoreo

Figura 7

Imagen del sitio de instalación de la estación meteorológica



Nota. Fotografía del sitio. Elaboración propia

Temperatura y Humedad. Como sensor de estos parámetros, se utilizó el dispositivo DTH22, similar al mostrado en la **Figura 8**, y sus características técnicas se detallan en la **Tabla 4**.

Este dispositivo no requiere calibración previa a su uso

Figura 8

Sensor de Temperatura y Humedad DTH22



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

Tabla 4

Características principales del DHT22

Características	Descripción
Medición de temperatura	Rango de -40°C a 80°C con una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
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

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 DTH22. Datos extraídos de (Naylamp Mechatronics, s.f.)

Velocidad de viento. El dispositivo utilizado fue el CALT YGC-F5-5V-V, el cual es un sensor de velocidad del viento diseñado para aplicaciones IoT. La **Figura 9** muestra una imagen de este dispositivo y la **Tabla 5** sus especificaciones funcionales

Figura 9

Anemómetro YGC-F5-5V-V



Nota. Figura tomada 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.
Rango de medición	Capaz de medir velocidades de viento desde 0 hasta 45 m/s.
Precisión	± 0.3 m/s para velocidades inferiores a 5 m/s y $\pm 3\%$ para velocidades superiores a 5 m/s.
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.

Nota. Datos extraídos de ([Amazon, s.f.](#))

Sensor de intensidad de luz BH1750. Este es un sensor de intensidad de luz, adecuado para medir la cantidad de luz ambiental en su entorno. Tiene buena precisión y no requiere de componentes adicionales para su uso, ni procesos de calibración. Emplea una interfaz I2C para la comunicación de datos.

La **Figura 10** muestra una imagen de este dispositivo y la **Tabla 6** sus especificaciones técnicas.

Figura 10
Sensor de Intensidad de Luz BH1750



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

Tabla 6

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	Resolución de hasta 1 lux.
Salida digital I2C	Utiliza comunicación I2C, lo que facilita la integración con microcontroladores
Alimentación	Funciona con un voltaje de 3V a 5V
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 ([Mactrónica](#), s.f.)

Finalmente, las **Figura 11** y **Figura 12**, muestran el prototipo completamente armado y la estructura en la cual se montó para las pruebas funcionales correspondientes.

Figura 11

Prototipo de estación meteorológica armado en su totalidad



Nota. Fotografía del prototipo armado. Elaboración propia

Figura 12

Estructura de montaje de la estación meteorológica



Nota. Fotografía de la estructura de montaje. Elaboración propia

Sensores para fermentación de Cacao

Sensores Utilizados. Para esta aplicación, se utilizaron dos tipos:

- Sensor de temperatura y humedad – FS400
- Sensor de PH: PH4502C

La **Figura 13**, muestra el sensor FS400 y la **Figura 14** el sensor PH4502C. Las especificaciones técnicas se muestran en la **Tabla 7**.

Figura 13

Sensor de Temperatura y Humedad FS400-SHT30



Nota: Imagen recuperada de (Amazon, n.d.)

Figura 14

Sensor de PH, modelo PH4502C



Nota: Imagen recuperada de (UNIT Electronics, n.d.)

Tabla 7

Características de los sensores de temperatura y humedad (FS400), y pH (PH4502C)

Sensor	Modelo	Características
pH	4502C	Rango de medición: 0 a 14 Precisión: ± 0.1 (a 25°C) Voltaje de operación: 5V ± 0.2 V Corriente de operación: ~5-10mA (tomado de wiki.dfrobot.com)
Temperatura	FS400	Rango de medición: -40°C a 125°C Precisión: ± 0.2 °C Voltaje de operación: 2.4V - 5.5V Corriente de operación: ~1.5mA (tomado de sensirion.com)
Humedad	FS400	Rango de medición: 0% a 100% HR Precisión: ± 2 HR Voltaje de operación: 2.4V - 5.5V Corriente de operación: ~1.5mA (tomado de sensirion.com)

Nota: Tomado de (DFRobot, n.d.) y (Sensirion AG, n.d.).

Calibración

El sensor de temperatura y humedad – FS400, no requirió calibración y podía utilizarse directamente en la aplicación, no obstante, para comprobar la exactitud de su información, se comparó las lecturas proporcionadas por éste con las obtenidas por medio de un sensor de precisión Omega HH414, disponible en la EIE (ver **Figura 15**). Los datos obtenidos fueron muy similares (aunque es importante señalar que el sensor Omega HH414 no cuenta con certificado de calibración actualizado). La **Tabla 8** muestra algunos datos de comparación entre estos dos sensores.

Figura 15

Sensor de Temperatura Omega HH414



Nota. Fotografía del sensor Omega. Tomada durante las pruebas (elaboración propia)

Tabla 8
Comparación de lecturas de temperatura

Hora	Sensor de precisión HH414	Sensor en tómbola FS400
11:15	39.7	40.06
11:30	39.3	40.06
11:45	39.4	40.06
12:00	39.3	40.06
12:15	39.3	40.06
12:30	39.4	40.13
12:45	39.3	40.19
13:00	39.3	40.19
13:15	39.4	40.25
13:30	39.4	40.44

Nota: Elaboración propia, con Microsoft Excel 2016

En cuanto al Sensor de pH, fue necesario realizar un proceso de calibración, usando sustancias patrón, con valor de pH conocido. En nuestro caso, se contó con el tipo de sustancias mostradas en la **Figura 16** y **Figura 17**

Figura 16

Sustancias patrón, para calibración del Sensor de pH

**Figura 17**

Sustancias patrón para calibración del Sensor de pH, en polvo



Nota: Las sustancias líquidas fueron proporcionadas por la Facultad de Agronomía de la Universidad de El Salvador. Imágenes de elaboración propia.

Sensores Estación de calidad del agua

Turbidímetro. RS-ZD-N01-1 (ver **Figura 18**) además, en la **Tabla 9**, se detallan sus especificaciones técnicas y en la **Tabla 10**, se describe la estructura de registros asociados a la información transmitida por este sensor.

Figura 18
Turbidímetro



Nota: Tomada de manual de sensor RS-ZD-N01-1 (<https://robu.in/wp-content/uploads/2024/06/20-220-RS-ZD-N01-1-Turbidity-transmitter-User-Manual.pdf>)

Tabla 9

Especificaciones sensor RS-ZD-N01-1

Características	Descripción
Rango de medición de luz	0-1000 NTU
Interfaz	RS485/ModBus-RTU
Método de fluorescencia	No consume oxígeno y no requiere electrolito
Voltaje de alimentación	10-30V

Nota: Tomada de manual de sensor RS-ZD-N01-1 (<https://robu.in/wp-content/uploads/2024/06/20-220-RS-ZD-N01-1-Turbidity-transmitter-User-Manual.pdf>)

Tabla 10

Registros Modbus de sensor RS-ZD-N01-1

Dirección de registro	Código de función soportada	Descripción
0x0000	0x03/0x04	Valor de turbidez NTU; entero sin signo 16 bits, valor real expandido 10 veces ; 50 NTU: valor real expandido 100 veces
0x0001	0x03/0x04	Temperatura °C; entero con signo de 16 bits, valor real expandido 10 veces
0x0050	0x03/0x04/ 0x06/0x10	Valor de desviación de turbidez entero sin signo de 16 bits, valor real expandido 10 veces; 50 NTU; El rango se amplía a partir del valor real 100 veces
0x0051	0x03/0x04/ 0x06/0x10	Valor de desviación de temperatura entero con signo de 16 bits, valor real expandido 10 veces
0x1010/0x1011	0x10	Calibración de turbidez Utilice una calibración de dos puntos: Escriba 0x0001 a 0x1010 y 0x0000 a 0x1011 para calibrar el punto cero Escriba 0x0002 a 0x1010 y 0x0001 a 0x1011 para calibrar el punto de escala completa
0x07D0	0x03/0x04/0x06 /0x10	Dirección de dispositivo: 1~254 Entero sin signo de 16 bits Valor predeterminado de fábrica 1
0x07D1	0x03/0x04/0x06 /0x10	Baud Rate: 0 representa 2400 1 representa 4800 2 representa 9600 3 representa 19200 4 representa 38400 5 representa 57600 6 representa 115200 7 representa 1200

Nota: Tomada de manual de sensor RS-ZD-N01-1 (<https://robu.in/wp-content/uploads/2024/06/20-220-RS-ZD-N01-1-Turbidity-transmitter-User-Manual.pdf>)

Estructura de la trama transmitida y recibida:

Trama enviada:

Código de dirección	Código de función	Dirección de registro	Contenido de registro	CRC bajo	CRC alto
0x01	0x03	0x00 0x00	0x00 0x02	0xc4	0x0b

Trama Recibida:

Código De Dirección	Código De Función	Número De Bytes Válidos	contenido De Registro	Código De Verificación Bajo	Código De Verificación Alto
0x01	0x03	0x04	0x0d 0x2e 0x00 0xdb	0xd8	0xcd

Sensor de Oxígeno Disuelto. RS-LDO-N01-1 (ver **Figura 19**, y sus características en la **Tabla 11**).

Figura 19

Sensor de Oxígeno disuelto: RS-LDO-N01-1



Nota: Tomada de manual de sensor RS-LDO-N01-1 (<https://robu.in/wp-content/uploads/2024/06/18-RS-LDO-N01-1-Dissolved-Oxygen-Transmitter-Instruction-Manual-1.pdf>)

Tabla 11

Especificaciones Sensor de Oxígeno disuelto: RS-LDO-N01-1

Características	Descripción
Rango de medición de luz	0-20 mg/L
Interfaz	RS485/ModBus-RTU
Método de fluorescencia	No consume oxígeno y no requiere electrolito
Voltaje de alimentación	10-30V

Nota: Tomada de manual de sensor RS-LDO-N01-1 (<https://robu.in/wp-content/uploads/2024/06/18-RS-LDO-N01-1-Dissolved-Oxygen-Transmitter-Instruction-Manual-1.pdf>)

La **Tabla 12**, proporciona información sobre la estructura de registros internos y la **Tabla 13**, la estructura de la trama de comunicación.

Tabla 12

Registros Modbus de sensor de RS-LDO-N01-1

Dirección de registro	Código de Función soportada	Descripción
0x0000,0x0001	0x03/0x04	Saturación de oxígeno disuelto %:extremo grande del número de punto flotante big endian
0x0002,0x0003	0x03/0x04	Concentración de oxígeno disuelto: mg/L: número de punto flotante big endian
0x0004,0x0005	0x03/0x04	Temperatura (°C: coma flotante big endian)
0x1010	0x06/0x10	Calibración Escriba 0x0001 para calibrar el punto cero Escriba 0x0002 para calibrar el punto de saturación al 100%
0x1020	0x03/0x04/0x06/0x10	Salinidad (‰: entero sin signo de 16 bits, predeterminado 0)
0x1022	0x03/0x04/0x06/0x10	Presión atmosférica kPa; entero sin signo de 16 bits Valor predeterminado 101,33

El valor se amplía 100 veces		
0x07D0	0x03/0x04/0x06 /0x10	Dirección de dispositivo: 1~254 Entero sin signo de 16 bits Valor predeterminado de fábrica 1
0x07D1	0x03/0x04/0x06 /0x10	Baud Rate: 0 representa 2400 1 representa 4800 2 representa 9600 3 representa 19200 4 representa 38400 5 representa 57600 6 representa 115200 7 representa 1200

Nota: Tomada de manual de sensor RS-LDO-N01-1 (<https://robu.in/wp-content/uploads/2024/06/18-RS-LDO-N01-1-Dissolved-Oxygen-Transmitter-Instruction-Manual-1.pdf>)

Tabla 13

Trama enviada por el *sensor de RS-LDO-N01-1*

Código	Código	Dirección	Contenido	CRC	CRC
De	De	De	De	Bajo	Alto
Dirección	Función	Registro	Registro		
0x01	0x03	0x00 0x00	0x00 0x06	0xc5	0xc8

Trama de respuesta:

Código	Código	Número	Contenido	CRC	CRC
De	De	De	De	Bajo	Alto
Dirección	Función	Bytes	Registros		
Válidos					
0x01	0x03	0x0c	0x3f 0x6a 0xeb 0x52 0x40 0xe2 0x48 0xb0 0x41 0xe5 0x85 0xc5	0xa7	0x49

Nota: Tomada de manual de sensor RS-LDO-N01-1 (<https://robu.in/wp-content/uploads/2024/06/18-RS-LDO-N01-1-Dissolved-Oxygen-Transmitter-Instruction-Manual-1.pdf>)

El valor número de coma flotante Big Endian de 3f 6a eb 52 es 0.917653, lo que indica una saturación de oxígeno disuelto del 91.8 %.

El valor número de coma flotante Big Endian de 40 e2 48 b0 es 7.071373, lo que indica una concentración de oxígeno disuelto de 7.07 mg/L.

El valor número de coma flotante Big Endian de 41 e5 85 c5 es 28.690317, lo que indica una temperatura de 28.7 °C.

Sensor de pH: como sensor de pH, se utilizó el mismo modelo descrito en la **Figura 14** y **Tabla 7**.

Sensor de temperatura: se utilizó el modelo DS18B20, mismo que se muestra en la **Figura 20**, y sus características se detallan en la **Tabla 14**

Figura 20

Sensor DS18B20



Nota: Tomado de (Sitio web de Amazon)

Tabla 14

Especificaciones Sensor DS18B20

Características	Descripción
Rango de medición	-55°C a 125°C
Interfaz	1 Wire
Resolución	9 a 12 bits ajustables

Nota: Tomado de (Sitio web de Amazon)

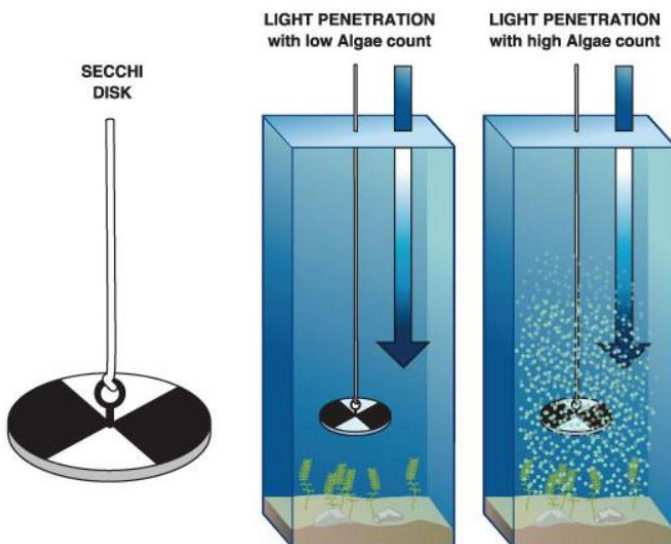
Calibración. Para esta aplicación, fue necesario desarrollar los procesos de calibración más complejos, para adaptar el funcionamiento de los sensores, a las metodologías usadas por los acuicultores.

El caso más significativo fue el asociado al sensor de turbidez del agua; esta es una propiedad óptica que describe la falta de claridad o transparencia de un líquido. Esencialmente, es la medida de la opacidad causada por la presencia de partículas microscópicas suspendidas que no se disuelven [24]. Estas partículas dispersan y absorben la luz en lugar de permitir que pase directamente, haciendo que el agua se vea turbia, lechosa u oscura. Una forma económica de comprobar el grado de turbidez del agua, es usando un disco Secchi, el cual es una herramienta simple y estandarizada en biología marina para medir la transparencia del agua; indica la turbidez y la penetración de la luz [25]. El usuario, básicamente mide subjetivamente, la profundidad hasta la cual puede observar el disco bicolor y esa medida de profundidad, es su referencia de turbidez.

La **Figura 21**, muestra una imagen y ejemplo de uso de este disco.

Figura 21

Disco SECCHI y ejemplos de uso



Nota: Imagen tomado de [27]

Ahora bien, para automatizar esta medición, fue necesario instalar un turbidímetro y este dispositivo proporciona medidas en unidades de NTU (Unidad Nefelométrica de Turbidez). La NTU mide la cantidad de luz dispersada por las partículas suspendidas en una muestra de agua [26]. Y para homologar la información proporcionada por el turbidímetro, con su equivalente a profundidad Secchi, fue necesario realizar un proceso de correlación de datos.

El método se describe a continuación:

En el estanque descrito en la **Figura 7**, se tomaron datos en distintos puntos y en cada uno de ellos, se registró tanto la lectura del disco Secchi como la lectura del turbidímetro (ver **Figura 22** y **Figura 23**). Una vez registrada esta información, se generó una tabla de datos (ver **Tabla 15**).

Figura 22

Medición de turbidez con disco SECCHI



Nota: Imagen del sitio de prueba (elaboración propia)

Figura 23

Medición de turbidez con turbidímetro



Nota: Imagen del sitio de prueba (elaboración propia)

Tabla 15

Ejemplo de lecturas: Disco Secchi-Turbidímetro

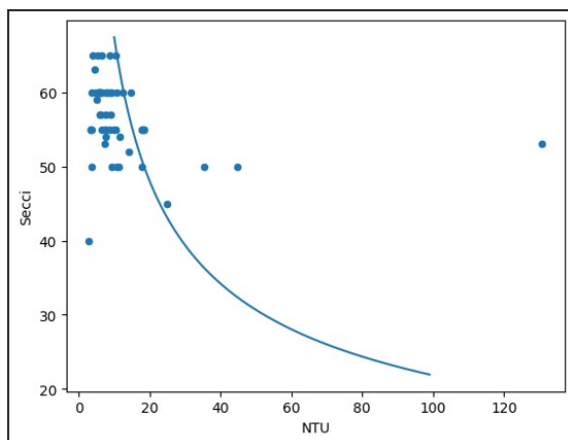
Distancia al borde (metros)	Lectura Secchi (cms) (Centímetros)	Turbimetro (NTU)
	Día 1	
1	50	35.5
2	53	130.8
3	45	24.8
4	52	14.2
5	50	10.8
6	50	17.7
7	55	18.4
8	65	8.6
9	60	9.3
10	65	10.3
11	55	7.3
12	60	5.9
13	60	6.3
14	60	5.6

Nota: Tabla elaborada en Microsoft Excel 2016

A partir de los datos anteriores, se generó la curva de correlación respectiva, como se muestra en la **Figura 24**

Figura 24

Curva de relación entre datos Secchi y turbidímetro



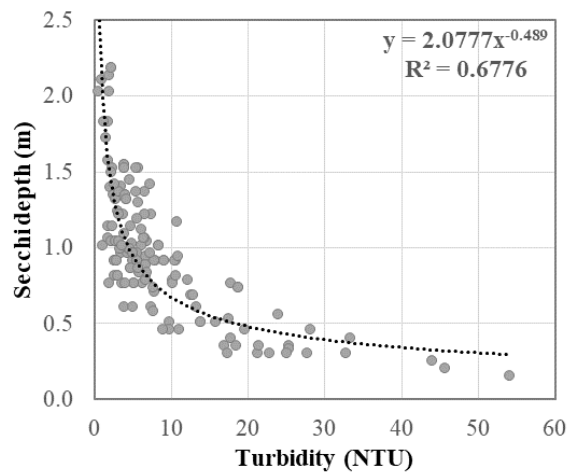
Nota: Gráfica generada con Python

Es oportuno señalar que los datos recabados fueron pocos, con lo cual asegurar una correlación precisa no es correcto, sin embargo, otros estudios similares [24] han recopilado mucha más información y sus resultados muestran un comportamiento similar, como se observa en la

Figura 25.

Figura 25

Curva de relación entre datos Secchi y Turbidimetro



Nota: Gráfica tomada de [24]

Por lo anterior, esta ecuación derivada de esta gráfica, fue la que se utilizó para ajustar las lecturas del turbidímetro de la estación, de modo que también pudiese proporcionar información equivalente al dato de disco Secchi.

Ecuación de correlación utilizada:

$$y = 2.0777x^{-0.489}$$

En cuanto a la calibración del Sensor de Oxígeno Disuelto: RS-ZD-N01, el procedimiento fue similar a la calibración del sensor de pH, es decir, se utilizó una sustancia patrón para ajustar los resultados de esta variable. La **Figura 26** muestra la sustancia utilizada.

Figura 26

Sustancia patrón, utilizada para calibrar el sensor de oxígeno disuelto



Nota: Imagen obtenida localmente, elaboración propia

Plataforma IoT

Como plataforma IoT se utilizó ThingsBoard®. ThingsBoard® es una plataforma de IoT de código abierto adecuado para desarrollo, gestión y escalado de proyectos de IoT. Permite la conectividad de dispositivos mediante los protocolos IoT estándar de la industria (MQTT, CoAP y HTTP). Está disponible como software como servicio (SaaS) o para instalación en servicios de infraestructura en la nube (IaaS) o en premisa (on-premise). Existe una versión de paga llamada Edición Profesional (PE) o una gratuita llamada Edición Comunitaria(CE)[28].

Características:

Recopilación de datos de telemetría. Permite recopilar datos desde diferentes dispositivos (Telemetría) y acceder a ellos mediante paneles personalizables o mediante una API.

Visualización de datos: Incluye más de 30 widgets configurables, por ejemplo, gráficos de líneas, indicadores digitales y analógicos y mapas. Permite crear nuevos con el editor integrado.

Escalabilidad horizontal: Permite instalar en modo cluster y agregar o eliminar instancias lo cual aumenta o disminuye la cantidad de solicitudes y dispositivos que puede manejar.

Motor de reglas de IoT: Procesa los datos entrantes de los dispositivos con cadenas de reglas flexibles basadas en atributos de entidad o contenido de mensajes.

Personalización e integración: Amplíe la funcionalidad predeterminada de la plataforma mediante cadenas de reglas, widgets e implementaciones de transporte personalizables. Además de la compatibilidad con MQTT, CoAP y HTTP, los usuarios de ThingsBoard® pueden usar sus propias implementaciones de transporte o personalizar el comportamiento de los protocolos

existentes. También puede aprovechar nuestros servicios de desarrollo de IoT para crear soluciones a medida.

Administración de dispositivos: Permite registrar y administrar dispositivos. Facilita la supervisión de los atributos de los dispositivos del lado del cliente y aprovisionar los del lado del servidor. Proporciona una API para que las aplicaciones del lado del servidor envíen comandos RPC a los dispositivos y viceversa.

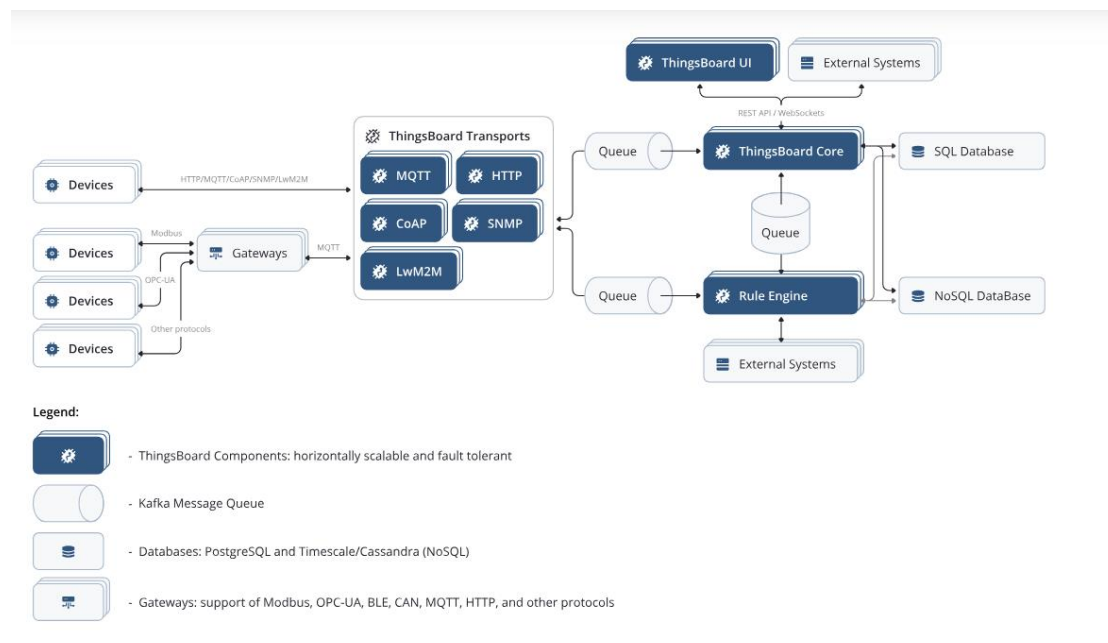
Seguridad: Admite cifrado de transporte para los protocolos MQTT y HTTP(s). Admite autenticación y gestión de credenciales de dispositivos.

Tolerancia a fallos: Todos los servidores de ThingsBoard® son idénticos. No hay servidores maestros-trabajadores ni espera activa. Los fallos de nodo se detectan automáticamente. Los nodos con fallos se pueden reemplazar sin tiempo de inactividad. Los datos persistentes se replican mediante una base de datos NoSQL fiable [28] .

Arquitectura:

La **Figura 27** muestra la arquitectura de la plataforma IoT Thingsboard® CE

Figura 27 Arquitectura de plataforma IoT



Nota: tomada de sitio de [28]

Herramientas para implementación de VPN

En el caso de uso de piscicultura, para poder enviar información desde el Gateway IoT hacia la plataforma IoT usando el protocolo MQTT, fue necesario implementar una VPN. Los puntos terminales de la VPN son el punto de acceso inalámbrico para el Gateway IoT y la VM que aloja a la plataforma IoT. Las herramientas utilizadas para la implementación de dicha VPN se describen a continuación.

Firmware OpenWrt

OpenWrt es una distribución GNU/Linux altamente extensible para dispositivos embebidos (típicamente routers inalámbricos) [29]. Está desarrollado para ser un sistema operativo de funciones completas, fácilmente modificable. Proporciona un sistema de archivos totalmente modificable con administración de paquetes. Esto Permite usar paquetes para

personalizar un dispositivo integrado para adaptarse a cualquier aplicación. Posee una interfaz de línea de comandos (a través de SSH) y una interfaz de usuario basada en web para la configuración. Existen diversas razones para utilizar este firmware en un router, la mayoría de las cuales están fuera del alcance de este documento. Nuestra razón principal fue instalar sobre el un cliente del protocolo OpenVPN.

Protocolo OpenVPN (OSS)

OpenVPN es una solución VPN SSL de código abierto con todas las funciones que admite una amplia gama de configuraciones, incluyendo acceso remoto [30], VPN de sitio a sitio, seguridad Wi-Fi y soluciones de acceso remoto a escala empresarial con balanceo de carga, conmutación por error y controles de acceso detallados. Partiendo de la premisa fundamental de que la complejidad es el enemigo de la seguridad, OpenVPN ofrece una alternativa rentable y ligera a otras tecnologías VPN, ideal para los mercados de pymes y grandes empresas.

El modelo de seguridad de OpenVPN se basa en SSL, el estándar de la industria para comunicaciones seguras a través de Internet. OpenVPN implementa la extensión de red segura OSI de capa 2 o 3 mediante el protocolo SSL/TLS, admite métodos flexibles de autenticación de clientes basados en certificados, tarjetas inteligentes o autenticación de dos factores, y permite políticas de control de acceso específicas para usuarios o grupos mediante reglas de firewall aplicadas a la interfaz virtual de la VPN. OpenVPN no es un proxy de aplicación web ni funciona a través de un navegador web [30].

Integración de dispositivos y componentes

Fermentación de Cacao

Estación de monitoreo. Este prototipo se encarga de monitorear 3 parámetros ambientales: Temperatura, Humedad y PH de la pulpa de cacao. Recolecta la información utilizando protocolo propietario la temperatura y humedad. Diagrama de bloques (ver **Figura 4**)

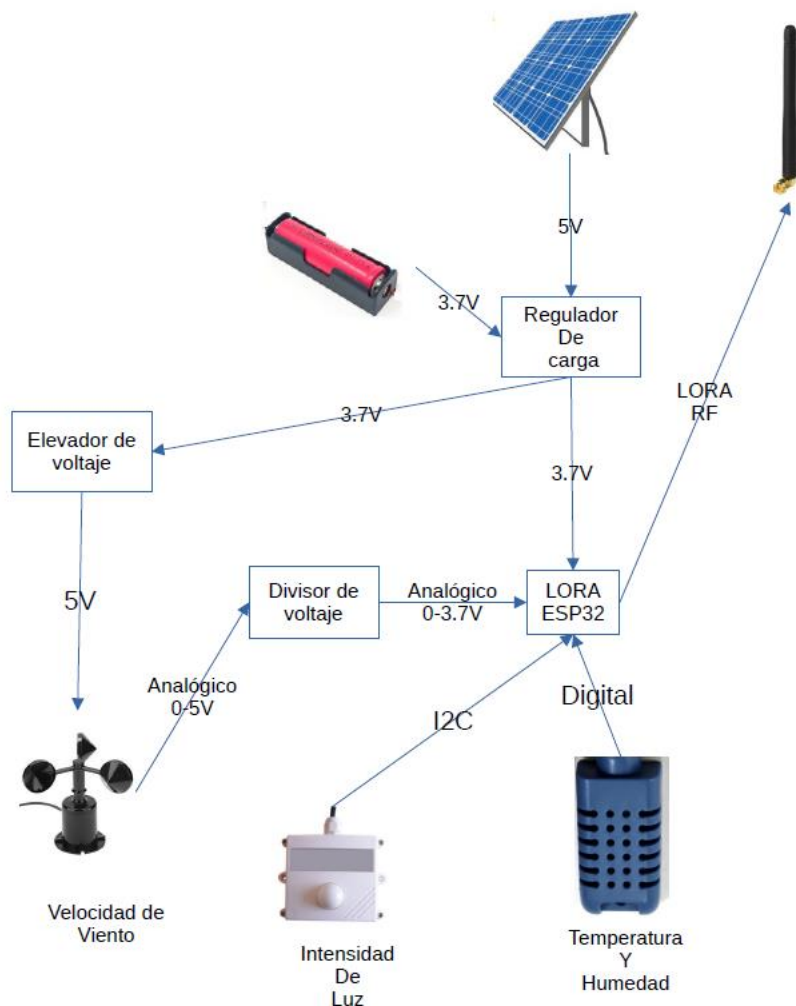
Gateway Lora/MQTT. Este prototipo recibe las transmisiones Lora de la estación de monitoreo y las envía a la plataforma ThingsBoard® usando el protocolo MQTT.

Estación meteorológica.

Este prototipo (ver **Figura 28**) se encarga de monitorear 3 parámetros ambientales: Temperatura, Humedad, intensidad de luz y velocidad del viento. Recolecta la información utilizando protocolo I2C para la intensidad de la luz, un convertidor A/D para la velocidad del viento y un protocolo propietario para la temperatura y humedad. Cuenta con un panel solar para cargar una batería de iones de litio de 3.7 Voltios que sirve como fuente de alimentación.

Figura 28

Diagrama de bloques de Estación de monitoreo ambiental



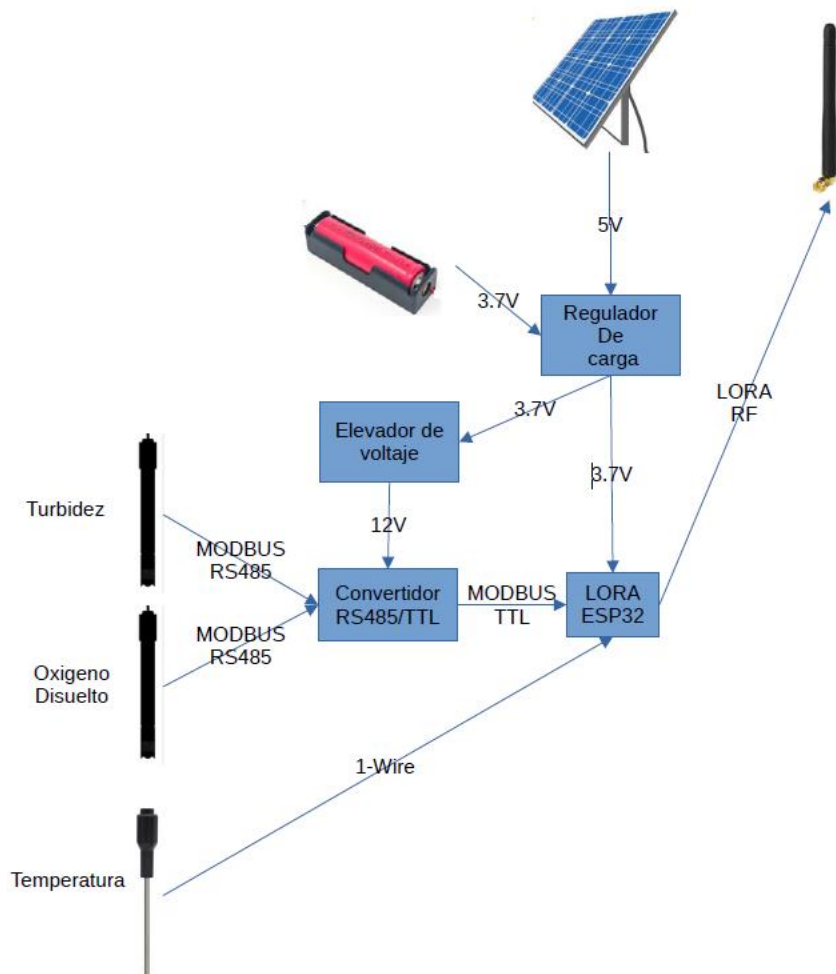
Nota: Elaboración propia con LibreOffice Draw

Estación de calidad del agua.

Este prototipo se encarga de monitorear 3 parámetros acuáticos: Temperatura, Oxígeno disuelto y Turbidez (ver **Figura 29**). Recolecta la información utilizando protocolo modbus para los sensores de oxígeno y turbidez y protocolo 1 wire para la temperatura. Cuenta con un panel solar para cargar una batería de iones de litio de 3.7 Voltios que sirve como fuente de alimentación.

Figura 29

Diagrama de bloques sistema de monitoreo de calidad del agua



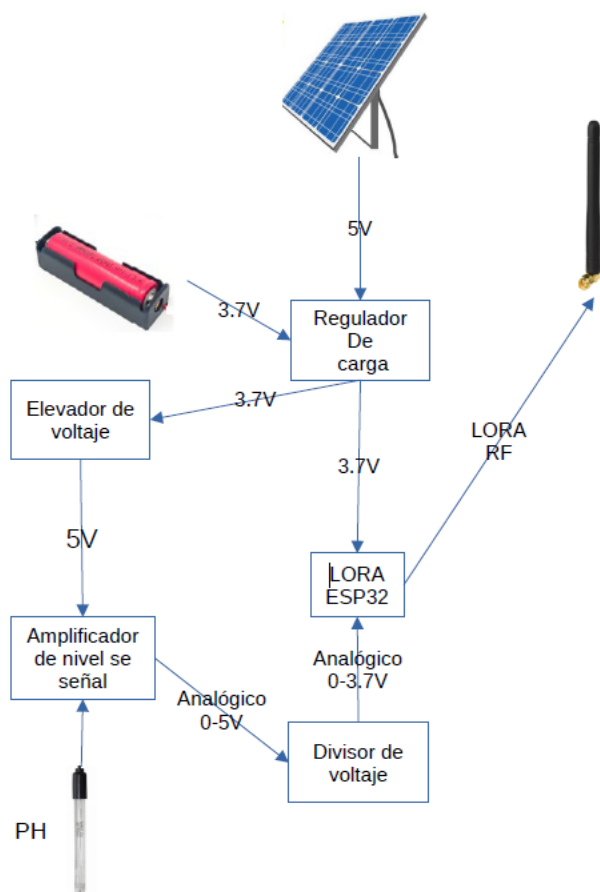
Nota: Elaboración propia con LibreOffice Draw.

Estación de calidad del agua (monitoreo de PH).

Este prototipo (**Figura 30**) se encarga de monitorear el Ph del agua del estanque. El sensor de Ph genera una señal analógica que se conecta a un convertidor A/D del microcontrolador. Cuenta con un panel solar para cargar una batería de iones de litio de 3.7 Voltios que sirve como fuente de alimentación.

Figura 30

Diagrama de bloques de estación de monitoreo de PH



Nota: Elaboración propia con LibreOffice Draw.

Gateway Lora/MQTT

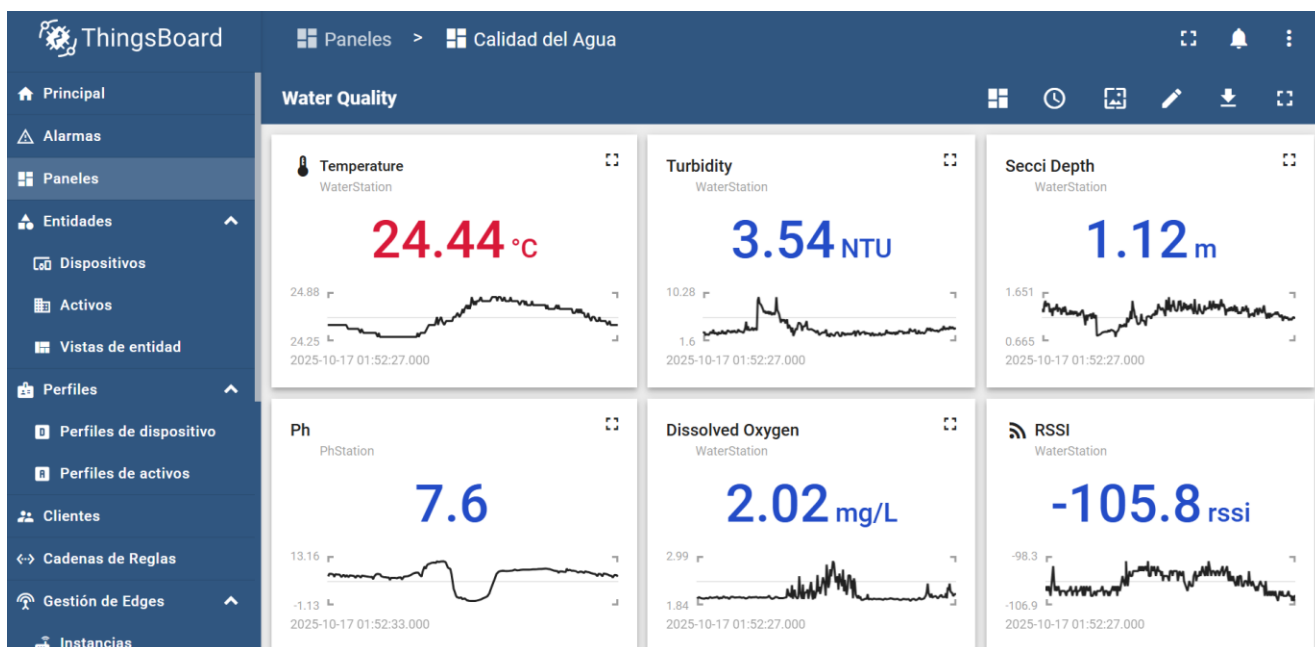
A lo anterior, se agrega un módulo Gateway, que recibe las transmisiones Lora de la estación de monitoreo y las envía a la plataforma ThingsBoard® usando el protocolo MQTT.

Capítulo III: Resultados

La plataforma ThingsBoard® almacena los valores de telemetría en su base de datos. La plataforma dispone de una interfaz para monitorear los datos almacenados tanto en tiempo real como históricos a través de paneles como el que se muestra en la **Figura 31**.

Figura 31

Panel de monitoreo de Calidad de Agua



Nota: Captura de pantalla de interfaz gráfica de plataforma Thingsboards.

Si se requiere obtener datos de telemetría desde la plataforma IoT, para analizar con una herramienta externa, se utiliza el protocolo https, y una dirección URL como la siguiente:

<https://hostname:8080/api/plugins/telemetry/{entityType}/{entityId}/values/timeseries{?keys,startTs,endTs,intervalType,interval,timeZone,limit,agg,orderBy,useStrictDataTypes}>

En la **Tabla 16**, se muestran los parámetros para formar la URL.

Tabla 16

Parámetros para obtener datos de telemetría de ThingsBoard®

Name	Description
entityType * <i>(path)</i>	A string value representing the entity type. For example, 'DEVICE'
entityId * string <i>(path)</i>	A string value representing the entity id. For example, '784f394c-42b6-435a-983c-b7beff2784f9'
keys * string <i>(query)</i>	A string value representing the comma-separated list of telemetry keys.
startTs * integer (\$int64) <i>(query)</i>	A long value representing the start timestamp of the time range in milliseconds, UTC.
endTs * integer (\$int64) <i>(query)</i>	A long value representing the end timestamp of the time range in milliseconds, UTC.
intervalType <i>(query)</i>	A string value representing the type fo the interval.
interval integer (\$int64)	A long value representing the aggregation interval range in milliseconds.

<i>(query)</i>	
timeZone string <i>(query)</i>	A string value representing the timezone that will be used to calculate exact timestamps for 'WEEK', 'WEEK_ISO', 'MONTH' and 'QUARTER' interval types.
limit <i>(query)</i>	An integer value that represents a max number of timeseries data points to fetch. This parameter is used only in the case if 'agg' parameter is set to 'NONE'.
agg <i>(query)</i>	A string value representing the aggregation function. If the interval is not specified, 'agg' parameter will use 'NONE' value.
orderBy <i>(query)</i>	Sort order. ASC (ASCENDING) or DESC (DESCENDING)
useStrictDataTypes boolean <i>(query)</i>	Enables/disables conversion of telemetry values to strings. Conversion is enabled by default. Set parameter to 'true' in order to disable the conversion.

Nota: Tomada de interfaz swagger de plataforma ThingsBoard®.

Se puede usar el comando *curl* desde Linux para obtener los datos y almacenarlos en un archivo.

El siguiente ejemplo muestra cómo se obtienen los datos de la estación meteorológica y se almacenan en un archivo llamado *'ambiental.json'*

```
curl -X 'GET' \
  'https://195.179.231.58:8080/api/plugins/telemetry/DEVICE/43b00a90-f53f-11ef-9930-4fd071eb05d2/values/timeseries?keys=%27temperature%27&startTs=1760853600000&endTs=1761021411&interval=0&limit=100&agg=NONE&orderBy=ASC&useStrictDataTypes=false' \
  -H 'accept: application/json' \
```

```
-H 'X-Authorization: Bearer
eyJhbGciOiJIUzUxMiJ9.eyJzdWIiOiJkaXNwbGF5QHRoaW5nc2JvYXJkLm9yZyIsInVzZXJJZCI6Ijg1MTY3ZmMwLTEwYjMt
MTFmMClhZTY5LTRmZDA3MwViMDVhZmIiInNjb3BlcyI6WyJURU5BTlRfQURNSU4iXSwic2Vzc2lvcnk1IjoieYmU3ZDE4ZTctN
GJhNi00OWQ0LThlYzctMWU2OWNhN2I0ODdlIiwiaXhwIjoxNzYxMDI5Mjc2LzJpc3MiOiJ0aGluZ3Nib2FyZC5pbyIsIm1hdC
I6MTc2MTAyMDI3NiwiZmlyc3ROYW11IjoiriRGlzcGxheSI6Imxhc3ROYW11IjoieVEZUIiwiaXNjb2FyZCI6dHJ1ZSwiaXNqdWJ
saWMiOiJhbHN1LCJ0Z5hbhRjZCI6IjkyNDhkN2YwLTRjNjUtMTFlZi1hY2Q5LWQ3YzkyZkZkZW5hbnRmNmZSI6ImN1c3RvbWVyaWVz
OiI6ImZgZmNDAwMC0xZGQyLWVzYjItODAwMC04MDgwODAwMDgwODAwfQ.Pvx5E-
PbHrysc01K7nzsFD23kZcDkzf9OXm6pAwpeZL4P-NYGoM0YKAUFiEVHOPmKHkNx01NDgxFQukw3RlkiA'\
-o ambiental.json
```

El resultado es un diccionario JSON como el siguiente:

```
{
  "temperature":
  [
    {
      "value": 36.7,
      "ts": 1609459200000
    },
    {
      "value": 36.6,
      "ts": 1609459201000
    }
  ]
}
```

Ejemplo de extracción de datos desde la Estación meteorológica

Se cargan los datos desde un archivo JSON a un diccionario de Python:

```
1 data=json.load(open('ambiental.json'))
```

La estructura de este diccionario no se puede utilizar para el análisis, por lo que se reorganizan obteniendo un diccionario en donde cada ítem es una lista de los valores observados de cada variable. Con este diccionario se crea un *dataframe* y se agrega como índice el tiempo de observación convertido al tipo *'datetime'*, lo que da como resultado, información similar a la mostrada en la **Tabla 17**

```

1 dfList=[]
2 for k,v in data.items():
3     ts=[i['ts'] for i in v]
4     val=[float(i['value']) for i in v]
5     tz='America/El_Salvador'
6     index=pd.to_datetime(ts,unit='ms',utc=True).tz_convert(tz)
7     df=pd.DataFrame(val,index=index,columns=[k])
8     dfList.append(df)
9 dfAmb=pd.concat(dfList,axis=1)
10 dfAmb=dfAmb.resample('5min').mean()
11 dfAmb.head()

```

Tabla 17

Primeras líneas de DataFrame Ambiental

	temperature	humidity	liv	windspeed
2025-01-22 10:25:00-06:00	26.15	85.1	5569.68	NaN
2025-01-22 10:30:00-06:00	NaN	NaN	NaN	NaN
2025-01-22 10:35:00-06:00	NaN	NaN	NaN	NaN
2025-01-22 10:40:00-06:00	NaN	NaN	NaN	NaN
2025-01-22 10:45:00-06:00	NaN	NaN	NaN	NaN

```
1 dfAmb.info()
```

```

<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
DatetimeIndex: 44258 entries, 2025-01-22 10:25:00-06:00 to 2025-06-25
02:30:00-06:00
Freq: 5min
Data columns (total 4 columns):
#   Column          Non-Null Count  Dtype
---  -
0   temperature     20393 non-null   float64
1   humidity        20393 non-null   float64
2   liv              20393 non-null   float64
3   windspeed       17235 non-null   float64
dtypes: float64(4)
memory usage: 1.7 MB

```

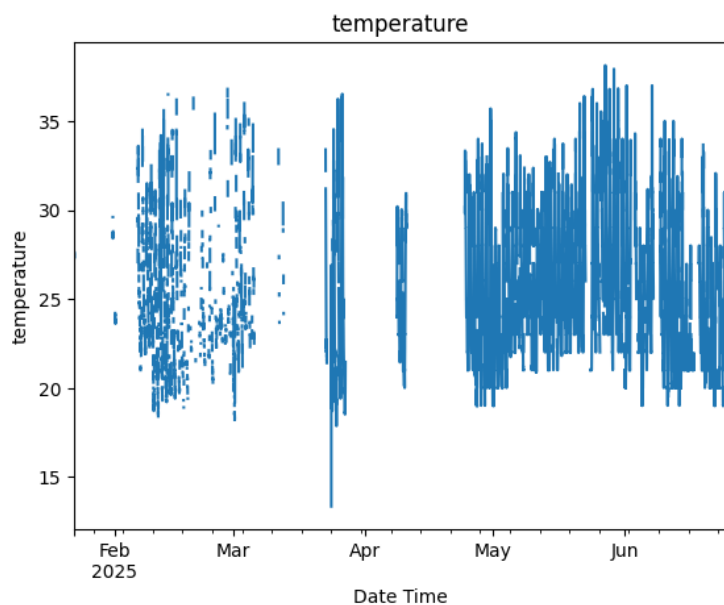
Con la información puesta así, se facilita la creación de gráficos de los parámetros bajo estudio, lo que permite análisis del comportamiento de los mismos, como se muestra en las

Figura 32-Figura 35

```
1 varList=['temperature', 'humidity', 'liv', 'windspeed']
2 for i in varList:
3     plt.figure()
4     dfAmb[i].plot(title=i)
5     plt.xlabel('Date Time')
6     plt.ylabel(i)
7     plt.show()
8     print('Nota: gráfica generada con la biblioteca "matplotlib"
de Python versión 3.12.12')
```

Figura 32

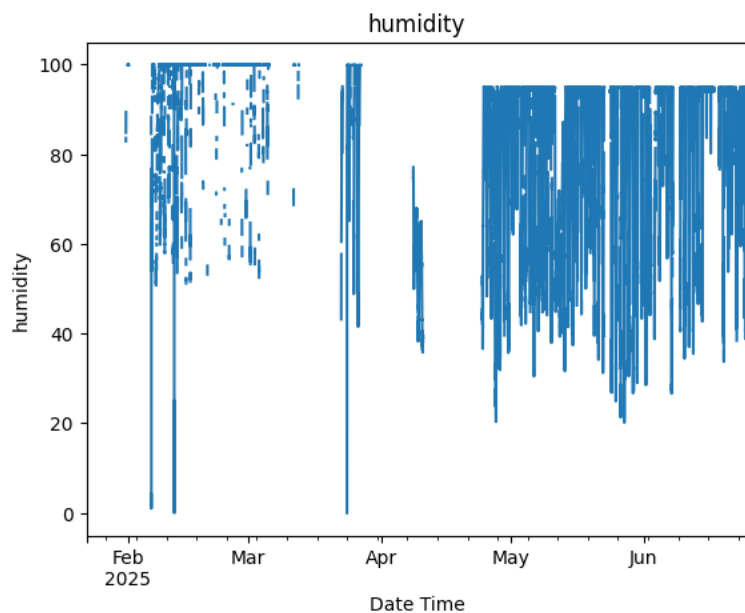
Gráfico de temperatura vs tiempo



Nota: gráfica generada con la biblioteca "matplotlib" de Python versión 3.12.12

Figura 33

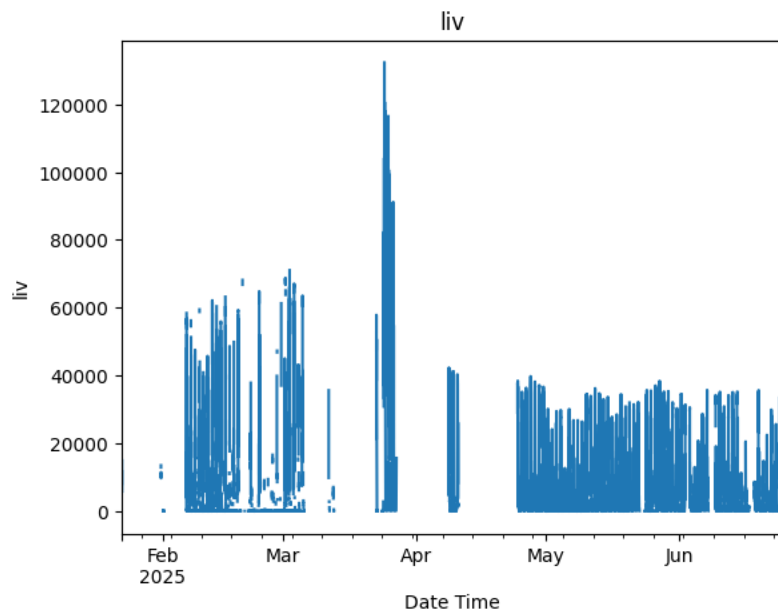
Gráfico de Humedad vs tiempo



Nota: gráfica generada con la biblioteca "matplotlib" de Python versión 3.12.12

Figura 34

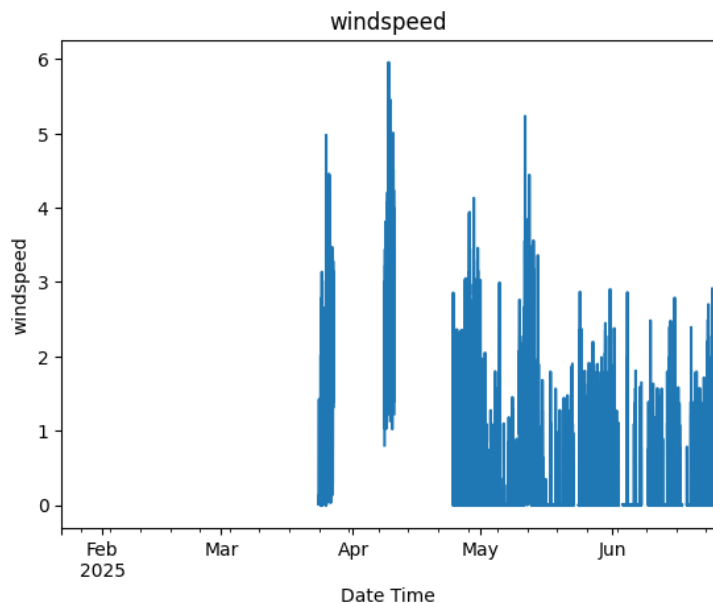
Gráfico de Intensidad de luz vs tiempo



Nota: gráfica generada con la biblioteca "matplotlib" de Python versión 3.12.12

Figura 35

Gráfico de velocidad del viento de luz vs tiempo

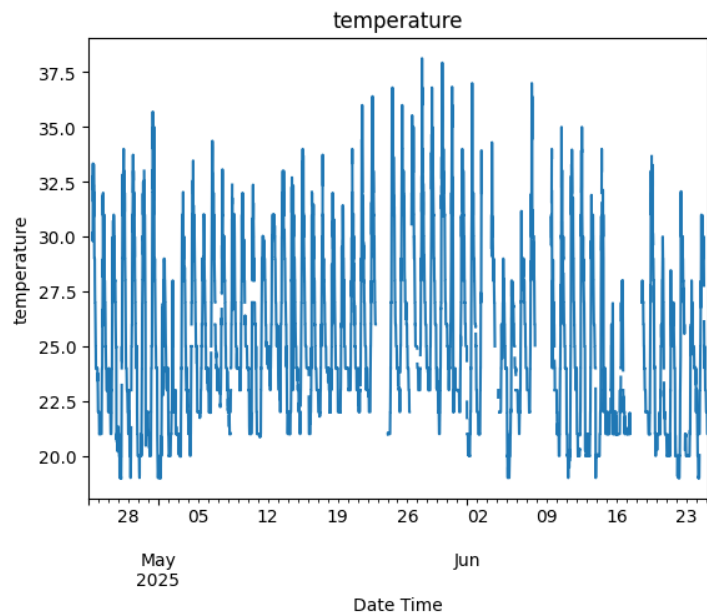


Nota: gráfica generada con la biblioteca "matplotlib" de Python versión 3.12.12

Como se puede observar, el dataframe contiene datos desde febrero hasta junio de 2025 aunque de manera inconsistente entre febrero y mediados de abril. Esto se debió a cambios en el diseño original, por múltiples problemas detectados y se puso en operación nuevamente el 24 de abril, por lo que se tomaran como datos validos a partir de esa fecha. El rango de las **Figura 36- Figura 39**, consideran datos más estables.

Figura 36

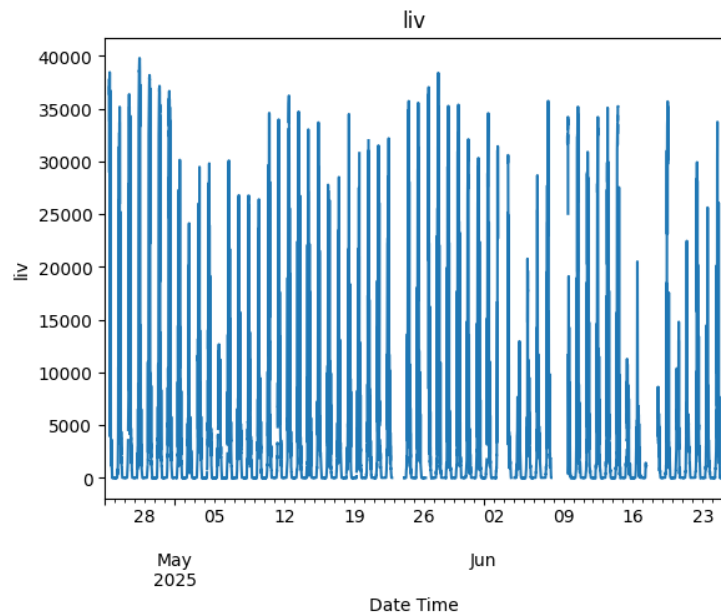
Gráfico de temperatura vs tiempo



Nota: gráfica generada con la biblioteca "matplotlib" de Python versión 3.12.12

Figura 37

Gráfico de Intensidad de luz vs tiempo



Nota: gráfica generada con la biblioteca "matplotlib" de Python versión 3.12.12

Figura 38

Gráfico de Humedad vs tiempo

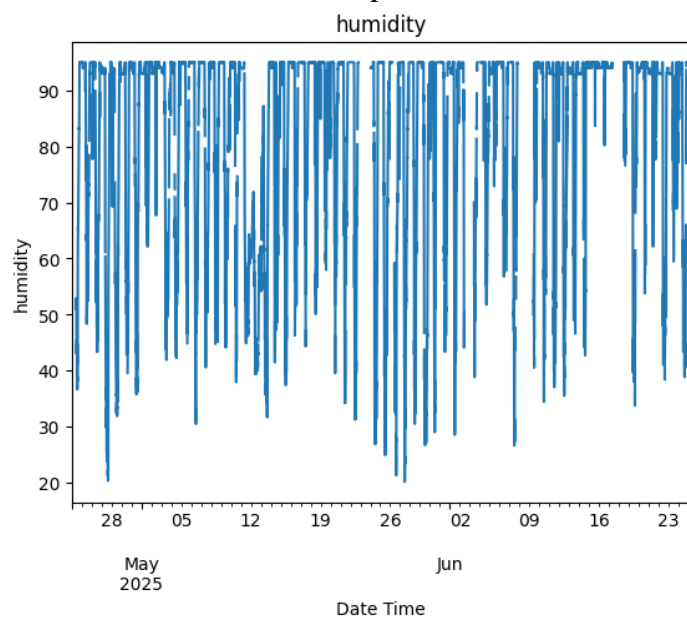
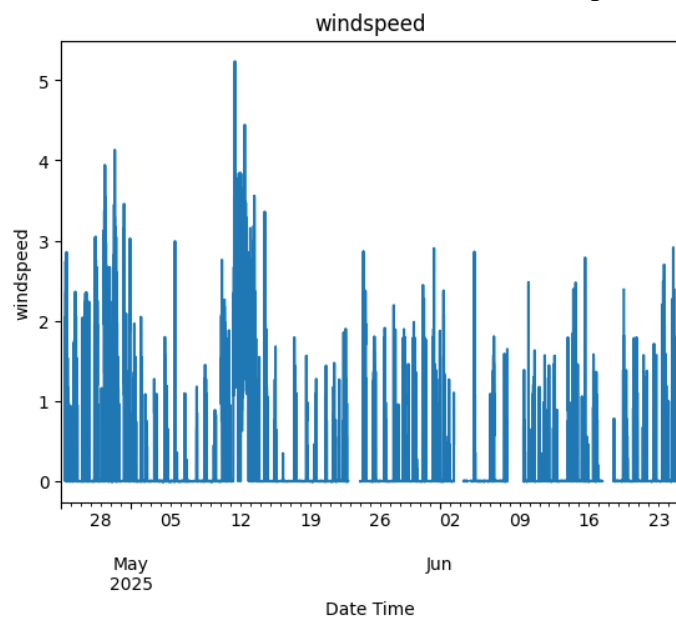
**Figura 39**

Gráfico de velocidad del viento de luz vs tiempo



Nota: gráfica generada con la biblioteca "matplotlib" de Python versión 3.12.12

A continuación se analiza el comportamiento a lo largo del día de las variables ambientales. Para esto se agregan las columnas *hourofday* y *dayofyear* al *dataframe* y graficamos las variables ambientales versus la hora del día superponiendo los datos de todos los días en un mismo cuadro, lo que se muestra de la **Figura 40** a la **Figura 43**.

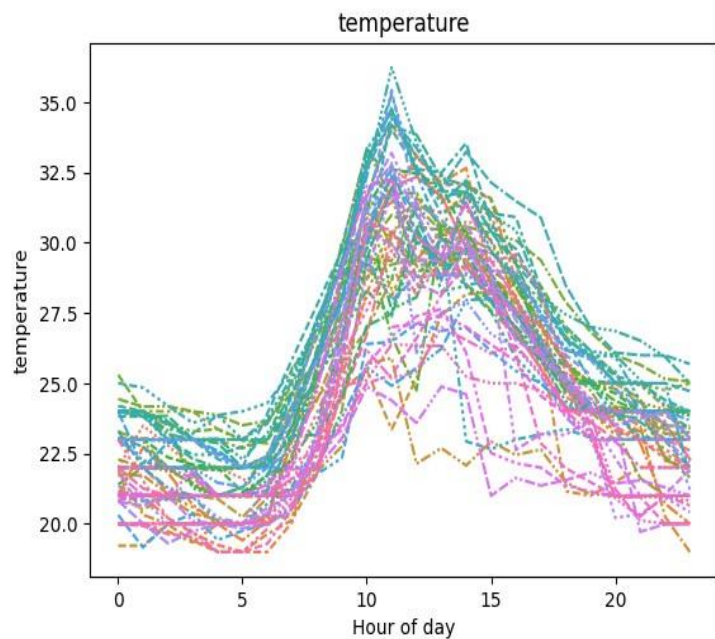
```

1 dfAmb['hourofday']=dfAmb.index.hour
2 dfAmb['dayofyear']=dfAmb.index.dayofyear
3 varList=['temperature', 'humidity', 'liv', 'windspeed']
4 for i in varList:
5     plt.figure()
6     df_wide=dfAmb.pivot_table(index="hourofday", columns="dayofyear",
7     values=i)
8     sns.lineplot(data=df_wide, legend=False, orient='x')
9     plt.title(i)
10    plt.xlabel('Hour of day')
11    plt.ylabel(i)
12    plt.show()
13    print('Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de
14    Python versión 3.12.12')

```

Figura 40

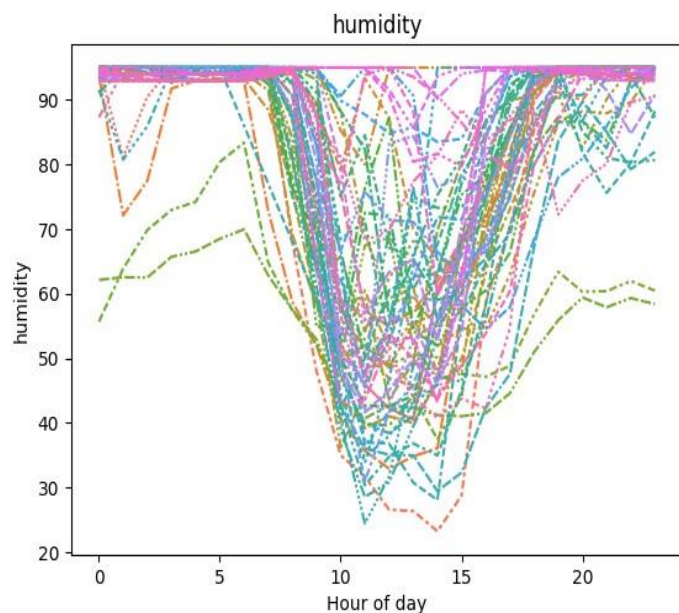
Gráfico de temperatura vs Hora del día



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Figura 41

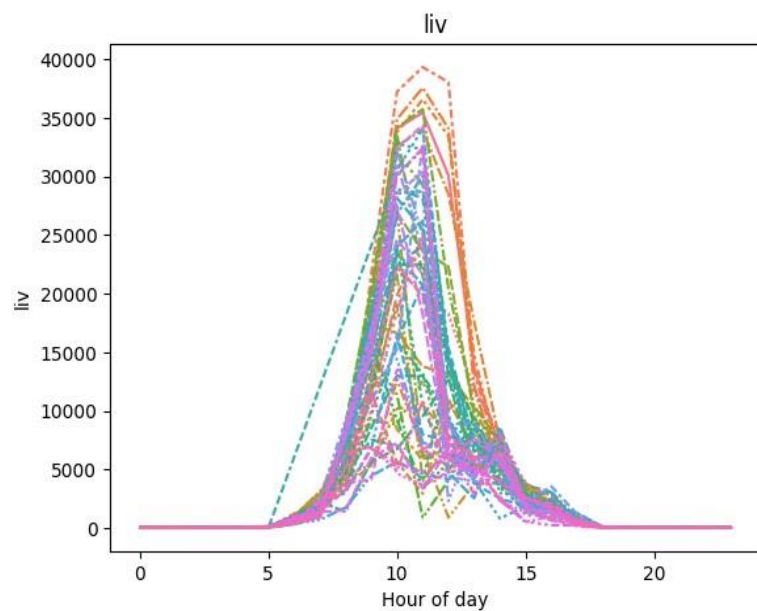
Gráfico de humedad vs Hora del día



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Figura 42

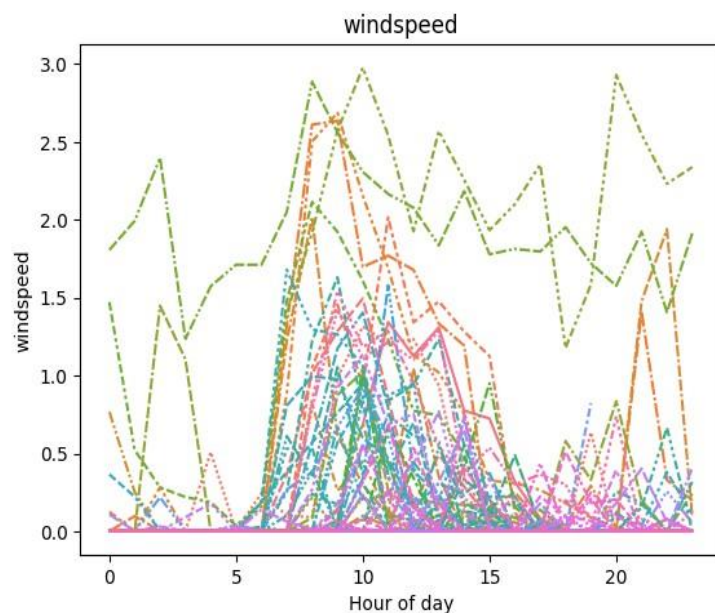
Gráfico de Intensidad de la luz vs Hora del día



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Figura 43

Gráfico de Velocidad del Viento vs Hora del día



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

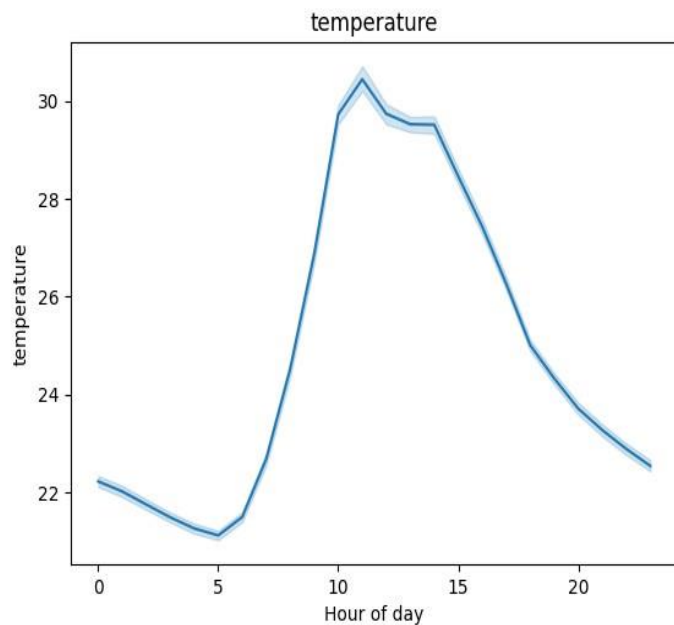
Se puede observar que las variables temperatura, humedad e intensidad de la luz tienen un comportamiento cíclico con un periodo de 24 horas. Ahora calculamos la media para cada hora del día y la graficamos junto con el intervalo de confianza del 95%, y el resultado se muestra en las **Figura 44** a la **Figura 47**.

```

1 varList=['temperature', 'humidity', 'liv', 'windspeed']
2 for i in varList:
3     plt.figure()
4     sns.lineplot(data=dfAmb, x='hourofday', y=i)
5     plt.title(i)
6     plt.xlabel('Hour of day')
7     plt.ylabel(i)
8     plt.show()
9     print('Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de
Python versión 3.12.12')
```

Figura 44

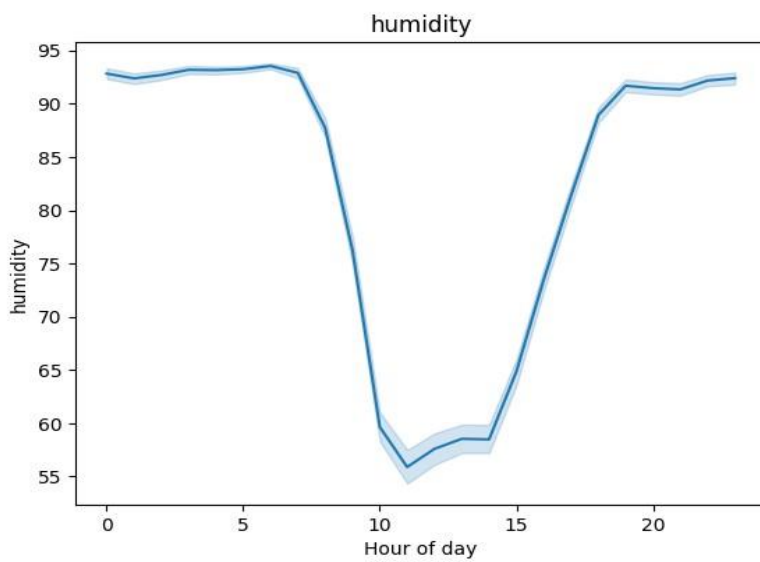
Gráfico de Promedio de temperatura vs Hora del día



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Figura 45

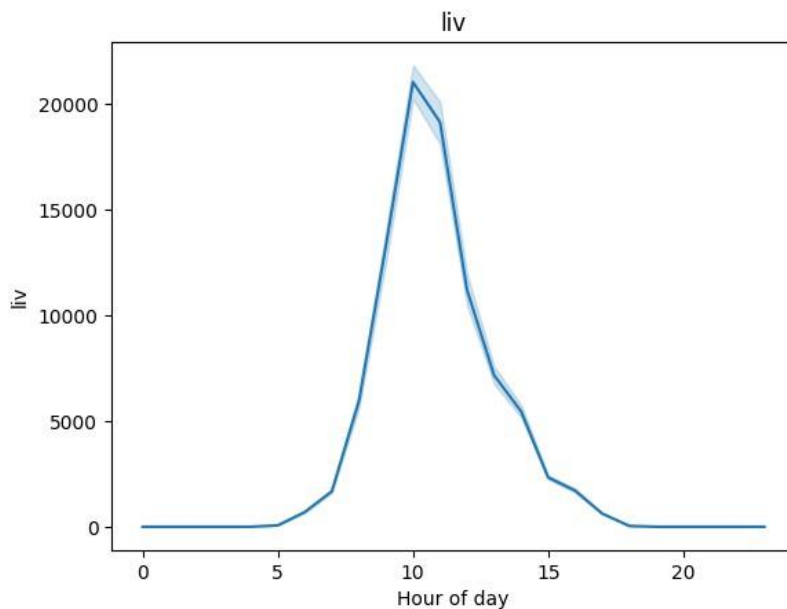
Gráfico de Promedio de humedad vs Hora del día



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Figura 46

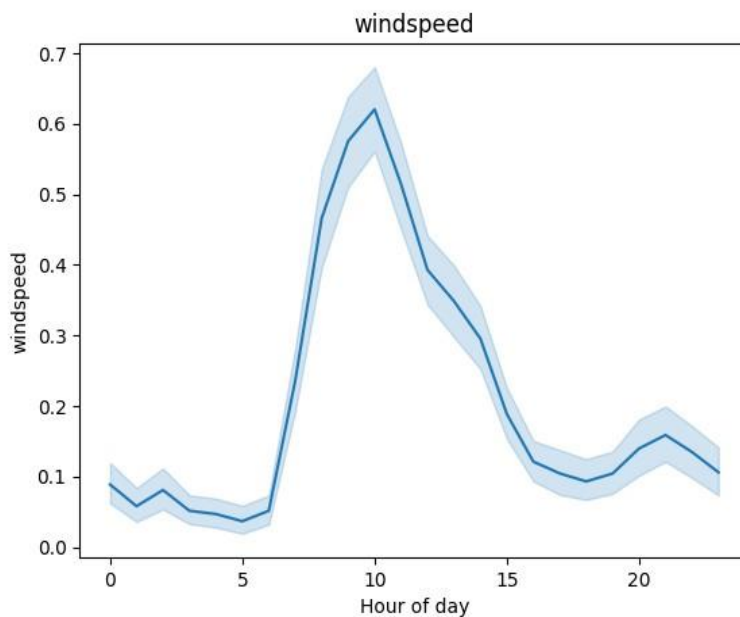
Gráfico de Promedio de Intensidad de la luz vs Hora del día



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Figura 47

Gráfico de Promedio de Velocidad del viento vs Hora del día



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Para ampliar el análisis, ahora obtenemos los parámetros estadísticos descriptivos y correlación entre las variables y los resultados se muestran en la **Tabla 18**.

Para obtener los parámetros de estadística descriptiva, usamos la siguiente instrucción:

```
1 dfAmb[['temperature', 'humidity', 'liv', 'windspeed']].describe()
```

Tabla 18
Estadística descriptiva de parámetros ambientales

	temperature	humidity	liv	windspeed
count	15737.000000	15737.000000	15737.000000	15737.000000
mean	24.982197	81.666322	3815.944864	0.209456
std	3.717642	18.604087	7827.667114	0.567261
min	19.000000	20.133330	0.000000	-0.003048
25%	22.000000	69.933330	0.000000	0.001597
50%	24.000000	93.000000	248.310100	0.002177
75%	28.000000	95.000000	3586.531000	0.003194
max	38.133340	95.000000	39758.320000	5.233791

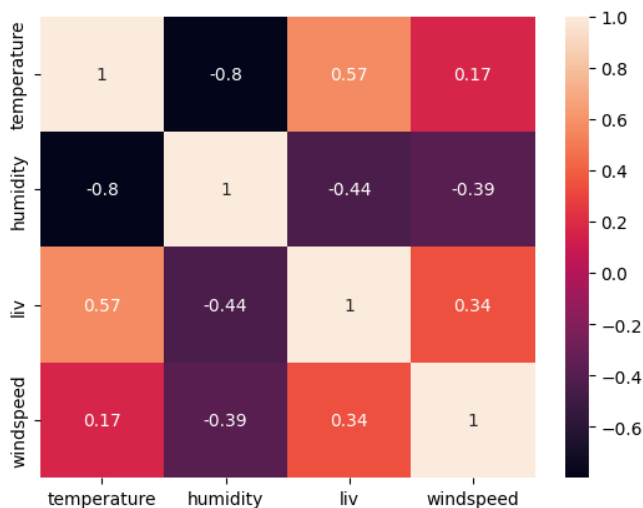
Nota: Tabla generada con Python versión 3.12.12

Y para obtener los datos de correlación, usamos la instrucción:

```
1. dfAmb[['temperature', 'humidity', 'liv', 'windspeed']].corr()
```

Cuyos resultados se muestran en la **Figura 48**

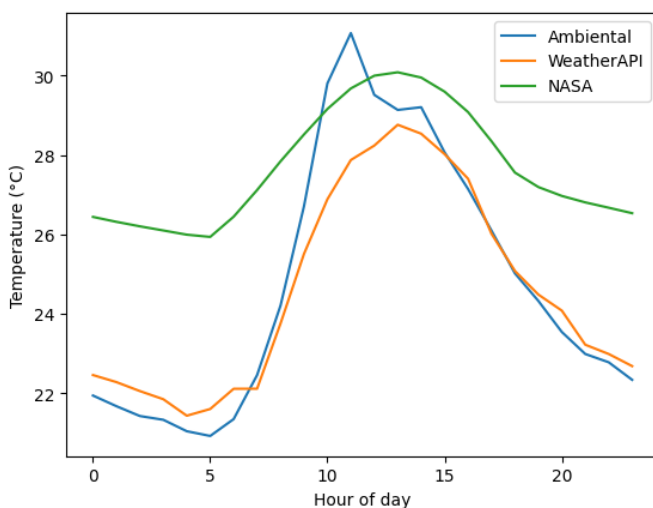
Figura 48
Correlación entre variables ambientales



Nota: figura generada con Python versión 3.12.12

Para validar la exactitud de la información obtenida, se hace una comparación de los datos recopilados por la estación ambiental y los de otras fuentes de información, específicamente: WeatherAPI y NASA POWER, para el mismo periodo de tiempo; La **Figura 49**, muestra los resultados de esta comparación, para los datos de temperatura

Figura 49
Comparación de datos de temperatura

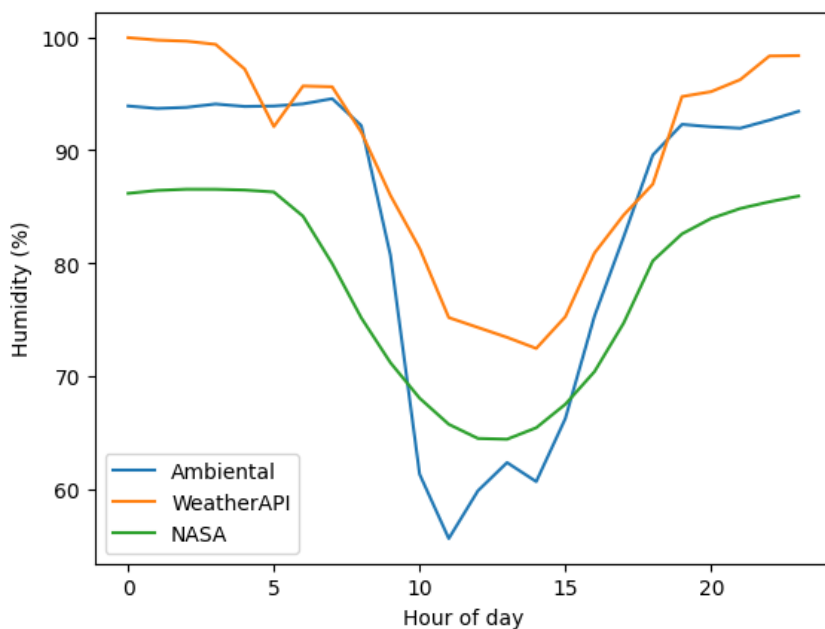


Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Se observa diferencia entre las mediciones de campo, tanto en la hora del día en que se presenta el máximo de temperatura y el valor máximo alcanzado. Aunque el comportamiento de las curvas sigue el mismo patrón diario, alcanzando un mínimo aproximadamente a las 5:00 am y un máximo entre las 11:00am y 3:00pm. Una comparación similar, para datos de humedad (se muestra en la **Figura 50**) y para las variaciones de viento, la **Figura 51** muestra los resultados respectivos.

Figura 50

Grafica de comparación de humedad entre Mediciones en campo y otras fuentes

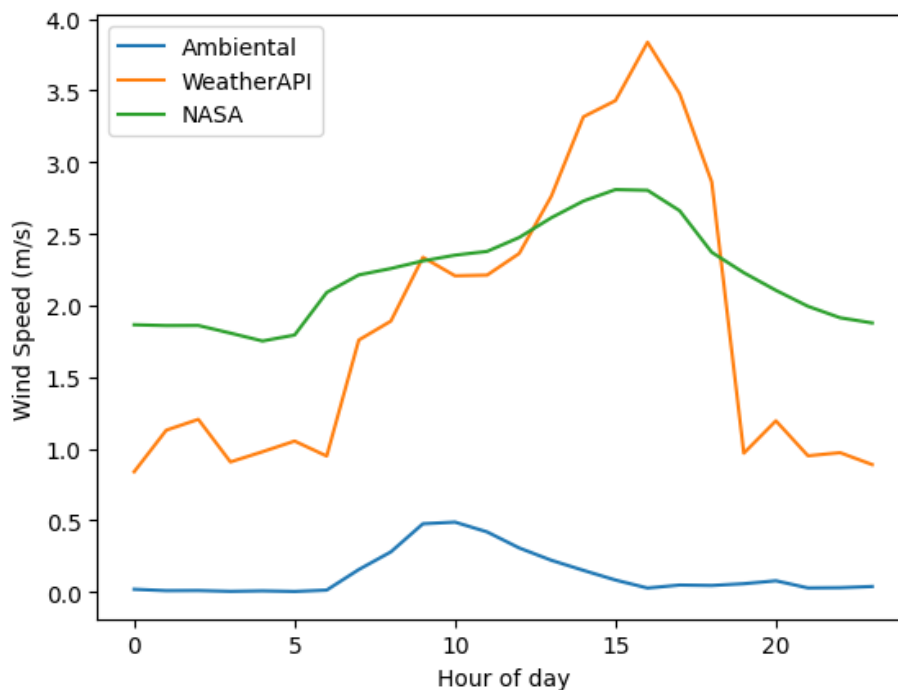


Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

De igual forma, se observa diferencia entre mediciones de campo tanto en la hora del día en que se presentan los máximos y mínimos. Aunque el comportamiento de las curvas sigue el mismo patrón diario alcanzando un mínimo entre las 11 de la mañana y 3 de la tarde y un máximo aproximadamente entre las 10 de la noche y las 5 de la mañana.

Figura 51

Grafica de comparación de velocidad del viento entre Mediciones en campo y otras fuentes



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Se observa diferencia entre mediciones de campo tanto en la hora del día en que se presenta el máximo y el valor máximo de este parámetro. Además, en este caso las curvas no siguen el mismo comportamiento diario, lo cual podría deberse a la vegetación circundante y la topología propia del lugar.

En general se pueden explicar estas diferencias y asociarlas a la influencia de la vegetación circundante que podría afectar la variación de estos parámetros en ciertas horas del día. La **Figura 52**, muestra la vegetación que rodea el sitio de pruebas.

Figura 52

Vista aérea de la zona de ubicación del estanque de peces



Nota: imagen tomada de Google Maps

Estación de calidad del agua

Para evaluar el comportamiento de la información recopilada, cargamos los datos y adecuamos la estructura de manera similar a los de la estación meteorológica, usando las instrucciones:

```

1 data2=json.load(open('acuatica.json'))
2 dfList=[]
3 for k,v in data2.items():
4     ts=[i['ts'] for i in v]
5     val=[float(i['value']) for i in v]
6     tz='America/El_Salvador'
7     index=pd.to_datetime(ts,unit='ms',utc=True).tz_convert(tz)
8     df=pd.DataFrame(val,index=index,columns=[k])
9     dfList.append(df)
10 dfAgua=pd.concat(dfList,axis=1)
11 dfAgua=dfAgua.resample('5min').mean()

```

Además del sensor de temperatura DS18B20, los sensores de oxígeno disuelto y turbidez también cuentan con un sensor de temperatura incorporado. Vamos a obtener un promedio de las 3 columnas de temperatura en el *dataframe* y lo asignaremos a una única columna.

Se tomarán como datos validos aquellos a partir del 15 de marzo porque los datos anteriores son parte de las pruebas de funcionamiento y ajustes de los sensores.

El sensor de turbidez se descalibró a partir del 15 de abril por lo que solo se tomarán los datos previos a esa fecha como válidos.

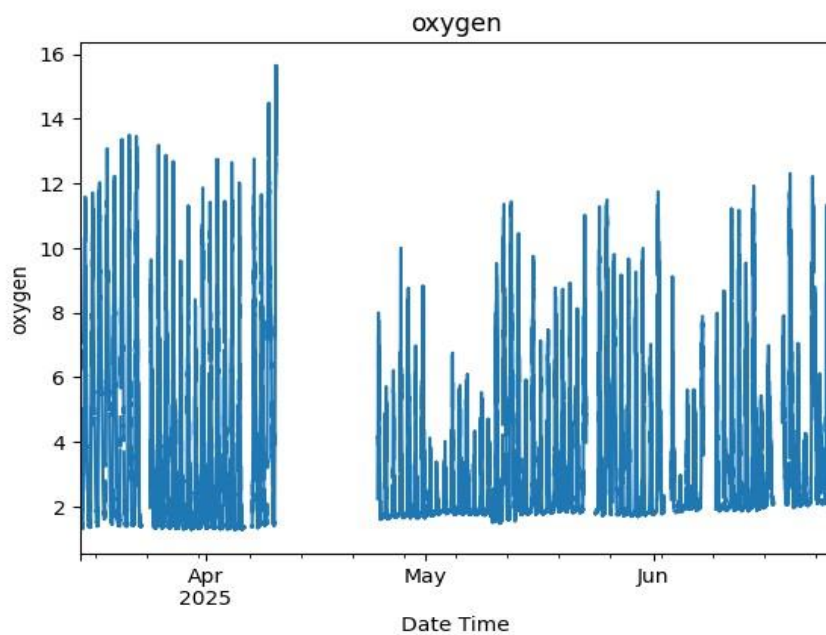
Luego de la depuración del *dataframe*, se generan gráficos de todas las variables versus el tiempo, por medio de las instrucciones siguientes:

```
1 dfAgua.loc['2025-04-15':, ['turbidity', 'secci']] = np.nan
2 dfAgua = dfAgua.loc['2025-03-15':]
3 varList = ['oxygen', 'tempAgua', 'secci', 'turbidity']
4 for i in varList:
5     plt.figure()
6     dfAgua[i].plot(title=i)
7     plt.xlabel('Date Time')
8     plt.ylabel(i)
9     plt.show()
10     print('Nota: gráfica generada con la biblioteca "matplotlib"
de Python versión 3.12.12')
```

A partir de lo anterior, se generan de la **Figura 53** a la **Figura 56**.

Figura 53

Gráfico de oxígeno disuelto vs tiempo

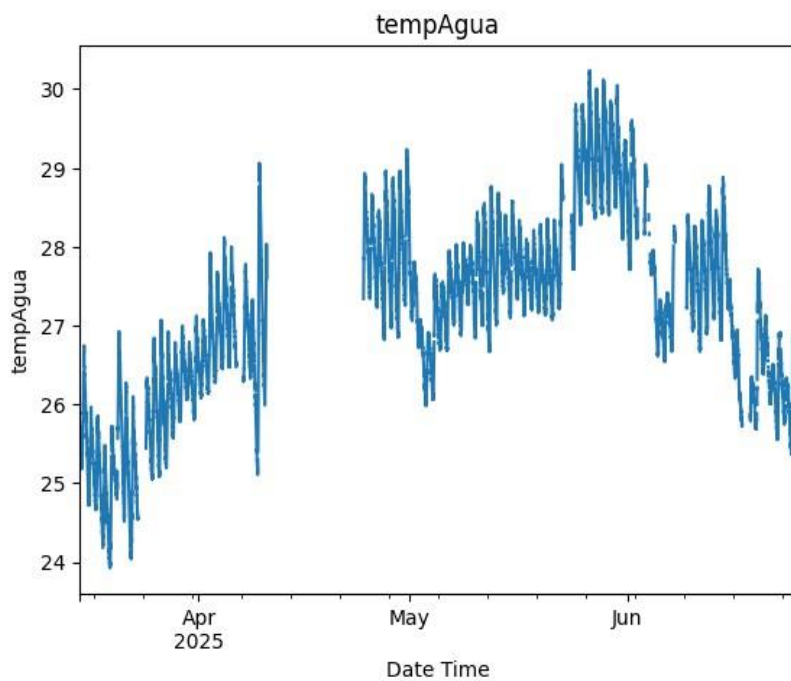


Nota: gráfica generada

con la biblioteca "matplotlib" de Python versión 3.12.12

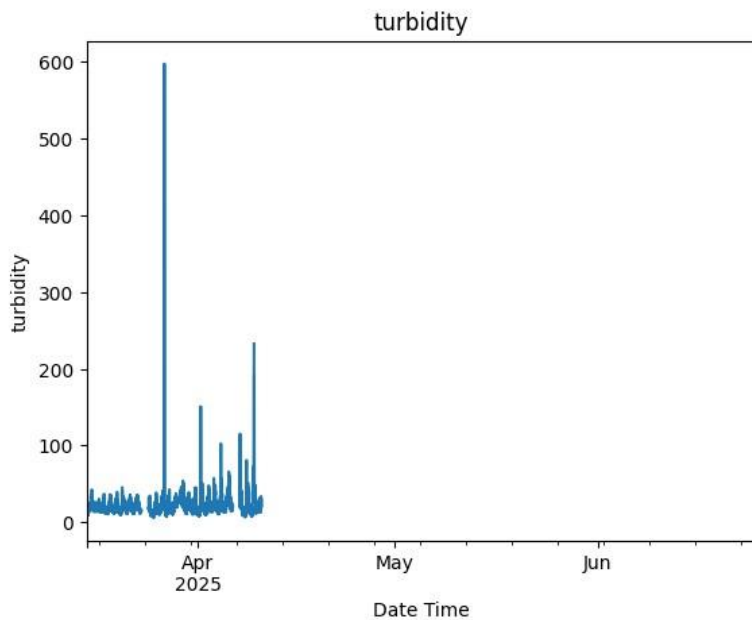
Figura 54

Gráfico de temperatura vs tiempo



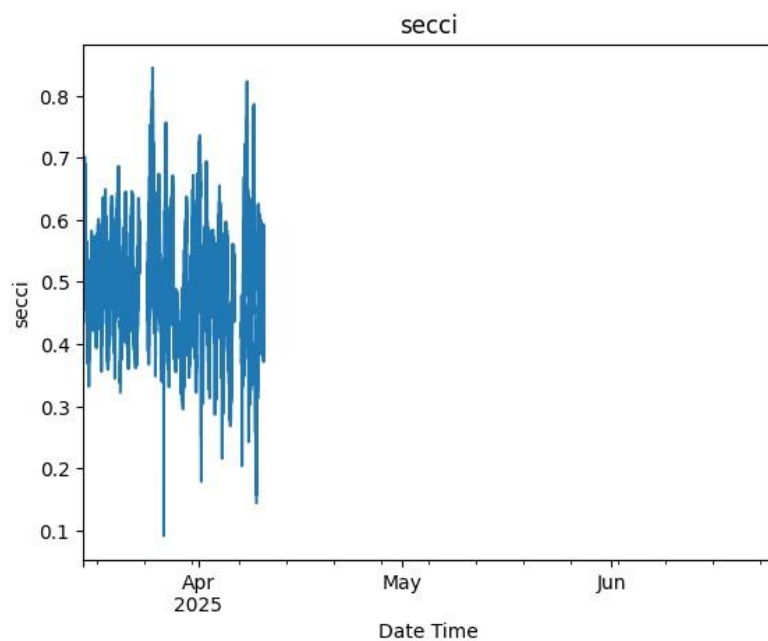
Nota: gráfica generada con la biblioteca "matplotlib" de Python versión 3.12.12

Figura 55
Gráfico de turbidez vs tiempo



Nota: gráfica generada con la biblioteca "matplotlib" de Python versión 3.12.12

Figura 56
Gráfico de profundidad secci vs tiempo



Nota: gráfica generada con la biblioteca "matplotlib" de Python versión 3.12.12

Al igual que las variables ambientales, se generan gráficos del comportamiento de los parámetros observados versus la hora del día, usando las instrucciones siguientes (esto da como resultado, la información mostrada desde la **Figura 57** a la **Figura 60**)

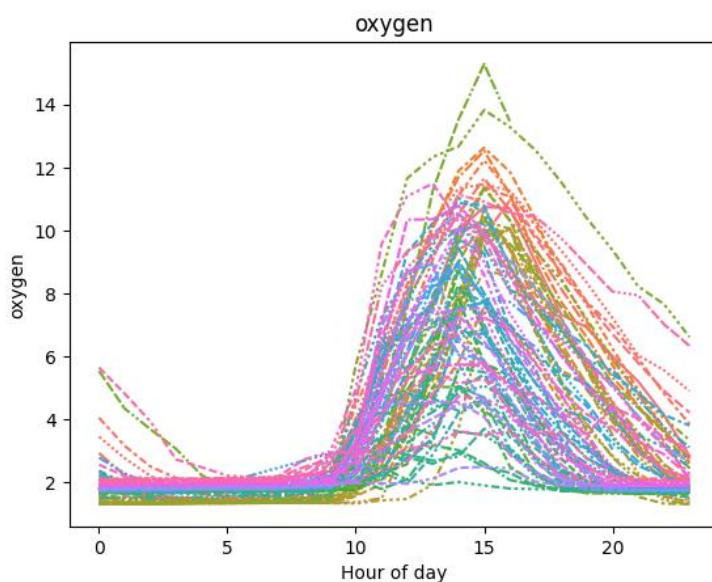
```

1 dfAgua['hourofday']=dfAgua.index.hour
2 dfAgua['dayofyear']=dfAgua.index.dayofyear
3 varList=['oxygen','tempAgua','secci','turbidity']
4 for i in varList:
5     plt.figure()
6     df_wide=dfAgua.pivot_table(index="hourofday", columns="dayofyear",
7     values=i)
8     sns.lineplot(data=df_wide,legend=False)
9     plt.title(i)
10    plt.xlabel('Hour of day')
11    plt.ylabel(i)
12    plt.show()
13    print('Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de
14    Python versión 3.12.12')

```

Figura 57

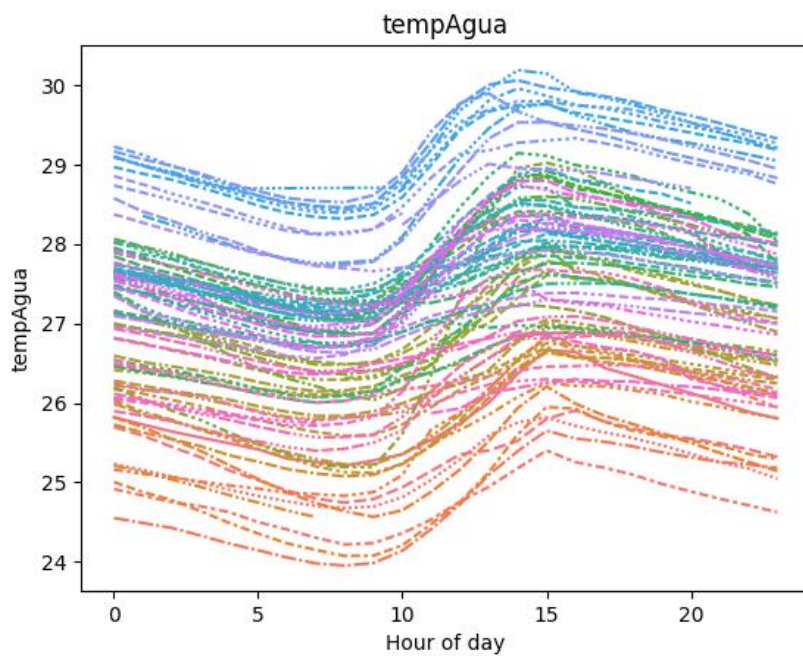
Gráfico de oxígeno disuelto vs Hora del día



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Figura 58

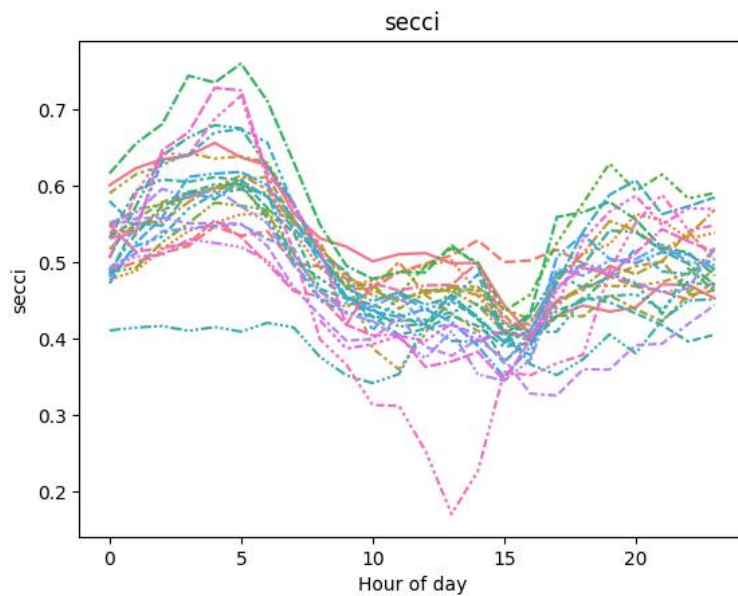
Gráfico de temperatura del agua vs Hora del día



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

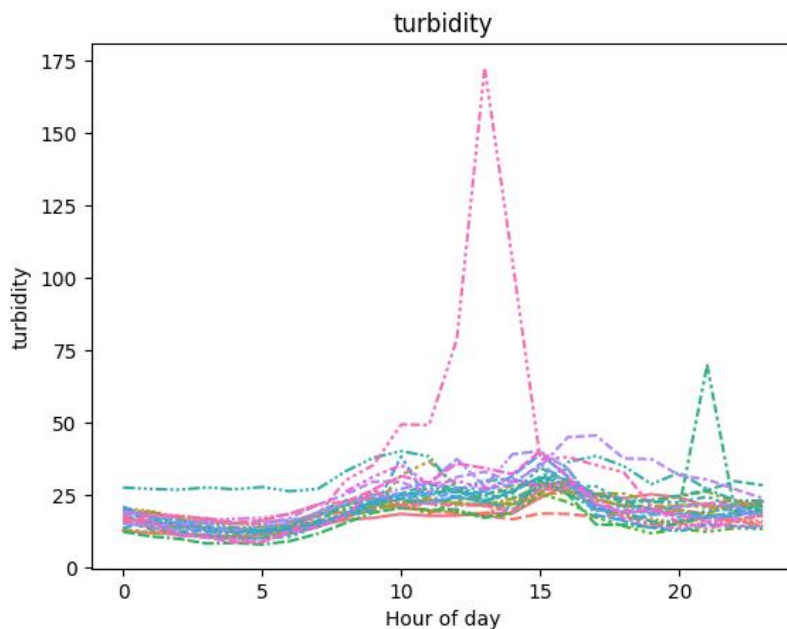
Figura 59

Gráfico de profundidad Secci vs hora del día



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Figura 60
Gráfico de Turbidez vs hora del día



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Y podemos apreciar que al igual que con las variables ambientales, se observa un marcado comportamiento periódico.

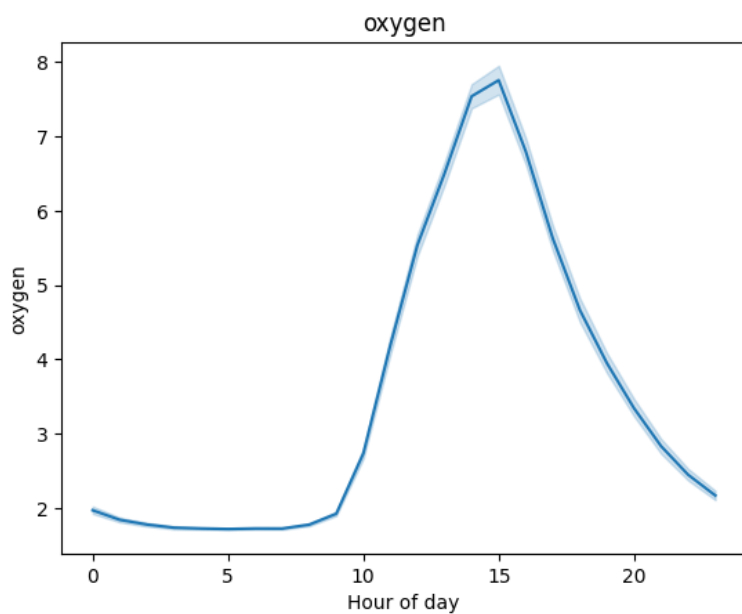
Ahora calculamos la media para cada hora del día de las variables ambientales y la graficamos junto con el intervalo de confianza del 95%, esto se muestra desde la **Figura 61** a la **Figura 64**; estas se generan con los comandos:

```

1 varList=['oxygen', 'tempAgua', 'secci', 'turbidity']
2 for i in varList:
3     sns.lineplot(data=dfAgua, x='hourofday', y=i, legend=False)
4     plt.title(i)
5     plt.xlabel('Hour of day')
6     plt.ylabel(i)
7     plt.show()
8     print('Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de
Python versión 3.12.12')
```

Figura 61

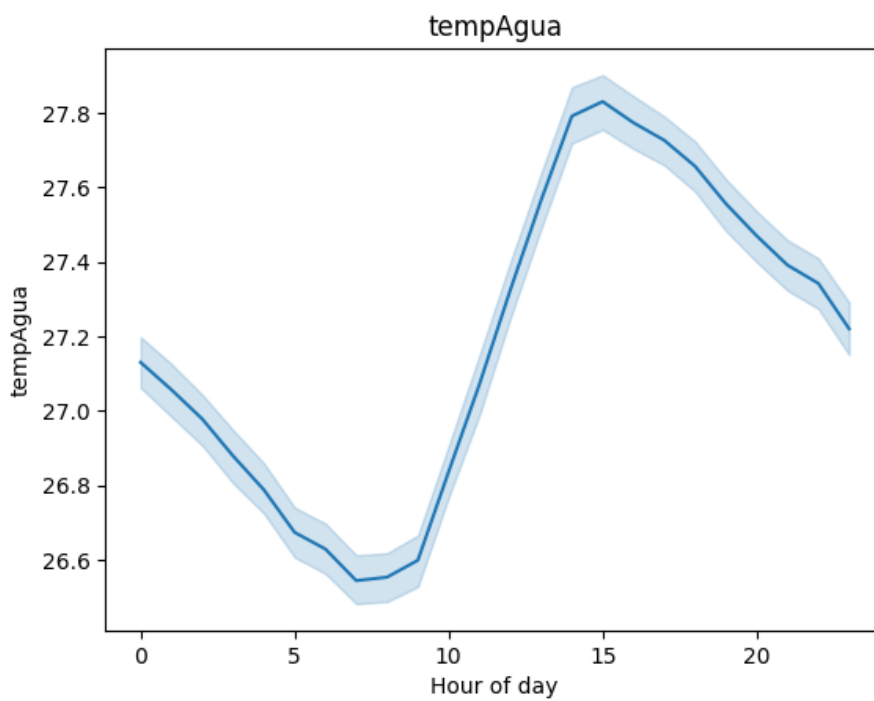
Gráfico de Promedio de oxígeno disuelto del agua vs Hora del día



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Figura 62

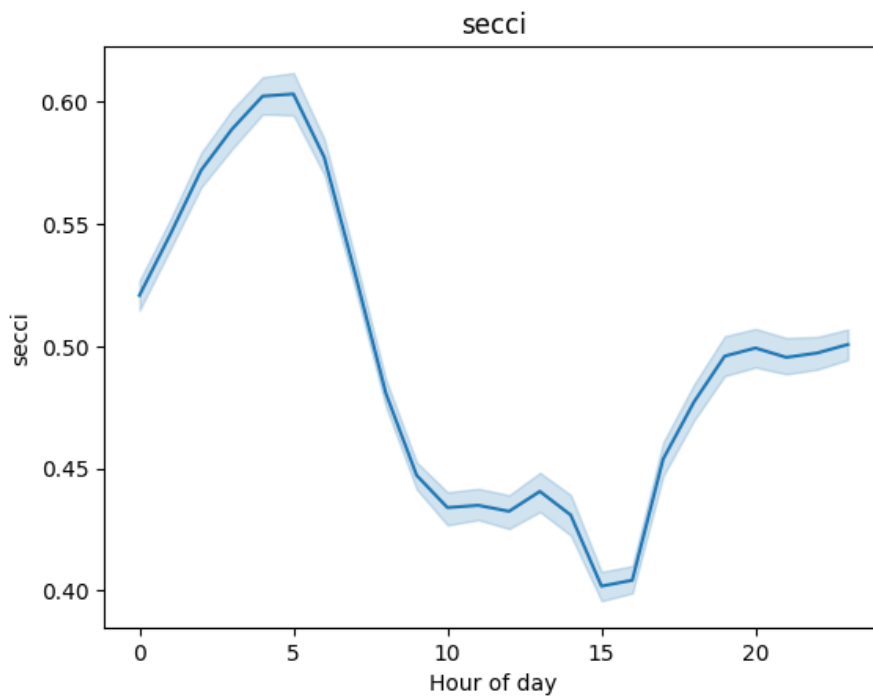
Gráfico de Promedio de Temperatura del agua vs Hora del día



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Figura 63

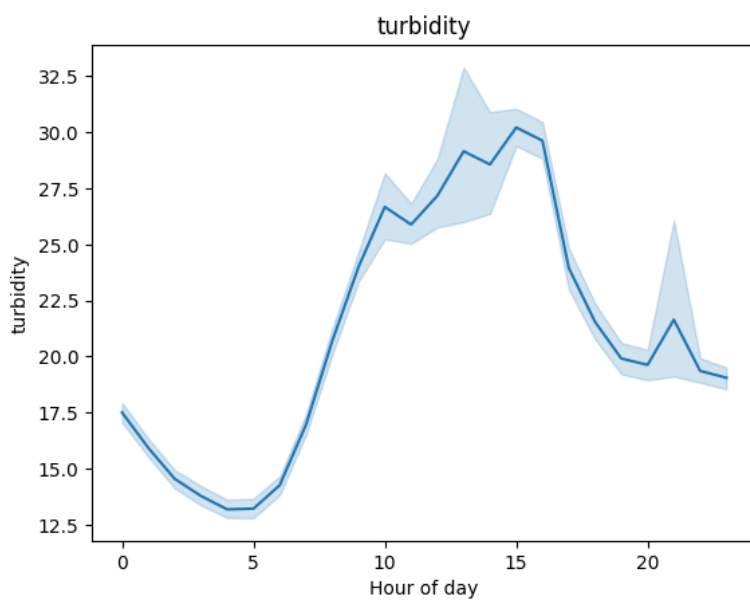
Gráfico de Promedio de profundidad Secci vs Hora del día



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Figura 64

Gráfico de Promedio de Turbidez vs Hora del día



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Obtenemos parámetros estadísticos y correlación entre las variables, usando la instrucción (para los datos de estadística descriptiva):

```
1 dfAgua[varList].describe()
```

De lo cual se obtienen los datos de la **Tabla 19**

Tabla 19
Estadística descriptiva de variables de calidad del agua

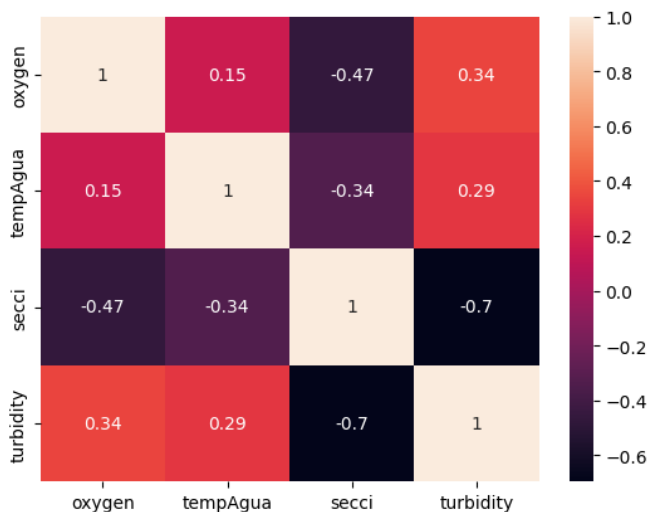
	oxygen	tempAgua	secci	turbidity
count	22700.000000	22700.000000	6966.000000	6966.000000
mean	3.535121	27.188706	0.494799	21.083867
std	2.658252	1.172840	0.086473	13.037814
min	1.275842	23.921763	0.091177	6.300000
25%	1.772918	26.403991	0.434965	15.070000
50%	2.060172	27.238333	0.490584	19.140000
75%	4.782737	27.947463	0.551424	24.480000
max	15.648480	30.238550	0.844705	597.690000

Nota: tabla generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Y para los datos de correlación, se usan los comandos listados a continuación, mismos que dan como resultado, lo mostrado en la **Figura 65**:

```
1. corr=dfAgua[varList].corr()
2. sns.heatmap(corr,annot=True)
3. plt.show()
```

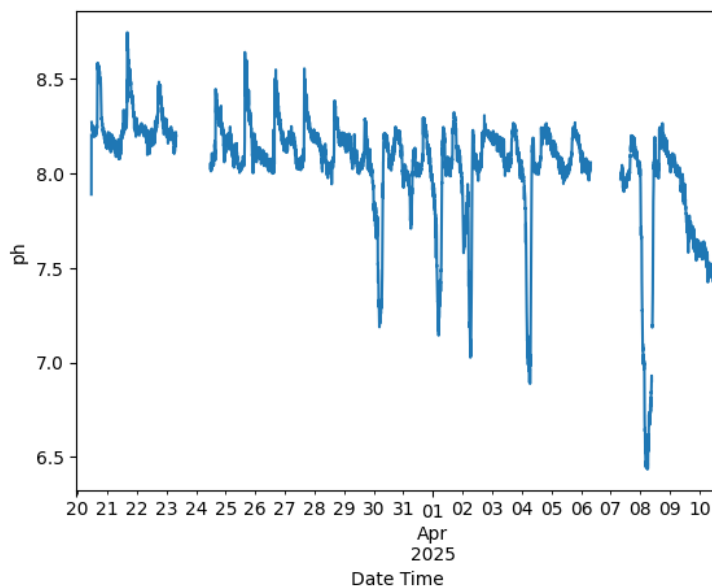
Figura 65
Correlación entre variables de calidad del agua



Nota: tabla generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

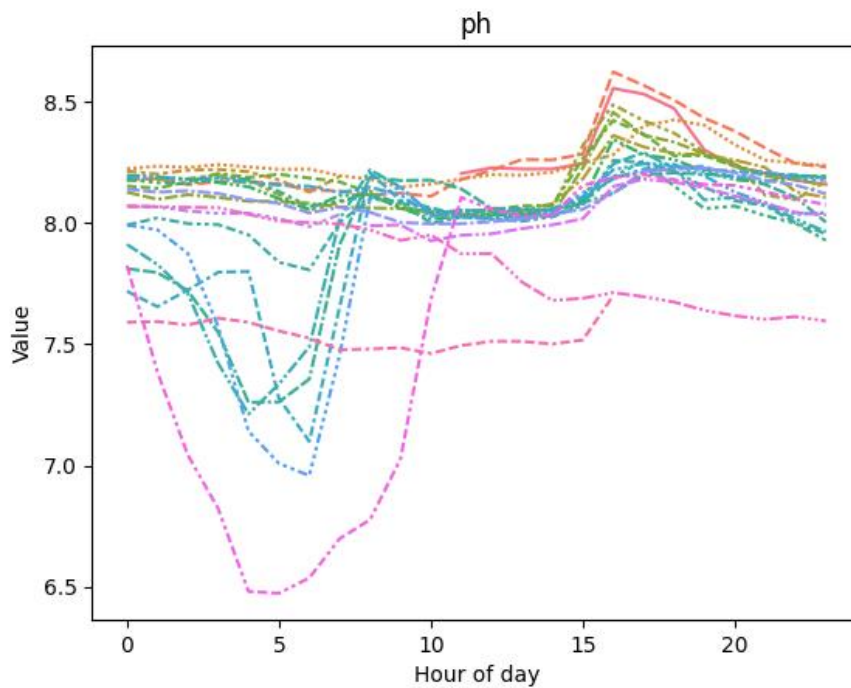
Hacemos lo mismo con los datos de PH del agua y generamos los gráficos (de la **Figura 66** a la **Figura 68**) y parámetros estadísticos (**Tabla 20**):

Figura 66
Gráfica de PH vs tiempo



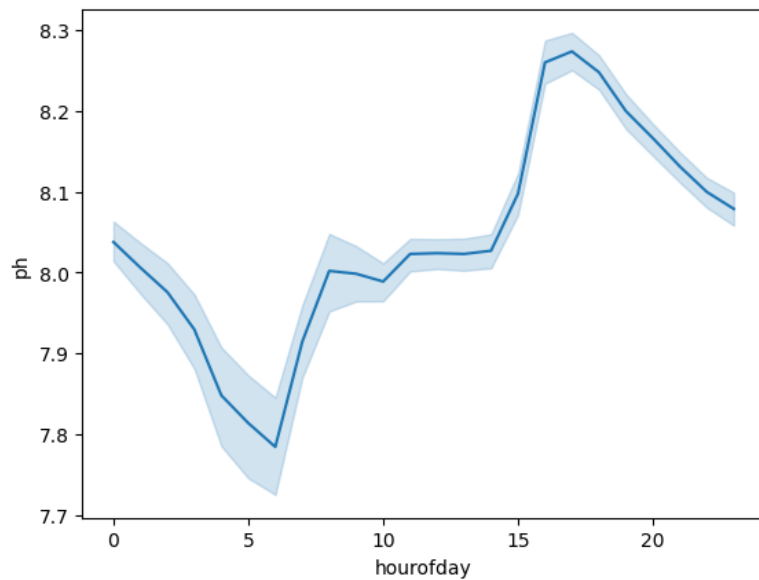
Nota: gráfica generada con la biblioteca "matplotlib" de Python versión 3.12.12

Figura 67
Gráfico de PH vs hora del día



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Figura 68
Gráfico de promedio de PH vs hora del día



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Tabla 20
Estadística descriptiva de PH

	PH
count	5427.000000
mean	8.040416
std	0.294848
min	6.437500
25%	8.016590
50%	8.098957
75%	8.197401
max	8.743855

Nota: Tabla generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

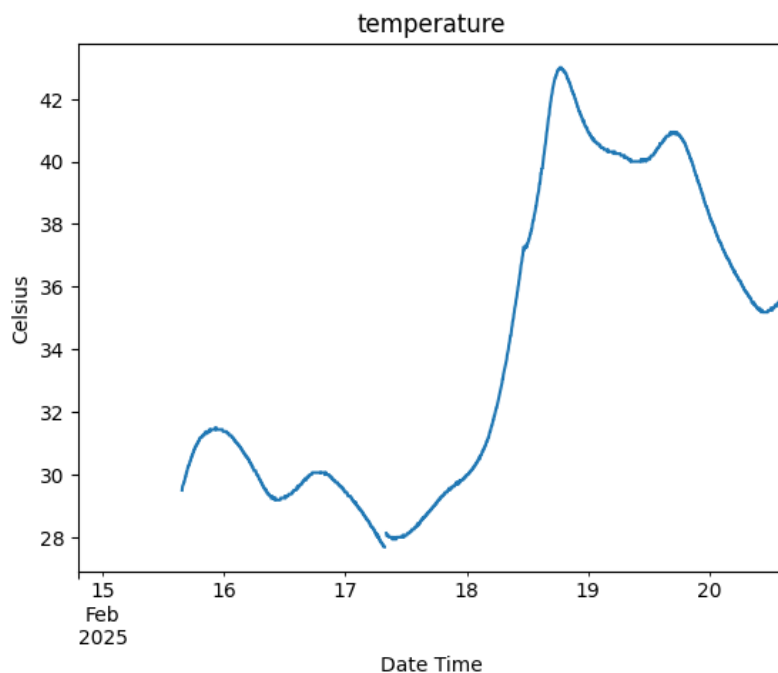
Estación de fermentación de cacao

Cargamos y reestructuramos los datos obtenidos de la plataforma IoT y posteriormente realizamos gráficos de las variables versus el tiempo (ver **Figura 69** y **Figura 70**):

```
1 data=json.load(open('cacao.json'))
2 dfList=[]
3 data['temperature']=data['temp_D18S20']
4 del data['temp_D18S20']
5 for k,v in data.items():
6     ts=[i['ts'] for i in v]
7     val=[float(i['value']) for i in v]
8     tz='America/El_Salvador'
9     index=pd.to_datetime(ts,unit='ms',utc=True).tz_convert(tz)
10    df=pd.DataFrame(val,index=index,columns=[k])
11    dfList.append(df)
12 dfCacao=pd.concat(dfList,axis=1)
13 dfCacao=dfCacao.resample('5min').mean()
14 varList=['temperature','ph']
15 unitList=['Celsius','Celcius','PH']
16 for i,v in enumerate(varList):
17     plt.figure()
18     dfCacao[v].plot(title=v)
19     plt.xlabel('Date Time')
20     plt.ylabel(unitList[i])
21     plt.show()
22     print('Nota: gráfica generada con la biblioteca "matplotlib"
de Python versión 3.12.12')
```

Figura 69

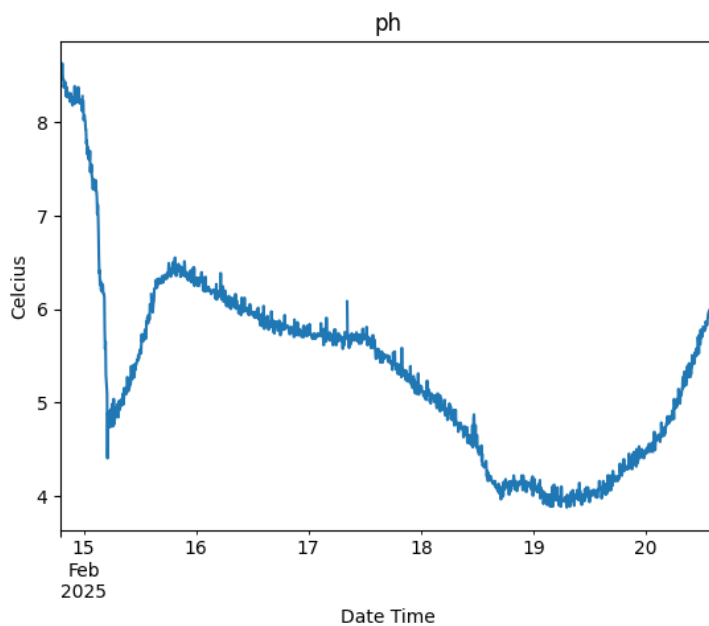
Gráfico de temperatura de pulpa de cacao vs tiempo



Nota: gráfica generada con la biblioteca "matplotlib" de Python versión 3.12.12

Figura 70

Gráfico de pH de cacao versus tiempo



Nota: gráfica generada con la biblioteca "matplotlib" de Python versión 3.12.12

La **Tabla 21** muestra la estadística descriptiva de las variaciones tanto de la temperatura del mosto de cacao, como de su Ph

Tabla 21
Estadística descriptiva de la temperatura y Ph

	temperature	ph
count	1418.000000	1661.000000
mean	34.063977	5.339925
std	4.923796	1.019010
min	27.687500	3.872965
25%	29.625000	4.469055
50%	31.437500	5.407166
75%	39.921875	5.905538
max	43.000000	8.631922

Nota: Tabla generada con la biblioteca "matplotlib" de Python versión 3.12.12

Con el prototipo construido durante el desarrollo del presente trabajo, solamente se pudo realizar un proceso de fermentación de cacao, ya que el volumen de la cámara de fermentación era considerable y ello dificultó la obtención de suficiente cantidad de cacao, para realizar pruebas adicionales. No obstante, posteriormente un grupo de estudiantes de pregrado, continuo con la construcción de una tómbola de menores dimensiones y realizo varias iteraciones con cargas de 15%, 25% y 75% de la capacidad de la tómbola, siguiendo los principios definidos en la primera prueba. A continuación, se muestra el análisis de los datos recopilados por ellos.

Preparación de datos,

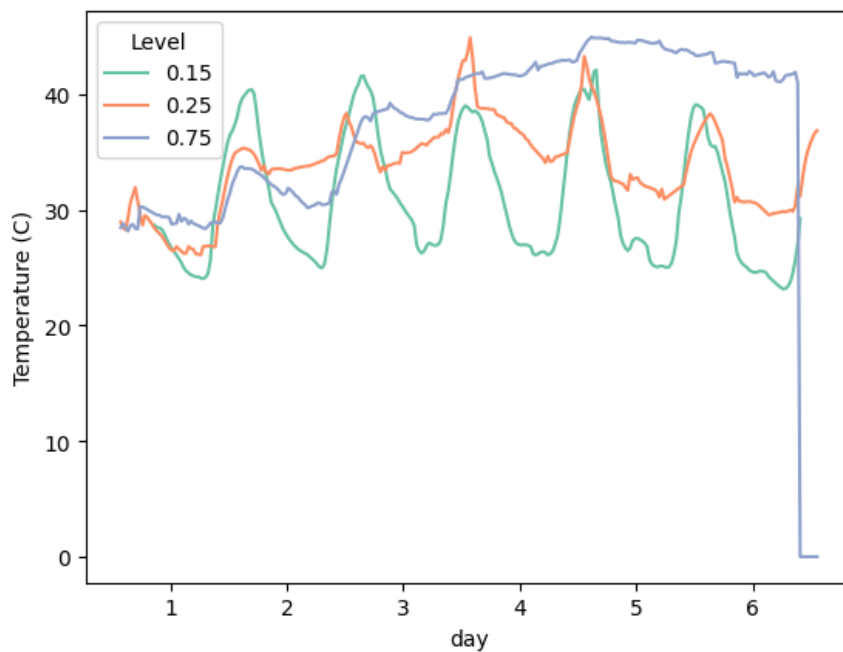
```

1 #cargamos los datos contenidos en un archivo excel
2 dfCacao2=pd.read_excel('cacao2.xlsx', parse_dates=['Timestamp'],
   index_col='Timestamp')
3 #se agrega una columna al dataframe que indica el tiempo, en días, a partir del día en
   que se inicia cada iteración
4 start=pd.to_datetime('2025-07-30')
5 dfCacao2.loc[dfCacao2['Level']==.15,['day']] = \
6   (dfCacao2[dfCacao2['Level']==.15].index-start).total_sec-
   onds() / (3600*24)
7 start=pd.to_datetime('2025-08-06')
8 dfCacao2.loc[dfCacao2['Level']==.25,['day']] = \
9   (dfCacao2[dfCacao2['Level']==.25].index-start).total_sec-
   onds() / (3600*24)
10 start=pd.to_datetime('2025-08-30')
11 dfCacao2.loc[dfCacao2['Level']==.75,['day']] = \
12   (dfCacao2[dfCacao2['Level']==.75].index-start).total_sec-
   onds() / (3600*24)
13 #se grafican las variables obtenidas para cada iteración en un mismo grafico
14 plt.figure()
15 sns.lineplot(data=dfCacao2,x='day',y='Temperature',hue='Lev-
   el',palette="Set2")
16 plt.ylabel('Temperature (C)')
17 plt.show()
18 print('Nota: gráfica generada con la biblioteca "matplotlib" de
   Python versión 3.12.12')
19 plt.figure()
20 sns.lineplot(data=dfCacao2,x='day',y='humidity',hue='Level',pal-
   ette="Set2")
21 plt.ylabel('Humidity (%)')
22 plt.show()
23 print('Nota: gráfica generada con la biblioteca "matplotlib" de
   Python versión 3.12.12')
24 plt.figure()
25 sns.lineplot(data=dfCacao2,x='day',y='pH',hue='Level',pal-
   ette="Set2")
26 plt.ylabel('pH (pH)')
27 plt.show()
28 print('Nota: gráfica generada con la biblioteca "matplotlib" de
   Python versión 3.12.12')

```

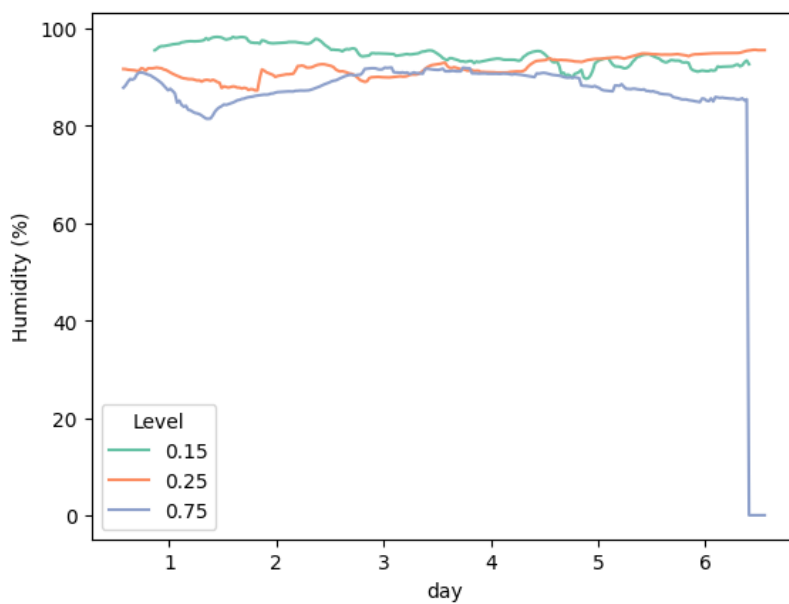
Generación de gráficas de variación de temperatura (**Figura 71**), humedad (**Figura 72**) y pH (**Figura 73**), con diversos volúmenes de carga.

Figura 71
Variaciones de Temperatura vs Volumen de carga



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

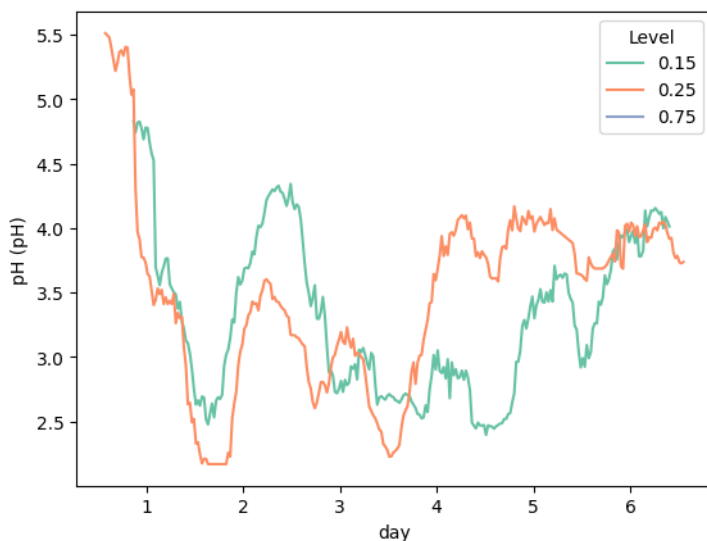
Figura 72
Variaciones de Humedad vs Volumen de carga



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Figura 73

Variaciones de pH vs Volumen de carga

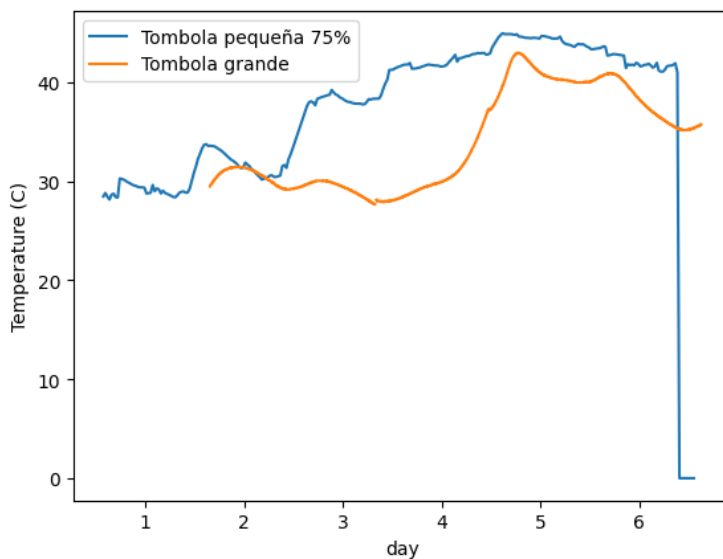


Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Además, se aprovechó la oportunidad para comparar el comportamiento de la temperatura interna del mosto de cacao, versus el tiempo de fermentación, obtenido en ambas tómbolas, lo que se muestra en la **Figura 74**.

Figura 74

Comparación de resultados de variación de temperatura obtenidos con ambas tómbolas

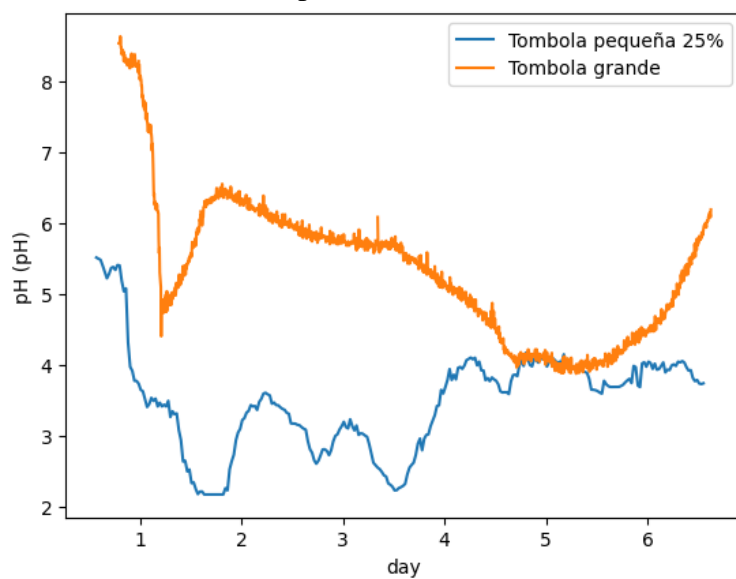


Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

Así mismo, se comparó la variación del pH, obtenido en los procesos de fermentación de ambas tómbolas, y los resultados se presentan en la **Figura 75**.

Figura 75

Comparación de resultados de pH obtenidos con ambas tómbolas



Nota: gráfica generada con la biblioteca "seaborn" de Python versión 3.12.12

DISCUSIÓN:

Estación Meteorológica

- Las tecnologías de comunicación implementadas para enlazar los diferentes componentes de los prototipos propuestos (en especial LORA), fueron adecuadas para mantener la telemetría bajo las condiciones de los entornos en los que fueron instalados, mismos que se consideran representativos de las condiciones que se pueden encontrar en las diferentes zonas de El Salvador, especialmente la vegetación abundante. En los tramos con enlace LORA, el nivel de señal recibida se mantuvo en -100dBm de RSSI (Received Signal Strength Indicator) y la disponibilidad de las comunicaciones en la banda de funcionamiento de estos enlaces (900MHz), fue superior al 98%, del tiempo que duraron las pruebas; (algunas superaron los 4 meses)
- El prototipo de la estación meteorológica, tuvo un desempeño aceptable y coherente en la medición de variables ambientales, y sus errores absolutos máximos se mantuvieron dentro de rangos aceptables al compararlos con información proveniente de otras fuentes: NASA POWER y WeatherAPI. Para la variable de humedad relativa, el error máximo fue de 7.4 % respecto a WeatherAPI y 10.1 % frente a NASA, y estos errores pudieron deberse a factores locales como el follaje denso que cubrió la estación en el sitio en donde se colocó. En cuanto a la detección de temperatura del aire, los datos registrados presentaron errores máximos de 1.3 °C con respecto a WeatherAPI y 2.1 °C con respecto a los datos de la NASA, observándose un ligero aumento de este a medida que el tiempo avanza; la causa de esto podría ser a la acumulación de humedad o radiación local, lo que implica la necesidad de programar recalibraciones periódicas. En cuanto al comportamiento de los datos del sensor de velocidad de viento, se observa que los errores máximos fueron de 1.0 m/s y 1.6 m/s, si se comparan con la información de WeatherAPI y NASA (respectivamente), con una tendencia decreciente hacia el final del periodo de prueba. En conjunto, los resultados validan el funcionamiento de la estación, como alternativa de bajo costo para el monitoreo ambiental, especialmente en zonas rurales. No obstante, es importante tomar en cuenta la necesidad de implementar procesos de mantenimiento preventivos para mantener el grado de precisión inicial.

Estación de Monitoreo de Calidad de Agua:

- Dado que el sitio en el cual se instaló la estación de monitoreo de calidad del agua, presenta una alta concentración de sedimentos orgánicos que continuamente generan metano, y además tiene presencia abundante de micro algas que tienden a adherirse a las partes sensibles de los sensores, este tipo de aplicaciones deberían considerar procesos de limpieza y recalibración de estos, al menos, cada 3 o 4 meses.
- El dato de correlación entre el valor proporcionado por el turbidímetro y su equivalente a dato Secchi (-0.7), presenta un comportamiento similar al observado en mediciones manuales, es

decir que los cambios en la turbidez están asociados consistentemente con los cambios inversos en la profundidad equivalente del disco Secchi, con lo cual el prototipo logra automatizar esta medición y adaptarla a los procedimientos “tradicionales” que se emplean en nuestro medio

- Así mismo el luxómetro mostró disminuciones significativas en el valor detectado, a partir de las 14:30 horas, producto de la sombra generada por la abundante vegetación del sitio, esto provocó (en consecuencia) una marcada reducción en los valores de oxígeno disuelto del reservorio y aumento en la turbidez

Monitoreo del Proceso de Fermentación

- En las primeras 48 horas del proceso de fermentación, se esperaba que la temperatura interna del mucilago de cacao, incrementara su valor desde el rango de 27°C-29°C hasta los 36°C-38°C no obstante, el sensor instalado mostró que esto no fue posible y un especialista consultado (Ing. Agr. Erick Christopher Guardado Deras, docente de la Facultad de Agronomía de la UES), indicó que la causa principal, fue la cantidad de cacao que se colocó al interior del tambor, misma que no superó el 30% de la capacidad de dicho contenedor. Como método de corrección, sugirió realizar volteos manuales de la mezcla, lo que propició la reacción esperada reflejándose en el dato de temperatura interna, que mostró una variación desde los 28°C al inicio del tercer día, hasta un valor pico de 44°C en el cuarto día de fermentación, lo cual es indicativo de que este proceso se desarrolla conforme a lo esperado; esto demuestra la importancia del monitoreo constante de estos parámetros, lo que ayuda a tomar acciones correctivas de forma oportuna. Así mismo, el prototipo desarrollado, incluyó sensores de temperatura interna del tambor y de temperatura interna del mucilago, pero no se consideró el uso de sensores de las condiciones ambientales del sitio en el cual se instaló el tambor, lo cual es importante para evaluar la influencia de estas condiciones en los procesos de tratamiento post cosecha del cacao, lo que debería tomarse en cuenta en ensayos futuros.

Referencias bibliograficas

- [1] R. R. Bhujel and H. G. Joshi, "Factors influencing the adoption of sustainable agricultural practices in rural regions of developing countries: a review," *Food Res.*, vol. 8, no. 4, pp. 81–89, Jul. 2024, doi: 10.26656/fr.2017.8(4).400.
- [2] B. E. Bravo-Ureta, E. Njuki, A. C. Palacios, and L. Salazar, "Agricultural Productivity in El Salvador: A Preliminary Analysis," Washington, D. C., Feb. 2022. doi: 10.18235/0004020.
- [3] R. D. Norton, "El Salvador," in *The Competitiveness of Tropical Agriculture*, Elsevier, 2017, pp. 207–229. doi: 10.1016/B978-0-12-805312-6.00009-X.
- [4] I. Cornejo, "Reconocen a El Salvador como exportador de cacao fino," Jan. 2024. [Online]. Available: <https://stornia.com.mx/mundo/el-salvador/commodities-sv/2024/01/12/reconocen-a-el-salvador-como-exportador-de-cacao-fino/>
- [5] A. Villacis, J. Alwang, and V. Barrera, "Cacao value chains and credence attributes: lessons from Ecuador," *J. Agribus. Dev. Emerg. Econ.*, vol. 12, no. 4, pp. 549–566, Aug. 2022, doi: 10.1108/JADEE-10-2021-0267.
- [6] B. S. Rosales-Valdívía, L. García-Curiel, J. G. Pérez-Flores, E. Contreras-López, E. Pérez-Escalante, and C. García-Mora, "Influencia de la fermentación del cacao y del uso de cultivos iniciadores sobre las características organolépticas del chocolate: un análisis integral," *Pädi Boletín Científico Ciencias Básicas e Ing. del ICBI*, vol. 12, no. 23, pp. 31–43, Jul. 2024, doi: 10.29057/icbi.v12i23.12047.
- [7] MAG, "Política Nacional de Pesca y Acuicultura 2015-2030," https://www.mag.gob.sv/wp-content/uploads/2021/06/2Politica_Nacional_de_Pesca_y_Acuicultura_2015_ULTIMA_VERSION-1.pdf. [Online]. Available: https://www.mag.gob.sv/wp-content/uploads/2021/06/2Politica_Nacional_de_Pesca_y_Acuicultura_2015_ULTIMA_VERSION-1.pdf
- [8] E. M. Martínez Perez and R. E. López de Jiménez, "Diseño de sistema multiplataforma innovador para el monitoreo y control de variables microambientales de un invernadero y una estación acuícola aplicando e-Agricultura: propuesta para la Escuela Nacional de Agricultura," *ITCA, Editores*, San Salvador, pp. 68–68, Jan. 2021.
- [9] O. O. Flores-Cortez, J. M. Castro Elizondo, A. C. Flores Portillo, F. Arévalo, and C. O. Pocasangre, "An IoT-Based System for Water Parameters Monitoring. Case Study: Fish Farming in El Salvador," in *2024 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (MetroInd4.0 & IoT)*, IEEE, May 2024, pp. 123–128. doi: 10.1109/MetroInd4.0IoT61288.2024.10584126.
- [10] P. Bertoleti, *Proyectos con ESP32 y LoRa*. 2019.
- [11] SIGET, "CUADRO NACIONAL DE ATRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS (CNAF) DE LA REPÚBLICA DE EL SALVADOR," SIGET. [Online]. Available: https://www.jentel.mx/wp-content/uploads/2017/10/el_salvador.pdf
- [12] J. M. Hernando Rábanos, J. M., Mendo Tomás, L., & Riera Salís, *Comunicaciones Móviles*, Tercera Ed. Madrid, España, 2015.
- [13] E. A. Arias-Argueta, D. I. Orozco-Mejía, and W. D. Meléndez-Valle, "Estudio de cobertura

- radial para la implementación de una red de sensores con tecnología de radios de largo alcance (LoRa),” *Rev. Minerva*, vol. 7, no. 3, pp. 99–117, Oct. 2024, doi: 10.5377/revminerva.v7i3.18910.
- [14] AWS, “¿Qué es el Internet de las cosas (IoT)?” [Online]. Available: [https://aws.amazon.com/es/what-is/iot/#:~:text=con AWS IoT-,¿Qué es el Internet de las cosas \(IoT\)?,como entre los propios dispositivos.](https://aws.amazon.com/es/what-is/iot/#:~:text=con AWS IoT-,¿Qué es el Internet de las cosas (IoT)?,como entre los propios dispositivos.)
- [15] R. Alonso, “¿Qué es el Internet de las cosas (IoT),” ¿Por Qué Se Le Llama Así? [Online]. Available: <https://www.oracle.com/co/internet-of-things/what-is-iot/%0Ahttps://www.oracle.com/co/internet-of-things/what-is-iot/%0Ahttps://hardzone.es/reportajes/que-es/internet-cosas-iot/>
- [16] Grupo Caja Mar, “La importancia de la acuicultura en la alimentación del futuro,” 2023. [Online]. Available: <https://www.plataformatierra.es/actualidad/la-importancia-de-la-acuicultura-en-la-alimentacion-del-futuro>
- [17] S. V. Menon *et al.*, “Water physicochemical factors and oxidative stress physiology in fish, a review,” *Front. Environ. Sci.*, vol. 11, Sep. 2023, doi: 10.3389/fenvs.2023.1240813.
- [18] L. F. Quintana Fuentes and A. García Jerez, *Evaluación integral de la calidad sensorial del cacao*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2021. doi: 10.22490/9789586517782.
- [19] E. M. Castro-Alayo, G. Idrogo-Vásquez, R. Siche, and F. P. Cardenas-Toro, “Formation of aromatic compounds precursors during fermentation of Criollo and Forastero cocoa,” *Heliyon*, vol. 5, no. 1, p. e01157, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01157.
- [20] W. F. Teneda Llerena, *Mejoramiento del Proceso de Fermentación del Cacao. (Theobroma cacao L.) Variedad Nacional y Variedad CCN51*. Universidad Internacional de Andalucía, 2016. doi: 10.56451/10334/3743.
- [21] S. González, “REVISIÓN DE MÉTODOS PARA LA FERMENTACIÓN DE CACAO Y ANÁLISIS DE LA FERMENTACIÓN COMBINADA DE CACAO CRIOLLO Y FORASTERO,” 2021, *UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO, Bogota*. [Online]. Available: <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/server/api/core/bitstreams/6a0fb500-2239-4f08-bd48-9907a12a7746/content>
- [22] W. E. Gallegos Eras and C. Y. Erazo Gavilánez, “Diseño de un fermentador y secador solar piloto, para dos variedades de cacao (Theobroma cacao L), en el cantón El empalme provincia Guayas,” *Universidad Internacional SEK*, 2019. [Online]. Available: <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/3361>
- [23] A. Bahga and V. Madisetti, *Internet of Things. A Hands-On Approach*. India, 2014.
- [24] M. Xu, H. Liu, R. Beck, M. Reif, E. Emery, and J. Young, “Regional analysis of lake and reservoir water quality with multispectral satellite remote sensing images,” Dec. 2019. doi: 10.21079/11681/34933.
- [25] D. G. Bowers, E. M. Roberts, A. M. Hogue, K. A. Fall, G. M. Massey, and C. T. Friedrichs, “Secchi Disk Measurements in Turbid Water,” *J. Geophys. Res. Ocean.*, vol. 125, no. 5, May 2020, doi: 10.1029/2020JC016172.
- [26] J. Delegido *et al.*, “Turbidez y profundidad de disco de Secchi con Sentinel-2 en embalses con diferente estado trófico en la Comunidad Valenciana,” *Rev. Teledetección*, no. 54, p. 15, Dec. 2019, doi: 10.4995/raet.2019.12603.
- [27] ISSUU, “Ecosistemas Marinos,” ISSUU. [Online]. Available: <https://issuu.com/seagrantpr/docs/guia-hierbas-marinas/s/17969558>

- [28] O. I. ThingsBoard, Platform, "Thingsboard," <https://thingsboard.io/>. [Online]. Available: <https://thingsboard.io/>
- [29] Openwrt.org, "Openwrt Proyect," <https://openwrt.org/>. [Online]. Available: <https://openwrt.org/>
- [30] O. VPN, "OPEN VPN," <https://openvpn.net/community/>. [Online]. Available: <https://openvpn.net/community/>