

Caracterización del estrés hídrico aplicando cobertura de suelo tradicional en cultivos orgánicos

Autor:
Valentina Velasquez Quevedo

Universidad de Cundinamarca
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica
Fusagasugá, Colombia
2025

Caracterización del estrés hídrico aplicando cobertura de suelo tradicional en cultivos orgánicos

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de
ingeniero electrónico

Autor(es):
Valentina Velasquez Quevedo

Director: Ing. Mónica Espinosa Buitrago, PhD
Co-director: Lic. Bernabé Buitrago M.Sc

Universidad de Cundinamarca
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica
Fusagasugá, Colombia
2025

Dedicatoria

A Dios, por guiar mis pasos, fortalecer mi espíritu en los momentos de dificultad y brindarme la sabiduría necesaria para culminar este camino con fe y gratitud.

A mis padres, por su amor incondicional, por ser ese ejemplo de fortaleza y resiliencia que me impulsa cada día, y por enseñarme que los sueños se alcanzan con esfuerzo, disciplina y corazón.

A mi familia, por brindarme el apoyo necesario para sacar mi carrera adelante, por ser mi mayor motivación y acompañarme con comprensión, paciencia y cariño en cada etapa de este proceso.

A todos aquellos que, con su apoyo constante y su confianza, fueron parte esencial de este recorrido académico y personal, dejando en mí una huella de inspiración y gratitud.

Agradecimientos

A la Universidad de Cundinamarca, por brindarme las herramientas necesarias para mi formación como profesional. Gracias por abrirme las puertas a un mundo de aprendizaje que me permitió crecer académicamente y personalmente.

A la Doctora Mónica Espinosa Buitrago, por su guía, apoyo y confianza a lo largo de este proyecto. Su compromiso, sabiduría y dedicación fueron una fuente de inspiración constante, impulsándome a dar lo mejor de mí. Gracias por su acompañamiento cercano, por su paciencia en cada etapa del proceso y por transmitir no solo conocimiento, sino también pasión por la investigación. Su liderazgo y ejemplo marcaron profundamente mi formación profesional y personal.

Al Licenciado Bernabé Buitrago, por compartir su conocimiento y experiencia con gran generosidad. Su orientación como estadista del proyecto fue esencial para el análisis de los resultados y para el fortalecimiento académico de este trabajo. Agradezco profundamente su disposición, su tiempo y sus valiosas enseñanzas, que contribuyeron al crecimiento de este proyecto y a mi aprendizaje como futura profesional.

Al Mercado Orgánico del Sumapaz, por permitirnos ser parte de su entorno, abrirnos sus puertas y brindarnos el conocimiento necesario sobre la agricultura orgánica, aportando un valor a la realización de este proyecto. Su confianza y colaboración fueron fundamentales para comprender las dinámicas reales del trabajo agrícola y cuidados del suelo. Gracias por su compromiso y por recordarnos que la tecnología y la tradición pueden coexistir en armonía para el cuidado del planeta.

A Juan Camilo Cortés Morales, ingeniero agrónomo del proyecto, por abrirnos las puertas de su casa y compartir con nosotros su sabiduría sobre los procesos que se llevan a cabo en los cultivos orgánicos. Su orientación práctica y su experiencia en el campo fueron determinantes para el desarrollo de este trabajo. Agradezco su amabilidad, su disposición para enseñar en cada visita y prueba de campo. Su apoyo permitió comprender de manera más profunda la esencia de la agricultura orgánica y su valor en la sostenibilidad ambiental y social.

A Juan David Guzmán, por su valioso aporte de conocimiento y apoyo en el desarrollo tecnológico del proyecto, contribuyendo con ideas, soluciones y acompañamiento constante en los procesos más exigentes. Gracias por estar presente en cada momento, por motivarme a seguir adelante y por ser no solo un compañero en este trabajo, sino también en la vida. Su compromiso y amor fueron una parte esencial de esta meta alcanzada.

A los profesores del Programa de Ingeniería Electrónica, quienes con su enseñanza, exigencia y dedicación formaron en mí las bases del conocimiento técnico y ético dejando una huella significativa en mi proceso formativo.

Y finalmente, a mis amigos, quienes han sido parte fundamental de mi crecimiento como estudiante y como persona. Su apoyo, compañía y confianza fueron un impulso constante que me motivó y guió en cada etapa de este recorrido académico y personal. Gracias por compartir risas, desafíos y logros que hicieron de este camino una experiencia inolvidable.

Resumen

El presente proyecto propone caracterizar el estrés hídrico en cultivos orgánicos de apio y brócoli, mediante el uso de cobertura de suelo orgánica elaborada con mulch de maíz, con el fin de analizar la eficacia de esta práctica tradicional frente a condiciones de cambio climático. La investigación busca determinar cómo la cobertura influye en la conservación de la humedad y la estabilidad térmica del suelo, a partir de la recolección y análisis de variables ambientales y del suelo.

Para ello, se realizó una caracterización inicial de los cultivos a través del levantamiento de requerimientos técnicos y agrícolas, identificando factores como tipo de riego, cobertura y características del terreno. Posteriormente, se implementaron dos escenarios experimentales (con y sin cobertura de suelo) conectados a una red de comunicación LoRaWAN, que permitió el registro continuo de datos de humedad, temperatura y pH. Estos datos fueron procesados mediante servicios de computación en la nube, lo que facilitó la analítica y la visualización del comportamiento de las variables en cada tratamiento.

Los resultados evidencian que el uso de mulch orgánico mejora la retención de humedad y la estabilidad del suelo, reduciendo el estrés hídrico y favoreciendo el desarrollo del cultivo. Asimismo, el sistema de monitoreo proporciona información confiable que permite a los agricultores tomar decisiones más informadas, fortaleciendo la relación entre las prácticas tradicionales campesinas y las tecnologías aplicadas a la agricultura orgánica.

En conjunto, este proyecto contribuye al desarrollo de herramientas tecnológicas sostenibles para el Mercado Orgánico del Sumapaz y abre la posibilidad de implementar, en trabajos futuros, sistemas de riego automatizado y expansión del monitoreo a otras fincas orgánicas de la región.

Palabras clave: Cultivos orgánicos, cobertura de suelo, estrés hídrico, analítica de datos.

Abstract

This project aims to characterize water stress in organic celery and broccoli crops through the use of organic soil cover made from corn mulch, in order to analyze the effectiveness of this traditional practice under climate change conditions. The research seeks to determine how soil coverage influences moisture conservation and thermal stability, based on the collection and analysis of environmental and soil variables.

A preliminary characterization of the crops was carried out through the assessment of technical and agricultural requirements, identifying factors such as irrigation type, soil coverage, and field characteristics. Subsequently, two experimental scenarios (with and without soil cover) were implemented and connected to a Lo-RaWAN communication network, which enabled the continuous recording of soil moisture, temperature, and pH data. These data were processed through cloud computing services, facilitating analysis and visualization of the behavior of the variables in each treatment.

The results show that the use of organic mulch improves soil moisture retention and stability, reducing water stress and promoting better crop development. Likewise, the monitoring system provides reliable information that allows farmers to make more informed decisions, strengthening the link between traditional agricultural practices and modern technologies applied to organic farming.

Overall, this project contributes to the development of sustainable technological tools for the Mercado Orgánico del Sumapaz and opens the possibility of implementing, in future work, automated irrigation systems and expanding monitoring to other organic farms in the region.

Keywords: Organic crops, soil cover, water stress, data analytics.

Índice

Dedicatoria	1
Agradecimientos	2
Resumen	3
Abstract	4
INTRODUCCIÓN	10
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
OBJETIVOS DEL ESTUDIO	13
Objetivo general	13
Objetivos específicos	13
JUSTIFICACIÓN	14
ALCANCES Y LIMITACIONES	15
Alcances	15
Limitaciones	15
1. MARCO REFERENCIAL	16
MARCO REFERENCIAL	16
1.1. ESTADO DEL ARTE	16
1.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	19
1.2.1. Estrés Hídrico	19
1.2.2. Cobertura de suelo	20
1.2.3. Productos Orgánicos	20
1.2.4. Apio	21
1.2.5. Brócoli	21
1.2.6. Monitoreo Ambiental	21
1.2.7. Rotación de Cultivos Orgánicos	21
1.2.8. Policultivos	22
1.2.9. Manejo del suelo en cultivos	23
1.2.10. Ph en el suelo	23
1.2.11. Variables medio ambientales	23
1.2.12. Analítica de datos	24
1.2.13. LoRaWAN	25
2. DISEÑO METODOLÓGICO	26
2.1. METODOLOGÍA	26
Fase 1: Analizar los cultivos orgánicos de apio y brócoli	27
Fase 2: Implementar escenarios de medición de estrés hídrico con y sin la cobertura de suelo	27

Fase 3: Analítica de datos con y sin cobertura de suelo para establecer el comportamiento del método tradicional haciendo uso de herramientas de computación en la nube.	28
3.1. ANÁLISIS EN LEVANTAMIENTO DE REQUERIMIENTOS EN CULTIVOS ORGÁNICOS DE APIO Y BRÓCOLI	29
3.1.1. Cultivos Orgánicos	29
3.1.2 Caracterización de cultivos orgánicos de brócoli y Apio	30
3.1.3. Estrés hídrico en los cultivos orgánicos	31
3.1.4. Modelado matemático del estrés hídrico	31
3.1.5. Análisis para la identificación de condiciones de variables	33
3.2. DISEÑO	37
3.2.1. Diagramas de Casos de Uso	37
3.2.2. Diseño y caracterización del sistema	37
3.3. IMPLEMENTACIÓN	46
3.3.1. Identificación de escenarios de medición	47
3.3.2. Implementación de la red LoRaWAN	49
3.3.4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	65
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
4.1. ANÁLISIS DEL SUELO EN PROCESO DE PREPARACIÓN DEL SUELO SIN COBERTURA	70
4.1.1. Humedad de Suelo	70
4.1.2. Temperatura de Suelo	71
4.1.3. pH del Suelo	71
4.2. ANÁLISIS DEL SUELO CON SIEMBRA Y COBERTURA	72
4.2.1. Humedad de Suelo	72
4.2.2. Temperatura de suelo	73
4.2.3. pH del suelo:	73
4.3. ANÁLISIS DEL ÍNDICE EMPÍRICO DE ESTRÉS HÍDRICO (IEHE)	74
4.3.1 Análisis de tiempo de recuperación del suelo	76
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	77
5.1. CONCLUSIONES	77
5.2. TRABAJOS FUTUROS	78
Apéndice 1: CALIBRACIÓN DE SENSORES	80
Anexo A. Calibración del sensor de pH	80
Anexo B. Calibración del sensor Dragino LSN50	82
Anexo c. Calibración del sensor Dragino LHT65N	84

Índice de figuras

1.	Metodología	26
2.	Triángulo textura del suelo [1].	35
3.	Metodo Tradicional.	37
4.	Proceso propuesto con tecnología IoT.	37
5.	Componentes sensor de pH.	39
6.	Componentes sensor de pH.	40
7.	Sensor Dragino LSN50	41
8.	Sensor Dragino LHT65N.	42
9.	Sistema de Cola	44
10.	Flujo de datos.	44
11.	Arquitectura planteada	45
12.	Distribución de sensores	47
13.	Sensores IoT	49
14.	Perfiles de los dispositivos registrados en el servidor ChirpStack.	51
15.	Ingreso a Mikrotik wAP LR9 Kit por Winbox	52
16.	Configuración de UDP hacia ChirpStack	52
17.	Instalacion de Docker para ChirpStack en Raspberry Pi	54
18.	Publicación de mensajes en ChirpStack	54
19.	Contenedores activos en la Raspberry Pi 4 tras la instalación de ChirpStack mediante Docker.	55
20.	Flujo captura de datos desde ChirpStack a la base de datos local.	56
21.	Flujo de datos desde la base local hacia AWS IoT Core mediante el sistema en cola.	57
22.	Arquitectura implementada en AWS.	59
23.	Proceso de Almacenamiento en AWS.	60
24.	Diagrama de Flujo de la Lambda Almacenamiento.	61
25.	Procesamiento de los datos en AWS.	61
26.	Diagrama de flujo de la función Lambda Procesamiento.	62
27.	Capa analítica modelado del IEHE.	63
28.	Capa de análisis estadístico con la función Lambda Análisis IEHE.	64
29.	Formato JSON, como llegan los datos.	66
30.	Tabla de datos en DynamoDB.	66
31.	Flujo de limpieza, reconstrucción y visualización de datos en AWS.	68
32.	Base de Datos en QuickSigth	69
33.	Humedad de suelo sin cobertura	70
34.	Temperatura del suelo sin cobertura	71
35.	pH del suelo sin cobertura	72
36.	Humedad del suelo con cobertura	72
37.	Temperatura del suelo con cobertura	73
38.	pH del suelo con cobertura	74
39.	Indice Empírico de Estrés Hídrico (IEHE) con cobertura de suelo	75
40.	Duraciones de los eventos del Indice Empírico del Estrés Hídrico (IEHE)	76

41. Comparación entre el sensor industrial y el sensor de pH en la muestra 1.	81
42. Comparación entre el sensor industrial y el sensor de pH en la muestra 2.	81
43. Comparación entre el sensor industrial y el sensor de pH en la muestra 3.	82
44. Comparación de humedad entre el sensor industrial y LSN50. . .	83
45. Comparación de temperatura entre el sensor industrial y LSN50. .	83
46. Calibración sensor LHT65.	84
47. Calibración sensor LHT65N humedad relativa.	84
48. Calibración sensor LHT65 temperatura de suelo.	85

Índice de tablas

1.	Especificaciones técnicas del sensor Dragino LSN50v2-S31 [2]. . .	41
2.	Especificaciones técnicas del sensor Dragino LHT65N [3].	42
3.	Rangos de humedad, temperatura y pH para cultivos de brócoli y apio [4, 5].	49
4.	Definición operacional de las variables del estudio.	50
5.	Parámetros de configuración del Gateway LoRaWAN	53
6.	Parámetros del servidor local con ChirpStack en Raspberry Pi 4 . .	58
7.	Porcentaje de categorías del estrés hídrico con y sin cobertura. . .	75

INTRODUCCIÓN

En la región del Sumapaz surge una asociación de campesinos dedicada a la agricultura orgánica, un modelo que promueve el equilibrio con el medio ambiente, rechazando el uso de pesticidas y fertilizantes sintéticos. Este enfoque busca preservar la salud del suelo, mejorar la calidad de los alimentos y fomentar la sostenibilidad en los ámbitos ambiental, social y económico. Sin embargo, este tipo de agricultura enfrenta hoy un reto creciente: el cambio climático. Las sequías prolongadas, los periodos de lluvia excesiva y las variaciones extremas de temperatura someten a los cultivos a un constante estrés hídrico, reduciendo su crecimiento, afectando la calidad de los productos y aumentando su vulnerabilidad frente a plagas y enfermedades.

Como respuesta, los agricultores del Mercado Orgánico del Sumapaz han recurrido a prácticas tradicionales de conservación del suelo, entre ellas el uso de coberturas naturales (mulch) elaboradas con residuos de maíz, que ayudan a retener la humedad y proteger la tierra. Sin embargo, la eficacia real de estas prácticas no ha sido cuantificada con datos objetivos que permitan validar su impacto en el manejo del estrés hídrico.

En este contexto, el presente proyecto propone caracterizar el estrés hídrico en cultivos orgánicos de apio y brócoli mediante la aplicación de coberturas de suelo tradicionales y el uso de tecnologías IoT (Internet de las Cosas). A través de una red de sensores conectados mediante el protocolo LoRaWAN, se presentan dos escenarios, con y sin cobertura del suelo, que permiten analizar variables ambientales y variables del suelo. Recolectando los datos en la nube que integran el almacenamiento, procesamiento y visualización mediante analítica de datos.

Este estudio busca no solo validar una práctica ancestral campesina, sino también proponer un modelo tecnológico accesible, escalable y adaptable a las condiciones del territorio. De esta manera, se pretende brindar a los agricultores del Sumapaz una herramienta basada en datos que potencie sus prácticas tradicionales, contribuya a la gestión sostenible del agua y fortalezca la resiliencia de los cultivos orgánicos frente al cambio climático.

Finalmente, el documento se estructura en cinco capítulos. El Capítulo 1 presenta el contexto, la justificación y los objetivos del proyecto. El Capítulo 2 expone el marco teórico, donde se abordan los conceptos de estrés hídrico, cobertura de suelo y tecnologías IoT. En el Capítulo 3 se describe la metodología implementada, detallando los escenarios experimentales y la arquitectura tecnológica utilizada. El Capítulo 4 presenta el análisis de los resultados obtenidos en los cultivos con y sin cobertura. Finalmente, el Capítulo 5 incluye las conclusiones generales y los trabajos futuros que se derivan de esta investigación.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La región del Sumapaz se encuentra ubicada sobre la cordillera oriental en Colombia; siendo conocida como la fuente hídrica más importante del país, cuenta con una extensión amplia, conformada por 10 municipios ubicados al sur del Departamento de Cundinamarca. Debido a su altitud y topografía, presenta una diversidad climática que permite el desarrollo de diferentes cultivos agrícolas en la región entre los que se destacan: frijol, café, papa, mora, tomate de árbol, uchua, arveja, maíz, naranja, limón, mango, banano, gulupa, espinaca, apio, brócoli, entre otros. [6]

En la ciudad de Fusagasugá se encuentra uno de los mercados orgánicos que ha cobrado relevancia en la producción de alimentos orgánicos en la región del Sumapaz. El Mercado Orgánico del Sumapaz, es una asociación de productores campesinos que transforma, comercializa alimentos y productos de la agricultura orgánica, consolidándose en el mercado orgánico para la mejora de los productos en sus nutrientes, rechazando el uso de químicos en sus cultivos y el suelo [7]. Según datos estadísticos de la Federación Internacional de Movimientos de Agricultura Orgánica (IFOAM), se producen 57 millones de hectáreas de cultivos de productos orgánicos en 78 países, con 47.281 hectáreas destinadas a este tipo de cultivo en Colombia [8]. Se define como cultivo orgánico a la producción de productos que no hacen uso de pesticidas industriales, insecticidas, fertilizantes y químicos, promoviendo la producción de alimentos sostenibles en los sectores ambientales, sociales y económicos, garantizando el equilibrio armónico con el medio ambiente [9].

Ahora bien, el cambio climático ha afectado a los agricultores debido al aumento de sequías, heladas e inundaciones, teniendo como resultado un estrés hídrico en sus cultivos, lo cual hace referencia al exceso de agua, como también a la falta de agua en el cultivo. Como consecuencia, se presenta una disminución en el crecimiento del cultivo, una menor calidad en producto y la aparición de plagas y enfermedades que representa una amenaza en los cultivos orgánicos al limitar las opciones de control de plagas y enfermedades sin recurrir a productos químicos sintéticos. Igualmente, se ve una variación en variables medio ambientales como variables de suelo.

Con relación a lo anterior, se han implementado practicas tradicionales para mitigar las afectaciones del estrés hídrico, entre ellas el uso de coberturas de suelo (mulch), elaboradas a partir de desechos orgánicos y vegetales que protegen la planta frente a la pérdida de humedad, conservan los nutrientes y mejoran la fertilidad del suelo. No obstante, persiste una problemática en el manejo eficiente del suelo, debido a que los agricultores no cuentan con herramientas tecnológicas que les permitan medir de forma precisa la eficiencia de estas prácticas ni analizar las variaciones de las variables ambientales y de suelo asociadas al estrés hídrico. En consecuencia, se propone el desarrollo de un sistema de monitoreo y análisis que sirva como apoyo a la caracterización del estrés hídrico, permitiendo

evaluar el impacto real de las coberturas de suelo en cultivos orgánicos. En consecuencia, se plantea la siguiente pregunta.

Pregunta de investigación: ¿Cómo se puede analizar el estrés hídrico mediante el uso de variables ambientales y de suelo que permitan evaluar la eficiencia de los métodos tradicionales en cobertura de suelo aplicado a cultivos orgánicos de apio y brócoli?

OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Objetivo general

Caracterizar el estrés hídrico en el funcionamiento de la cobertura de suelo orgánica basada en mulch de maíz aplicado en cultivos de apio y brócoli con el fin de comprobar este método tradicional.

Objetivos específicos

- Analizar los cultivos orgánicos de apio y brócoli para establecer variables medio ambientales, coberturas de suelo con maíz, factores del suelo y riego.
- Implementar escenarios de medición de estrés hídrico con y sin la cobertura de suelo con el fin de recolectar los datos de este método tradicional.
- Realizar la analítica de datos con y sin cobertura de suelo para establecer el comportamiento del método tradicional haciendo uso de herramientas de computación en la nube.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente, la agricultura orgánica ha cobrado relevancia en la agricultura tradicional ya que el uso de fertilizantes y productos químicos se ha vuelto una amenaza en el consumo en seres humanos. Por ende, se ha venido implementando en el mercado los cultivos orgánicos, los cuales rechazan el uso de productos químicos mejorando la calidad y el valor nutricional en los productos.

Debido a las extensas sequías o largos periodos de lluvias permitan la conservación de nutrientes en el suelo mediante métodos naturales que determinen las condiciones óptimas del suelo en un cultivo. Sin embargo, nace una problemática debido a que los métodos tradicionales para la determinación de pH y humedad no establece datos precisos que permita al agricultor observar el comportamiento de estas variables en el suelo. Asimismo, la humedad del suelo es un factor clave para la conservación de la tierra y la mejor calidad en el cultivo, pero debido a los cambios climáticos se ha visto afectado debido a las extensas sequías o largos periodos de lluvias, habiendo una afectación en la medición de variables medio ambientales como temperatura, luminosidad y humedad presentándose como una dificultad para los agricultores debido a las pérdidas de cosechas.

Teniendo en cuenta lo anterior se plantea una caracterización en el estrés hídrico aplicando cobertura de suelo de maíz para analizar la efectividad de los métodos tradicionales en cultivos de apio y brócoli. Por medio de este sistema se busca realizar una analítica de datos teniendo en cuenta los parámetros de pH y humedad y variables medio ambientales dentro de estos dos cultivos. En otras palabras, el uso de coberturas de suelo en cultivos mediante el uso de mulch, es una práctica que se basa en el cubrimiento del suelo con materiales orgánicos, que permite la retención de humedad y reducir la presencia de malas hierbas dentro del cultivo. En este caso se hará uso de rastrojo de maíz que permite una mayor concentración en la humedad y aporte de nutrientes al suelo.

Con este análisis se busca ofrecer una herramienta a los agricultores mediante el uso de nuevas tecnologías que permita la mejora en la calidad y producción de los cultivos orgánicos. Asimismo, poder que el agricultor identifique por medio de datos el comportamiento del cultivo respecto a los métodos tradicionales viendo la eficacia de estas prácticas, para el manejo de suelos cultivos orgánicos de apio y brócoli.

En el ámbito académico, esta propuesta muestra una contribución importante en el área de la agricultura orgánica, al involucrar el uso de tecnologías emergentes IoT que permita obtener y observar datos precisos en las mediciones de variables de suelo y medio ambientales teniendo en cuenta manejo de coberturas de suelo. Como también un aporte a la ingeniería electrónica, en la creación de servicios en nube que permita la analítica de datos en diferentes sistemas no solo aplicado a la agricultura, creando tendencias y modelos en los diferentes campos a los que se puede aplicar este proyecto.

ALCANCES Y LIMITACIONES

Alcances

- El proyecto permite realizar una analítica de datos dentro de cultivo de apio y brócoli mediante la medición de pH en el suelo, humedad del suelo y variables medio ambientales en este caso humedad, temperatura y luminosidad.
- Para la implementación del servicio se hace uso de una red de sensores que permita medir las variables de suelo (pH y humedad) y variables medio ambientales (temperatura, humedad y luminosidad) en el suelo. Estos datos son procesados y enviados de manera inalámbrica por medio de LoRaWAN a la nube. Donde se busca la recolección y el análisis de los datos recopilados.
- Obtener información sobre las variables del suelo y las condiciones ambientales, con el propósito de evaluar cómo se comportan los métodos tradicionales de manejo del suelo en los cultivos orgánicos de apio y brócoli.
- Implementar un sistema que sirva de apoyo para el Mercado Orgánico del Sumapaz, accediendo a herramientas tecnológicas que facilite la recopilación y análisis de datos para mejorar los procesos de producción.
- La implementación del proyecto con la versión gratuita de AWS permite el acceso a servicios recolección y análisis de datos en la nube, la cual recopila grandes conjuntos de datos, que los convierte en información práctica para establecer tendencias, patrones o relaciones de acuerdo con los datos.

Limitaciones

- El proyecto presenta ciertas limitaciones, en la precisión de los sensores disponibles para la medición de variables del suelo siendo limitada, debido a restricciones del presupuesto, afectando la calidad de los datos recolectados.
- Durante el desarrollo del proyecto en el municipio de Pasca, específicamente en la vereda donde se realizaron las mediciones, se presentaron condiciones climáticas variables, con episodios prolongados de lluvias durante el periodo de recolección de datos. Esta situación generó diferencias naturales en la humedad del suelo y en las condiciones ambientales.
- En la fase inicial del proyecto se presentaron limitaciones en la conectividad debido a que la finca se encuentra ubicada en una zona rural, ocasionando una pérdida de datos. Sin embargo, se implementó un servidor local para el almacenamiento y envío posterior de la información.

1. MARCO REFERENCIAL

Esta sección tiene como objetivo analizar diferentes proyectos e investigaciones relacionadas para la caracterización de estrés hídrico aplicando cobertura de suelo para la analítica de datos en cultivos orgánicos. En este sentido, se centra en los conceptos clave y los parámetros técnicos necesarios para su implementación eficiente. Además, se revisaran estudios académicos y de investigación que abordan distintas aplicaciones en el contexto de estrés hídrico, coberturas de suelo y analítica de datos.

1.1. ESTADO DEL ARTE

En Uruguay en el departamento de Soriano se llevo acabo un proyecto de tesis de doctorado, este proyecto midió la evapotranspiración real que se produce en un cultivo de trigo sometido a diversos grados de estrés hídrico, utilizando metodologías semiempíricas y de simulación de cultivos [10]. Para lograr este objetivo, los datos meteorológicos recopilados en las estaciones sobre el terreno se combinaron con la información de teleobservación obtenida del satélite Landsat 8, y los modelos se corroboraron con datos adquiridos de una torre de medición del flujo Eddy Covariance. Además, se empleó el software Decision Support System for Agrotechnology Transf (según sus siglas en inglés DSSAT), un programa de simulación de cultivos que predice el crecimiento, el desarrollo y el rendimiento en función de las condiciones climáticas, las características del suelo y las estrategias de manejo. En resumen, esta investigación presenta un modelo semiempírico confiable para la estimación de la evapotranspiración en el trigo, lo que permite generar mapas precisos para la evaluación del balance hídrico. La implementación de estas metodologías mejora la eficacia de la utilización del agua en las prácticas agrícolas, lo que ayuda a tomar decisiones informadas dentro de los marcos de producción sostenible.

Rosario Francesca Guzmán Vásquez plantea en su proyecto titulado “Efectos del riego deficitario en el rendimiento del cultivo del apio (*apium graveolens*), variedad kelvin rz f1 en la molina”, realizado en el Centro de Investigación y Extensión del Riego de la Universidad Nacional Agraria La Molina ubicado en Peru [11]. La investigación busca calcular la productividad del agua en el cultivo de apio bajo condiciones diversos grados de riego deficitario mediante la reducción del volumen de agua suministrado al cultivo. Se implementaron cuatro tratamientos distintos: el 100% de las necesidades de agua, lo que indica un riego sin restricciones; el 80%, que refleja una reducción del 20% en la aplicación de agua; el 70%, que corresponde a una disminución del 30% en el riego; y el 60%, que recibió solo el 60% del agua necesaria, lo que resultó en un déficit del 40%. Para el análisis de los datos, se utilizó el método ANOVA, es una prueba estadística que compara las medias de tres o más grupos para determinar si hay una desigualdad en al menos una de las medias. Esto facilitó la identificación de diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos. Se estableció un sistema de riego por goteo, reconocido como una técnica eficaz que suministra

agua directamente a la zona radicular de las plantas, minimizando así las pérdidas atribuidas a la evaporación y la escorrentía. Este sistema se automatizó y reguló mediante válvulas de control, garantizando que cada tratamiento recibiera el volumen de agua programado con precisión. A lo largo del estudio, se evaluaron varios parámetros de crecimiento y rendimiento del apio, como la altura de la planta, el diámetro del tronco, el peso fresco y el rendimiento total expresado en toneladas por hectárea. Estas mediciones permitieron evaluar los efectos del estrés hídrico deficiente en el crecimiento de los cultivos y proporcionaron información esencial para mejorar la gestión del agua en los sistemas de producción hortícola.

El proyecto de investigación “Efecto De Cuatro Mulchs Orgánicos En Las Propiedades Del Suelo En El Desarrollo Del Cultivo De Apio” [12]. Tiene como iniciativa evaluar la influencia de cuatro Mulchs orgánicos distintos en las características físicas, químicas y biológicas del suelo en relación con el cultivo de apio en la localidad de Salache. La metodología empleada fue de naturaleza tanto descriptiva como experimental, utilizando un diseño de bloques completamente al azar mediante cinco tratamientos y cinco repeticiones, que culminó en un total de 25 unidades experimentales. Se mostró distintos grados de ventajas según el tipo de material utilizado. Sin embargo, se corroboró la necesidad de realizar estudios longitudinales extensos para evaluar la restauración del suelo, ya que dentro de estos resultados se obtuvo que al manejar mulch aumentó la altura de la planta a 10,36 cm, mientras que el tratamiento con carbón vegetal mitigó la aparición de plagas en un 2,4 % y enfermedades al 8 %. La cáscara de arroz obtuvo un efecto beneficioso sobre la humedad del suelo manteniendo un 33,8 % dentro de sus parámetros, así como sobre la retención de materia orgánica. Sin embargo, el análisis de la relación costo-beneficio demostró que ninguna de las alternativas era totalmente óptima, presentando condiciones perjudiciales en el sitio experimental, siendo aconsejable implementar prácticas de rotación de cultivos y monitorear los parámetros complementarios, como la temperatura del suelo, para una evaluación más completa.

Este artículo describe un sistema de irrigación inteligente basado en la nube y el Internet de las Cosas (IoT) para la agricultura que tiene como objetivo optimizar el uso del agua y la energía en pequeñas granjas, especialmente en regiones áridas [13]. El sistema integra datos de sensores inalámbricos para determinar condiciones climáticas y calidad del suelo. También, el análisis de big data para gestionar grandes volúmenes, variedad y velocidad de datos provenientes de múltiples granjas, con esto tomar decisiones informadas sobre el riego, implementando un sistema basado en niveles de humedad del suelo, conectado a la estación meteorológica en línea OpenWeatherMap para adaptar los niveles de humedad en respuesta a las probabilidades de lluvia anticipadas. El prototipo incluye componentes como Raspberry Pi, nodo de sensor inalámbrico, panel solar pequeño, batería de litio, gateway Zigbee y lenguaje de programación en LabVIEW, siendo accesibles para los agricultores. Como resultados obtuvieron que durante el día la temperatura alcanza aproximadamente 47 °C, mientras que por

la noche oscila entre 13°C y 20°C. La temperatura máxima se registró a la 1:35 p.m. del primer día, alcanzando los 47°C, y la mínima fue de 12°C a las 4:00 a.m. del cuarto día. Asimismo, los niveles de humedad disminuyen durante el día y aumentan por la noche superando el 30 % teniendo un promedio máximo de 54%. Por lo tanto, el sistema de riego inteligente es capaz de operar en tiempo real.

El artículo se enfoca en cómo las tecnologías modernas IoT y la minería de datos, pueden mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la producción agrícola integrando diversas técnicas inteligentes para optimizar el uso de recursos, mejorar la productividad y reducir los costos, todo ello en el contexto del cambio climático y el aumento de la demanda de alimentos [14]. El objetivo principal del estudio es resumir las aplicaciones más recientes de técnicas inteligentes en la producción de cultivos, especialmente en lo que respecta a la estimación del rendimiento, la gestión del riego y los fertilizantes, y el monitoreo y gestión de insectos, plagas y enfermedades. En el desarrollo del artículo se destaca el uso de sensores de temperatura, humedad, pH del suelo y nutrientes del suelo, mediante redes de sensores inalámbricas las cuales se envían a un sistema de nube para el análisis de datos. El artículo muestra el uso de un algoritmo genético, que permite detectar y clasificar enfermedades de las hojas de algodón alcanzó una precisión del 89.56 %. Igualmente, controladores basados en lógica difusa utilizados para monitorear el nivel del agua en el tanque, la cantidad de lluvia, la temperatura atmosférica y la velocidad del viento, optimizando el uso del agua. La implementación de estas tecnologías permite una gestión más eficiente de los recursos y una agricultura más rentable con las técnicas inteligentes que puede conducir a mejoras significativas en la eficiencia del uso de los recursos, la predicción del rendimiento de los cultivos, la gestión de enfermedades y la reducción de costos.

La Universidad Parma, Italia se desarrolla un proyecto similar planteando la creación de una plataforma llamada "LoraFarM" que está diseñada para la mejora en la gestión de granjas, recopilando y monitoreando los datos relevantes en los procesos agrícolas [15]. Su objetivo es optimizar la agricultura y hacerla más sostenible desde el punto de vista ambiental. LoraFarM incluye un Middleware central que permite la integración de módulos de bajo y alto nivel, facilitando la personalización según las necesidades específicas de cada granja. Del mismo modo, hace uso de la tecnología de LoRaWAN debido a su bajo consumo de energía y su capacidad para proporcionar conectividad en grandes campos agrícolas. El proyecto se implementó en la granja biológica "Podere Campáz", ubicada en Italia, donde se recopilaron datos ambientales, como la temperatura y la humedad del aire y del suelo, durante un período de tres meses. Se instalaron cuatro nodos sensores en la granja, que incluían dos nodos en el invernadero y dos en el viñedo. Estos nodos estaban equipados para medir parámetros ambientales como la humedad y la temperatura del aire y del suelo. Los datos se recopilaron con un intervalo de muestreo de 10 minutos, excepto para uno de los nodos en el viñedo, que transmitía datos cada 30 minutos. Además, se desarrolló una herramienta de visualización basada en la web para que los agricultores puedan

acceder a los datos recopilados.

En el departamento de Cundinamarca, Colombia se lleva a cabo una propuesta de investigación en la Universidad de Cundinamarca titulada "Propuesta de un servicio IoT para el mercado orgánico del Sumapaz" que tiene como objetivo diseñar una red de acceso y almacenamiento de datos para un servicio IoT para la trazabilidad de variables medioambientales en un cultivo orgánico [16]. Este proyecto se divide en tres fases metodológicas teniendo la caracterización del servicio por medio de entrevistas y Lenguaje de Modelado Unificado (UML, por sus siglas en inglés) definiendo el uso de arquitectura en nube que permita el procesamiento de los datos para el monitoreo de variables de temperatura y humedad. Finalmente, el proyecto descrito se encuentra en desarrollo metodológico por ende no se presentan resultados actualmente.

Las autoras Aura Juliana Moreno Guerra y Yiced Carolina Quiroz Álvarez implementaron una arquitectura en nube para la tendencia de semillas nativas orgánicas [17], con el objetivo de mejorar su almacenamiento y conservación. Este proyecto se llevó a cabo en la Universidad de Cundinamarca y en la Universidad Politécnica de Puebla. Su metodología se basó en la caracterización respecto a los procesos de semillas nativas, lo cual permitió establecer un caso de estudio con semillas nativas de maíz. En su segunda fase se lleva a cabo un análisis por medio en UML y la definición de los componentes en la nube. Por último, finalmente, se lleva a cabo la implementación de una prueba concepto con sensores que permita la medición de variables ambientales de temperatura, humedad y luminosidad por medio de un protocolo con el módulo de AWS IoT Core, por MQTT para la recopilación, almacenamiento y procesamiento de los datos. Como resultado se obtuvo que las condiciones actuales de almacenamiento de semillas no garantizan su viabilidad a largo plazo dado que la humedad y la luminosidad registradas superan los niveles óptimos recomendados.

1.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.2.1. Estrés Hídrico

Se habla de estrés hídrico cuando en un cultivo se presenta exceso o escasez en la cantidad de agua absorbida por la planta, esto se debe a las altas temperaturas, también a la baja humedad presente en el suelo. Esto puede llegar a afectar las condiciones en los cultivos principalmente en el crecimiento, la reducción de producción, la pérdida de nutrientes en el suelo debilitando la planta exponiéndola a ataques de plagas y de enfermedades. Para combatir el estrés hídrico se hace uso de diferentes métodos como la eliminación de maleza, la rotación de cultivos y coberturas de suelo que reducen la evaporación frente a condiciones ambientales.[18]

1.2.2. Cobertura de suelo

La cobertura de suelo es una práctica agrícola que consiste en cubrir la superficie del terreno con residuos orgánicos, como restos de cosechas o material vegetal, con el objetivo de proteger el suelo frente a factores climáticos adversos como el viento, las altas temperaturas y la pérdida de humedad [19].

1.2.2.1 Tipos de coberturas Se destacan diferentes formas de aplicación, dependiendo del tipo de residuo vegetal y su manejo [20]:

- **Rastrojo:** Los residuos del cultivo se pueden dejar sobre el terreno.
- **Residuos de podas:** Se utiliza la vegetación obtenida tras la poda de césped u otras plantas.
- **Barbecho:** Consiste en dejar la tierra sin sembrar durante varios ciclos, lo cual permite el crecimiento natural de especies vegetales que protegen el suelo.
- **Cultivos de cobertura:** Se siembran especies específicas, generalmente de crecimiento rápido, que se extienden sobre la superficie del suelo para reducir la erosión y conservar la humedad.

1.2.3. Productos Orgánicos

Los productos orgánicos son aquellos que se cultivan, procesan y comercializan siguiendo prácticas agrícolas y ganaderas sostenibles, sin el uso de productos químicos sintéticos como pesticidas, herbicidas o fertilizantes artificiales. Además, no contienen organismos genéticamente modificados y se obtienen a través de métodos que respetan el equilibrio natural del ecosistema, promoviendo la biodiversidad y la salud del suelo. Estos productos incluyen frutas, verduras, cereales, legumbres, carnes, productos lácteos y otros derivados que cumplen con estrictos estándares de producción ecológica.

La producción orgánica se basa en cuatro principios fundamentales [21]:

1. El principio de salud busca mejorar la salud de los suelos, las plantas, los animales y las personas, evitando el uso de agroquímicos.
2. La ecología respeta los ciclos naturales y fomenta la biodiversidad mediante técnicas como la rotación de cultivos, el uso de abonos naturales y el control biológico de plagas.
3. La equidad busca condiciones justas para los agricultores, trabajadores y consumidores, promoviendo prácticas agrícolas sostenibles.
4. La precaución evita el uso de tecnologías que puedan generar riesgos para la salud humana o el medioambiente, como los transgénicos y ciertos aditivos sintéticos.

En cuanto al impacto ambiental, la agricultura orgánica reduce la contaminación del suelo y el agua, fomentando la biodiversidad, mientras que la agricultura convencional puede generar erosión del suelo y contaminación por agroquímicos.

1.2.4 Apio

Es una planta herbácea con un alto valor comercial y nutricional siendo un cultivo que requiere de un clima frío y templado teniendo una cantidad adecuada de riego para asegurar su crecimiento y la conservación de nutrientes. Asimismo, estos cultivos se deben manejar dentro de suelos livianos y francos los cuales permiten la retención de agua y contenido de materia orgánica, de esta forma se debe manejar un pH entre y 6.5 [5].

1.2.5 Brócoli

Es un cultivo que se destaca por las exigencias de las condiciones de cultivo haciendo necesario temperaturas frescas y húmedas. Sus requerimientos se encuentran entre los 15 °C y los 21 °C, cabe destacar que se debe tener en cuenta que durante el periodo de siembra se debe evitar el calor máximo en la región. Igualmente, se debe manejar un suelo ácido con un pH de 6.0 a 7.0 y ser un suelo arenoso o arcilloso para el drenaje correcto [4].

1.2.6. Monitoreo Ambiental

Realiza mediciones para verificar los impactos ambientales que ocurren en la sociedad, pudiendo así tomar medidas de prevención. Se caracteriza por la recolección de datos mediante un seguimiento continuo y sistemático de las variables ambientales [22]. De esta forma, puede identificar y evaluar las condiciones de un recurso natural proporcionando información sobre los factores que los influyen, así como la conservación, preservación, degradación y recuperación ambiental en la zona estudiada.

Existen tres tipos de monitoreo ambiental: el suelo, la atmósfera y el agua [23]. Algunos de estos métodos se realizan mediante filtración, toma de muestras y muestreo compuesto, el cual vigila y establece líneas de base las cuales permiten la recolección de datos que se introducen en un sistema para ser clasificadas, analizadas, visualizadas y generar información de tendencias para la toma de decisiones. Para su monitoreo se requiere de la selección de condiciones teniendo parámetros para la elección de indicadores en este caso el objetivo del monitoreo; lo que será monitoreado y la información que se desea obtener[22].

1.2.7. Rotación de Cultivos Orgánicos

La rotación de cultivos es una práctica agrícola sostenible que consiste en alternar diferentes tipos de cultivos en la misma parcela durante distintos ciclos de siembra. A diferencia del monocultivo, en el que se siembra repetidamente la

misma especie en el mismo terreno. La rotación de cultivos permite mejorar la fertilidad del suelo, reducir la incidencia de plagas y enfermedades, y optimizar el uso de los nutrientes disponibles en la tierra.

El principio básico de la rotación de cultivos se basa en la alternancia de plantas con diferentes características y necesidades nutricionales. Por ejemplo, los cultivos como el frijol, tiene la capacidad de fijar nitrógeno en el suelo gracias a su simbiosis con bacterias del género *Rhizobium*, lo que mejora la fertilidad del terreno para el siguiente cultivo. Posteriormente, pueden sembrarse cereales como el maíz o el trigo, que aprovechan este nitrógeno disponible.

Uno de los principales beneficios de la rotación de cultivos es la reducción de plagas y enfermedades. Cuando un mismo cultivo se planta repetidamente en el mismo terreno, se crea un ambiente adecuado para insectos, hongos y bacterias que se establecen y se multipliquen con facilidad [24]. Sin embargo, al cambiar los cultivos, se interrumpe el ciclo de vida de estas plagas, lo que disminuye su proliferación de manera natural, reduciendo así la necesidad de pesticidas químicos. Otro aspecto importante de la rotación de cultivos es su impacto en la conservación del suelo. Diferentes tipos de plantas tienen sistemas radiculares que penetran a distintas profundidades, lo que ayuda a prevenir la erosión y mejora la estructura del suelo.

1.2.8. Policultivos

Un policultivo es un sistema de producción agrícola que consiste en el cultivo simultáneo de varias especies vegetales en un mismo espacio, a diferencia del monocultivo, que se basa en la siembra de una única especie en grandes extensiones. Esta técnica busca imitar los ecosistemas naturales, donde diferentes plantas coexisten y se benefician mutuamente, promoviendo un equilibrio ecológico que mejora la salud del suelo, reduce la incidencia de plagas y enfermedades, y optimiza el uso de los recursos disponibles[25].

Uno de los principales beneficios es la diversificación de la producción agrícola, lo que permite a los agricultores obtener diferentes tipos de productos en una misma parcela. Esto no solo mejora la seguridad alimentaria, sino que también ofrece una mayor estabilidad económica, ya que reduce la dependencia de un solo cultivo y mitiga los riesgos asociados a fluctuaciones del mercado o a la pérdida de cosechas por enfermedades o condiciones climáticas adversas. La interacción entre diferentes cultivos también juega un papel clave en el control biológico de plagas y enfermedades [26].

Al combinar plantas con distintas características, se dificulta la propagación de organismos dañinos, ya que estos suelen especializarse en atacar un tipo específico de cultivo. Por ejemplo, en sistemas de policultivo que incluyen flores y plantas aromáticas, se pueden atraer insectos beneficiosos como mariquitas y abejas, que ayudan en la polinización y en el control natural de plagas.

1.2.9. Manejo del suelo en cultivos

El manejo del suelo en cultivos es un conjunto de prácticas agrícolas destinadas a conservar y mejorar la fertilidad del suelo, optimizar el uso de los nutrientes y garantizar la sostenibilidad de la producción agrícola. Las prácticas de conservación del suelo se basan en tres pasos básicos [27]:

- Obtener un conocimiento adecuado del uso de los recursos del suelo.
- Monitorizar los campos y detectar las zonas críticas.
- Controlar y estimar la eficacia de las técnicas de conservación del suelo aplicadas.

Por lo tanto, el principal objetivo en el manejo del suelo es el mantenimiento de la biodiversidad mediante la materia orgánica, la descomposición de organismos para la liberación de nutrientes y mejorar la filtración de agua, garantizando las condiciones adecuadas para los organismos vivos de la tierra que la habitan, ya que los microorganismos ajustan la materia orgánica de las necesidades de las plantas.

1.2.10. Ph en el suelo

Es un parámetro del suelo que permite conocer que tan ácida o alcalina es la solución del suelo, dicho que la solución del suelo es donde las raíces de las plantas toman los nutrimentos necesarios para su crecimiento y desarrollo [28]. La escala de medición del pH está entre los valores de 0.0 a 14.0. también indica las propiedades químicas, físicas y biológicas que influyen en el suelo sobre la disponibilidad de los nutrientes.

1.2.11. Variables medio ambientales

1.2.11.1 Temperatura

Es una magnitud física que cuantifica el calor o el frío. El calor es una medida de la cantidad de energía dentro de un objeto [29]. En la agricultura, es un parámetro fundamental, ya que dependiendo del calor que proporciona la germinación y el desarrollo de la planta tendrá mas o menos éxito. Es un valor cambiante, pues la temperatura del suelo para sembrar maíz no es la misma que para sembrar trigo o girasoles y también afecta a los microorganismos que lo pueblan.

1.2.11.2. Humedad

La humedad es un componente natural de la atmósfera y procede de la cantidad de vapor de agua existente en el aire [30]. En el suelo es la cantidad total de agua que hay en los poros del suelo o en su superficie. Puede expresarse como un porcentaje, agua por peso o volumen, o pulgadas de agua por pie de suelo. La cantidad o porcentaje de humedad del suelo depende de varios factores, como el clima, el tipo de terreno y las plantas que en él habitan [31].

1.2.11.3. Luminosidad

La luminosidad en cultivos es la cantidad, calidad y duración de luz que reciben las plantas. Es un factor fundamental para el crecimiento y la productividad de los cultivos. La luminosidad permite el proceso de fotosíntesis, sin embargo, la ciencia ha demostrado que las diferentes especies y variedades de los cultivos poseen distintos requerimientos lumínicos [32]. A pesar de requerir niveles diferentes, en términos generales, cuanto más exposición lumínica tengan los cultivos, mejor serán los nutrientes que sintetizan, y por ende, de mejor calidad serán los frutos.

1.2.12. Analítica de datos

El análisis de datos por parte del sector agrícola es fundamental, ya que les permite recopilar información precisa y detallada sobre diferentes aspectos tanto en condiciones climáticas, calidad del suelo, uso del agua eficiente, manejo de fertilizantes y el rendimiento de los cultivos [33]. De este modo, el análisis de datos permite conocer el rendimiento de los procesos en los cultivos y hacer pronósticos para posibles soluciones.

Para entender el análisis de datos debemos hablar sobre el análisis de macrodatos que describe grandes conjuntos de datos estructurados, no estructurados y semiestructurados que se generan a gran velocidad y grandes volúmenes [34]. Este proceso permite encontrar patrones, tendencias y relaciones de conjuntos de datos masivos. Por ende, se maneja cinco etapas para el análisis de datos:

1. **Recopilación de datos:** donde identifica y recopila los datos con procesos de Extracción, Transformación y Carga (ETL, según sus siglas en inglés) donde los datos generados se transforman y luego se cargan en el almacenamiento.
2. **Almacenamiento de datos:** traslada los datos a un almacenamiento en nube, donde la estructura y el esquema de los datos se define previamente; a comparación de los lagos de datos, los cuales capturan los datos sin definir un esquema o estructura.
3. **Procesamiento de datos:** Convierte y organiza los datos para obtener resultados precisos.
4. **Limpieza de datos:** Implica la busca de errores mediante el uso de filtros de datos.
5. **Análisis de datos:** Convierte los datos en información procesable, existen cuatro tipos de análisis de datos la descriptiva visualización de los datos, diagnóstico análisis detallado de datos, predictivo usa datos históricos para hacer previsiones para tendencias futuras, se caracteriza por análisis de gráficos, redes neuronales, simulación y entre otros.

De esta forma, el análisis de datos tiene un gran impacto en la actualidad, ya que cuenta con un campo amplio destacándose en empresas, economía, procesos industriales y agricultura en donde estos procesos han permitido mejorar la eficiencia para la reducción de costos, mejorar la calidad de productos y la toma de decisiones.

1.2.13. LoRaWAN

Es una tecnología para la comunicación inalámbrica diseñada específicamente para la aplicación de IoT que permite la transmisión de un bajo volumen de datos a largas distancias. Se caracteriza principalmente por el despliegue en un área extensa por un conjunto de dispositivos alimentados por baterías que se destacan por la eficiencia energética de una manera sencilla y viable.

El funcionamiento de LoRaWAN se basa en la comunicación entre sensores o nodos IoT, que envían datos mediante radiofrecuencia, utilizando modulación LoRa. Estos datos son recibidos por gateways, que a su vez se retransmiten a un servidor en la nube. Finalmente, el servidor de red procesa la información y la envía a las aplicaciones del usuario. Esta tecnología tiene diversas aplicaciones, incluyendo ciudades inteligentes, agricultura de precisión, monitoreo ambiental, logística y control industrial. [35]

2. DISEÑO METODOLÓGICO

La metodología empleada en este proyecto se estructuró en tres fases, orientadas al diseño, implementación y evaluación del desempeño de una red LoRaWAN. En primer lugar, se realizó la caracterización de los bloques funcionales del sistema y la configuración del gateway. Luego, se procedió a la implementación de la infraestructura de red y a la recolección de datos en escenarios IoT reales. Finalmente, se analizaron las métricas de rendimiento obtenidas para identificar fortalezas, limitaciones y oportunidades de mejora en la red implementada.

2.1. METODOLOGÍA

En este apartado se describe la metodología estructurada para caracterizar el estrés hídrico mediante el uso de cobertura de suelo orgánica, con el fin de evaluar la efectividad de los métodos tradicionales. El estudio se enmarca en un enfoque cuantitativo y de tipo experimental, ya que busca analizar el efecto del uso de cobertura de suelo tradicional (mulch de maíz) sobre variables ambientales relacionadas con el estrés hídrico en cultivos orgánicos. Se divide en tres fases cada una con su actividad definida.

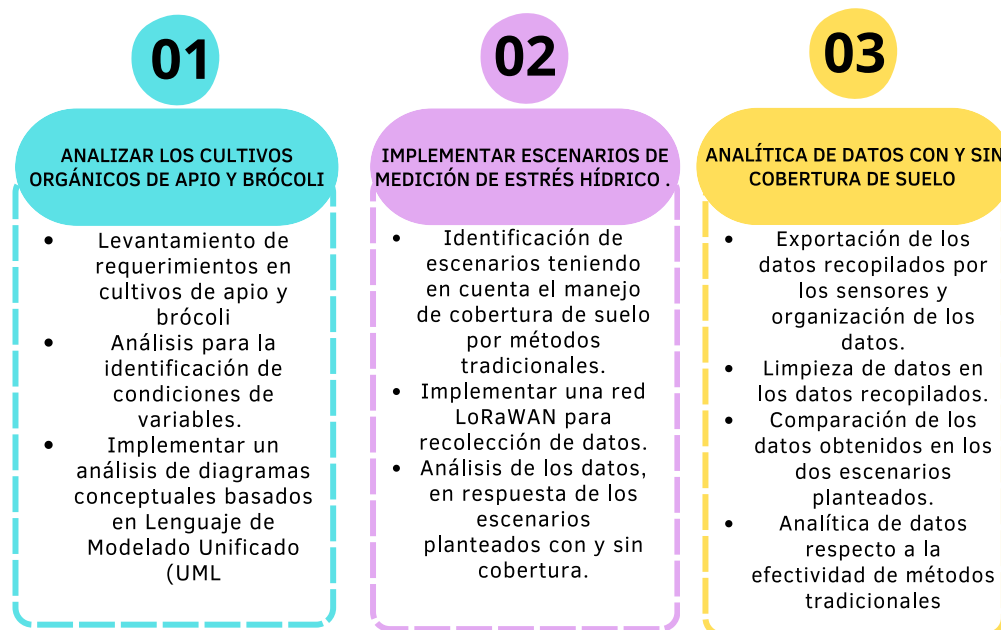


Figura 1: Metodología

Fase 1: Analizar los cultivos orgánicos de apio y brócoli

En esta fase lleva a cabo un análisis en el estrés hídrico teniendo en cuenta el manejo de cobertura de suelo con maíz para comprender el comportamiento de los dos cultivos evaluados.

1. **Actividad 1:** Levantamiento de requerimientos para la recopilación de información de los cultivos de apio y brócoli identificado los métodos de riego, cobertura del suelo, factores de suelo y variables medio ambientales.
2. **Actividad 2:** Análisis para la identificación de condiciones de variables teniendo en cuenta factores de suelo, coberturas de suelo y riego.
3. **Actividad 3:** Implementar un análisis de diagramas conceptuales basados en Lenguaje de Modelado Unificado (UML, por sus siglas en inglés) para el modelamiento del comportamiento del estrés hídrico teniendo en cuenta coberturas de suelo.

Fase 2: Implementar escenarios de medición de estrés hídrico con y sin la cobertura de suelo

En esta fase se establecen dos escenarios con y sin cobertura de maíz para la implementación del sistema dentro del cultivo, con el fin de recolectar datos que permitan identificar el comportamiento de los métodos tradicionales en cultivos orgánicos.

1. **Actividad 1:** Identificación de escenarios teniendo en cuenta el manejo de cobertura de suelo por métodos tradicionales mediante residuos de maíz.
 - Escenarios Planteados:
 - Con cobertura de maíz.
 - Sin cobertura de maíz.

Estos escenarios permiten establecer un comportamiento dentro de un cultivo de apio y brócoli con métodos orgánicos tradicionales para identificar su eficiencia al tener y no tener cobertura de suelo.

2. **Actividad 2:** Implementar una red LoRaWAN para recolección de datos de escenarios planteados en cultivos orgánicos de apio y brócoli.
3. **Actividad 3:** Análisis de los datos, en respuesta de los escenarios planteados con y sin cobertura, mediante la medición de variables medio ambientales y variables de suelo.

Fase 3: Analítica de datos con y sin cobertura de suelo para establecer el comportamiento del método tradicional haciendo uso de herramientas de computación en la nube.

En esta fase se realiza la recopilación de datos para establecer una analítica de datos para observar la efectividad del uso de cobertura de suelo dentro de un cultivo orgánico de apio y brócoli.

1. **Actividad 1:** Exportación de los datos recopilados por los sensores y organización de los datos según variables de suelo y variables medio ambientales.
2. **Actividad 2:** Limpieza de datos en los datos recopilados para la eliminación de errores mediante el uso de filtros de datos.
3. **Actividad 3:** Comparación de los datos obtenidos en los dos escenarios planteados respecto a las variables de suelo y variables medio ambientales para la identificación de tendencias y patrones con cobertura y sin cobertura de suelo.
4. **Actividad 4:** Analítica de datos respecto a la efectividad de métodos tradicionales viendo la viabilidad de estas prácticas en cultivos orgánicos de apio y brócoli.

3. DESARROLLO DEL TRABAJO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL ESTRÉS HÍDRICO

Esta sección tiene como objetivo realizar un proceso de caracterización del estrés hídrico en cultivos orgánicos de apio y brócoli. El proceso se estructura en tres fases: a primera corresponde a la caracterización de los factores agronómicos y ambientales del cultivo; la segunda, a la implementación de escenarios de medición con y sin cobertura de suelo mediante una red LoRaWAN; y la tercera, al análisis de los datos recolectados a través de herramientas de computación en la nube. Este enfoque metodológico permite establecer una secuencia clara para el análisis de los datos, garantizando la trazabilidad y coherencia en todas las etapas del proyecto.

3.1. ANÁLISIS EN LEVANTAMIENTO DE REQUERIMIENTOS EN CULTIVOS ORGÁNICOS DE APIO Y BRÓCOLI

Esta fase se orienta en el levantamiento de requerimientos y análisis de las condiciones agronómicas de los cultivos orgánicos de apio y brócoli. En esta etapa se identifican algunas prácticas agrícolas, las variables de estudio y los factores ambientales que inciden en el comportamiento del suelo y en el desarrollo del cultivo. Además, establece la base para el diseño e implementación del sistema de monitoreo que se aborda en las fases siguientes.

3.1.1. Cultivos Orgánicos

La agricultura orgánica, se basa en producir productos sanos y libres de componentes químicos como pesticidas, insecticidas, fertilizantes, etc; promoviendo así el uso de fertilizantes y otros productos 100 % naturales. De esta forma, se orienta en cuatro principios [36]: Salud, debe mantener y mejorar la salud del suelo, las plantas, etc. Ecología, implica utilizar técnicas respetuosas con el medio ambiente, fomentando calidad de suelo y la restauración de la fertilidad del suelo con materiales no sintéticos. Equidad, respecto al medio ambiente común y las oportunidades de vida. Por último, cuidado donde prevalece la responsabilidad para proteger la salud y el bienestar de las generaciones, como el medio ambiente.

Dentro de esta agricultura se manejan prácticas, las cuales permiten construir y mejorar el suelo, en este caso se nombran dos prácticas las cuales se hace uso:

1. Rotación de Cultivos: esta práctica implica alternar diferentes tipos de cultivos en una misma parcela de tierra a lo largo de ciclos sucesivos, en lugar de plantar siempre el mismo cultivo. Esta técnica mejora la salud del suelo, conserva nutrientes, previene el desgaste del terreno, y ayuda a controlar la proliferación de plagas y enfermedades [37].
2. Coberturas de Suelo: el método consiste en cubrir el campo de material biológico como especie vegetal natural, desechos de cultivos, entre otros.

Protegiendo así, la erosión del suelo, conservación de nutrientes, mejorar la filtración de agua y control de malezas [38].

3.1.2 Caracterización de cultivos orgánicos de brócoli y Apio

La caracterización de los cultivos orgánicos de apio y brócoli presenta condiciones agronómicas y requerimientos específicos para su desarrollo. En este apartado se describen los parámetros principales de ambos cultivos y ambientales que influyen en el crecimiento del cultivo.

3.1.2.1. Caracterización del cultivo orgánico de Brócoli Los cultivos orgánicos de brócoli son cultivos de temperaturas frescas y humedad constante. El clima, el agua y el suelo son condiciones de cultivo esenciales que se deben tener en cuenta [4]:

1. **Requisitos de Temperatura y Sol:** El brócoli prospera en temperaturas frescas, entre 15 °C y 21 °C. Necesita una exposición adecuada a la luz solar, de al menos 6 horas diarias, evitando las altas temperaturas que puedan inducir la floración prematura.
2. **Requisitos de suelo:** El tipo de suelo ideal para el cultivo de brócoli debe ser un suelo rico y ligeramente ácido (pH de 6,0 a 7,0).
3. **Requisitos de Riego:** Normalmente estos cultivos requieren de niveles de humedad suficientes los cuales favorecen el crecimiento y una formación adecuada de las cabezas, idealmente la cantidad de agua es de 250 mm y 380 mm siendo óptimo para el cultivo.

3.1.2.2. Caracterización de cultivo orgánico de Apio El apio es una planta herbácea, es un cultivo de clima fresco. Es una planta que requiere de riego frecuente y fertilización regular para obtener una buena cosecha. Asimismo, este cultivo exige ciertos requerimientos que se deben tener en cuenta [5]:

1. **Requisitos de Temperatura y Sol:** El apio es una hortaliza de clima templado, que puede llegar a tolerar heladas muy ligeras. Debe contar con una temperatura media mensual de 16 a 21 °C para un buen crecimiento y desarrollo del apio. Cuando las temperaturas son mayores a los 25 °C y la planta se encuentra cerca de la madurez, esta detendrá su crecimiento y se producirá un sabor fuerte y amargo en la parte comestible.
2. **Requisitos de suelo:** El apio se desarrolla mejor en suelos arcillosos, ya que requiere de mucha humedad. Este cultivo está clasificado como levemente tolerante a la acidez, reportándose un pH ideal entre 6.0-7.2.

3.1.3. Estrés hídrico en los cultivos orgánicos

El estrés hídrico, es la falta de agua ya sea por la ausencia de lluvias, por sequía o por un riego deficiente, siendo un factor que afecta tanto el rendimiento, desarrollo y el crecimiento de las plantas. Tiene un impacto en la disminución de crecimiento del cultivo, la reducción de producción, es más vulnerable a enfermedades y plagas, disminuye la calidad del producto y menor tolerancia a condiciones de clima extremo. Estos efectos negativos no solo afectan a la planta sino al agricultor, ya que se presenta una pérdida en la calidad de producto.

Por ende, se manejan estrategias que ayudan a gestionar y mitigar el estrés hídrico en los cultivos; como prácticas encontramos el monitoreo de la humedad del suelo, donde se comprenden las necesidades de riego para realizar una planificación del riego con los datos obtenidos. Igualmente sistemas de riego por goteo y sistemas de recogida y almacenamiento de agua de lluvia [18].

3.1.4. Modelado matemático del estrés hídrico

Para obtener el comportamiento del estrés hídrico en los cultivos de apio y brócoli, se formuló un Índice Empírico de Estrés Hídrico (IEHE), el cual integra las variables de suelo y ambientales. Este índice permite determinar de forma numérica el grado de afectación hídrica del cultivo, considerando tanto la disponibilidad de agua en el suelo como las condiciones térmicas. Toda la formulación teórica y las ecuaciones presentadas en este apartado se basan en la referencia [39].

3.1.4.1. Modelado e implementación del Índice Empírico de Estrés Hídrico (IEHE): el modelo propuesto se fundamenta en el método original Crop Water Stress Index (CWSI), desarrollado por Jackson e Idso (1981), el cual permite estimar el nivel de estrés hídrico de un cultivo a partir del balance de energía entre la planta y la atmósfera. El principio de este método establece que, cuando la planta cuenta con suficiente agua, transpira de manera normal y su temperatura se mantiene relativamente baja. En cambio, cuando la disponibilidad de agua disminuye, la transpiración se reduce, lo que incrementa la temperatura del cultivo. Esta diferencia térmica entre la planta y el aire se utiliza como un indicador directo del grado de estrés hídrico.

El CWSI se calcula la temperatura de la hoja como variable principal. Sin embargo, cuando esta medición no está disponible, puede estimarse el nivel de estrés hídrico mediante el déficit de presión de vapor (VPD), el cual relaciona la temperatura y la humedad del aire para representar la demanda evaporativa del ambiente. De esta manera, un VPD alto indica un incremento en el nivel de estrés hídrico del cultivo.

3.1.4.2. Formulación empírica basada en el déficit de presión de vapor (VPD) [39]: El déficit de presión de vapor es un parámetro que representa la diferencia entre la cantidad de vapor de agua que el aire puede contener a una temperatura

determinada y la cantidad real de vapor presente en el ambiente. El uso del VPD resulta especialmente útil cuando no se dispone de mediciones directas de la temperatura de la hoja, ya que refleja la relación entre la demanda evaporativa del ambiente y la disponibilidad de agua para la planta. De esta forma, el modelo propuesto representa de manera numérica el estado hídrico del cultivo. De esta forma, el modelo permite representar de manera numérica el estado hídrico del cultivo, expresado en una escala comprendida entre 0 y 1, donde los valores cercanos a 0 indican condiciones favorables de humedad y los valores próximos a 1 reflejan un mayor nivel de estrés hídrico.

El VPD indica si la humedad es baja y la temperatura es alta, el aire tiende a absorber más agua del entorno. Lo que genera una mayor pérdida de agua en el cultivo y, por tanto, un mayor nivel de estrés hídrico.

$$VPD = e_s(T_a) \cdot \left(1 - \frac{HR}{100}\right) \quad (1)$$

donde:

- $e_s(T_a)$ es la presión de vapor a saturación (kPa), en función de T_a que es la temperatura ambiente, calculada como:

$$e_s(T_a) = 0.611 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \cdot T_a}{T_a + 237.3}\right) \quad (2)$$

- HR corresponde a la humedad relativa del aire expresada en porcentaje.

La presión de vapor actual e_a se obtiene mediante:

$$e_a = e_s(T_a) \cdot \frac{HR}{100} \quad (3)$$

Por lo tanto, el déficit de presión de vapor se define como:

$$VPD = e_s - e_a \quad (4)$$

Con el fin de comparar el VPD con otras variables del sistema, este parámetro se normalizó entre 0 y 1 de acuerdo con los valores mínimos y máximos observados durante el periodo de medición:

$$VPD' = \frac{VPD_i - VPD_{min}}{VPD_{max} - VPD_{min}} \quad (5)$$

3.1.4.3. Normalización de variables de suelo Utilizando las variables de suelo se puede calcular la temperatura y humedad normalizadas para mantener una escala comparable con el VPD:

$$T'_s = \frac{T_{si} - T_{smin}}{T_{smax} - T_{smin}} \quad (6)$$

Donde:

- T'_s : temperatura del suelo normalizada.
- T_{si} : valor de temperatura del suelo en el instante ($^{\circ}\text{C}$).
- T_{smax} y T_{smin} : valores máximo y mínimo de temperatura del suelo registrados durante el período de medición ($^{\circ}\text{C}$).

$$H'_s = \frac{H_{si} - H_{smin}}{H_{smax} - H_{smin}} \quad (7)$$

- H'_s : humedad del suelo normalizada.
- H_{si} : valor de humedad del suelo en el instante (%).
- H_{smax} y H_{smin} : valores máximo y mínimo de humedad del suelo registrados durante el período de medición (%).

Dado que la humedad se relaciona de forma inversa con el estrés hídrico, se utilizó su complemento ($1 - H'_s$) para representar el déficit de agua en el suelo. Estas variables se normalizan con el fin de permitir la comparación directa con el parámetro VPD' dentro de la formulación del índice IEHE.

3.1.4.4. Definición del Índice Empírico de Estrés Hídrico (IEHE) Finalmente, el Índice Empírico de Estrés Hídrico (IEHE) se formuló integrando las tres variables normalizadas:

$$IEHE = \frac{VPD' + T'_s + (1 - H'_s)}{3} \quad (8)$$

El índice adopta valores entre 0 y 1, donde:

- $IEHE < 0.5$ indica condiciones de déficit del estrés hídrico.
- $0.5 \leq IEHE \leq 0.7$ representa una condición moderada de estrés.
- $IEHE > 0.7$ corresponde a un evento de alto estrés hídrico.

El modelo resultante, denominado Índice Empírico de Estrés Hídrico (IEHE), permite evaluar este fenómeno de forma práctica y continua, sin la necesidad de instrumentos especializados, pudiendo estimar el estado hídrico del cultivo.

3.1.5. Análisis para la identificación de condiciones de variables

En el análisis de indentificación de vararibles se tuvo encuentra el modelo de stress hidrico y factores de la caso de estudio en el cultivo.

3.1.5.1. Prácticas tradicionales de cobertura del suelo: Much de Maíz El uso de prácticas tradicionales de cobertura del suelo, como el rastrojo de maíz, es un método agrícola ancestral transmitido de generación en generación.

Estos métodos, que a menudo se basan en el uso de residuos de cultivos previos, como las cañas y hojas de maíz, ayudan a proteger la tierra. Al esparcir el rastrojo de maíz sobre la superficie del cultivo, se crea una capa protectora que actúa como una barrera natural. Esta capa no solo ayuda a retener la humedad en el suelo, sino que también reduce el impacto directo de las gotas de lluvia, lo que previene la erosión y la compactación del suelo. Además, al bloquear la luz solar, el rastrojo de maíz inhibe el crecimiento de malezas, lo que reduce la necesidad de herbicidas y la competencia por los nutrientes, permitiendo que el cultivo principal crezca más fuerte y saludable.

En esencia, esta práctica tradicional no es solo un acto de aprovechamiento de recursos, sino una estrategia sostenible que imita los procesos naturales del ecosistema para mejorar la salud del suelo y la productividad de los cultivos.

3.1.5.2. Factores climáticos: temperatura y humedad relativa Para la identificación de variables es necesario comprender las condiciones externas que afectan el estrés hídrico en los cultivos. En este caso, el proyecto se llevó a cabo en el municipio de Pasca, Cundinamarca, una zona reconocida por su vocación agrícola y su altitud estratégica dentro de la provincia del Sumapaz, esta se encuentra a una altitud aproximada de 2.180 metros sobre el nivel del mar, lo que le confiere un clima templado-húmedo de montaña, la zona [40]:

1. Temperatura entre 16 °C y 20 °C, asimismo con temperaturas mínimas que descienden por debajo de los 10 °C durante la madrugada, especialmente en la época seca.
2. Humedad relativa promedio superior al 75 %, con tendencia a incrementarse en horas de la noche.
3. La radiación solar se concentra en horas de la mañana, con cielos parcialmente nublados desde el mediodía. Este patrón favorece los cultivos de hoja como el apio y el brócoli, pero también puede incrementar la evaporación superficial si no hay cobertura del suelo.
4. Precipitación anual supera los 1.200 mm, distribuidos en dos estaciones de lluvia (marzo–mayo y septiembre–noviembre). Sin embargo, actualmente se presentan variaciones en el clima afectando directamente a los cultivos en este caso apio y brócoli, lo cual retrasado el proceso de siembra debido a las altas lluvias y vientos fuertes.

Estas condiciones climáticas justifican la necesidad de contar con mecanismos que moderen la pérdida de humedad del suelo, en este caso cobertura de suelo con mulch de maíz. Se espera que la cobertura de suelo aplicada en este entorno montañoso mitigue la evaporación inducida por el viento y la radiación.

3.1.5.3. Factores del suelo: Para comprender la dinámica del estrés hídrico, es fundamental analizar las propiedades del suelo, ya que su capacidad para retener agua y nutrir los cultivos es determinante. En el municipio de Pasca, la mayoría de los suelos agrícolas presentan características que influyen directamente en la respuesta de los cultivos a la disponibilidad de agua.

3.1.5.4. Textura del suelo: La estructura del suelo, son las propiedades únicas las cuales cumplen con un comportamiento, como la capacidad de retención de agua, la retención y el suministro de nutrientes, el drenaje y la lixiviación de nutrientes.

La clase textura de un suelo se determina por la proporción de tres partículas fundamentales: arena, limo y arcilla. Se clasifican como arenoso cuando las partículas son grandes y su textura es gruesa, lo que permite un drenaje rápido del agua. Por otro lado, los suelos arcillosos tienen partículas muy finas, lo que les permite retener mucha agua, pero también los hace propensos a la compactación. En comparación del limo que es el medio entre estas dos, estos suelos con limo tienden a sentirse suaves y sedosos al tacto y tienen una excelente capacidad para retener agua y nutrientes. Un suelo con una mezcla equilibrada de los tres, que combina las mejores propiedades de cada uno, se conoce como franco.

Para determinar la textura de forma precisa, se usan los porcentajes de cada partícula, obtenidos en un análisis de laboratorio. Estos datos se aplican en el triángulo textura del suelo figura 2, una herramienta gráfica que identifica la clasificación correcta del suelo.

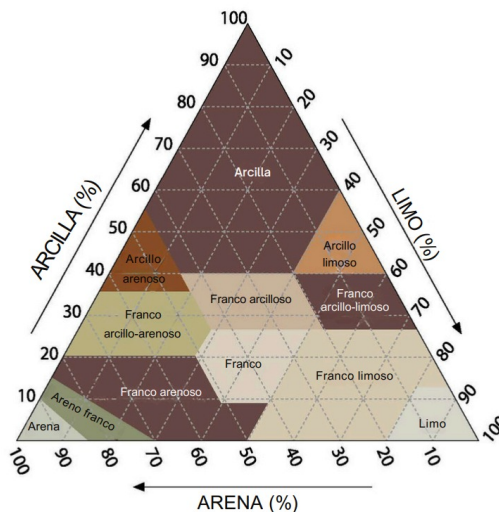


Figura 2: Triángulo textura del suelo [1].

Esta clasificación resulta determinante, ya que la textura del suelo influye directamente en su capacidad para retener agua y nutrientes, lo que afecta el crecimiento de las plantas.

3.1.5.5. Materia orgánica Este componente es crucial para la salud del suelo, ya que mejora la estructura, incrementa la capacidad de retención de agua y proporciona nutrientes esenciales a los cultivos. La materia orgánica actúa como una esponja, absorbiendo agua y liberándola lentamente, lo que reduce la dependencia del riego y mitiga el impacto de los periodos de sequía. Sin embargo, la alta pluviosidad de la región puede provocar problemas de drenaje en áreas con topografía plana. El encharcamiento prolongado limita la disponibilidad de oxígeno para las raíces, lo que puede causar asfixia radicular y hacer a los cultivos más susceptibles a enfermedades.

3.1.5.6. Identificación de condiciones de variables En este caso, se busca comprender el impacto de la cobertura de suelo en el comportamiento hídrico del cultivo, para lo cual es necesario establecer un conjunto representativo y funcional de variables tanto del entorno edáfico como del microclima. Estas variables permitirán modelar el sistema agrícola, evaluar su dinámica temporal y determinar su respuesta al estrés hídrico. De este modo, las variables definidas se agrupan en tres niveles:

1. Variables de Suelo:

- a) Humedad del suelo: Esta es la variable principal. Se espera que la cobertura de suelo reduzca la variación de esta variable a lo largo del día.
- b) pH del suelo: Esta variable es crucial para la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Su medición periódica con sensores IoT tipo sonda, permitirá verificar si el mulch, al descomponerse, está alterando la acidez del suelo. Se espera mantener un pH óptimo para cultivos como el apio y el brócoli, lo que asegura que, incluso con suficiente humedad, la planta pueda absorber adecuadamente los nutrientes esenciales para su desarrollo.
- c) Temperatura del suelo: Variable crítica para el metabolismo radicular y la absorción de agua. Una cobertura adecuada reduce la amplitud térmica del suelo, lo cual será contrastado entre los escenarios con y sin mulch.

2. Variables Ambientales:

- a) Temperatura ambiental: Esta variable permite analizar el efecto de las condiciones climáticas sobre el nivel de estrés hídrico del cultivo. Su registro continuo es fundamental para correlacionar los cambios térmicos con las variaciones de humedad del suelo y del aire.
- b) Humedad relativa: Influye en la tasa de transpiración y evaporación superficial. Se espera que en condiciones de baja humedad relativa, la cobertura contribuya a conservar la humedad del cultivo.

3.2. DISEÑO

En esta sección se presenta la propuesta del diseño para la caracterización del estrés hídrico en un cultivo orgánico. Primero, se realiza un levantamiento de requerimientos en los cultivos orgánicos. Segundo, se muestran los componentes del sistema y sus características, en el se abarca la estructura conceptual y técnica que orienta el desarrollo del proyecto, considerando los aspectos necesarios para su implementación.

3.2.1. Diagramas de Casos de Uso

Dentro de la solución propuesta para el manejo del estrés hídrico en cultivos orgánicos con cobertura de maíz, se hace uso de diagramas con el fin de representar formalmente los componentes del sistema, sus interacciones y el flujo de información. En este sentido, se plantean dos diagramas de casos de uso que comparan dos enfoques distintos: el proceso tradicional, basado en la observación directa del estado del cultivo y en prácticas manuales para la toma de decisiones de riego sin apoyo tecnológico, y el proceso con tecnología IoT, en el que la integración de sensores, redes de comunicación, almacenamiento en la nube y herramientas de visualización de datos permite un monitoreo continuo de las condiciones hídricas del suelo, optimizando la toma de decisiones y reduciendo el impacto del estrés hídrico en el cultivo.

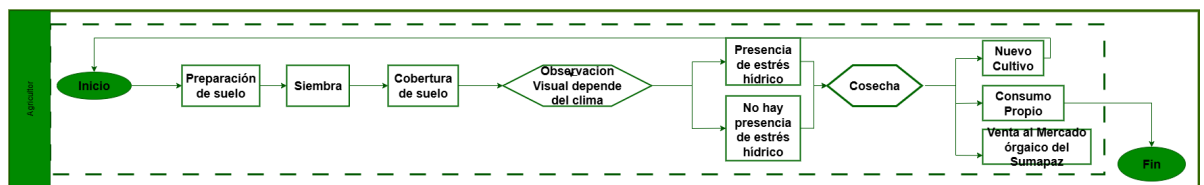


Figura 3: Metodo Tradicional.

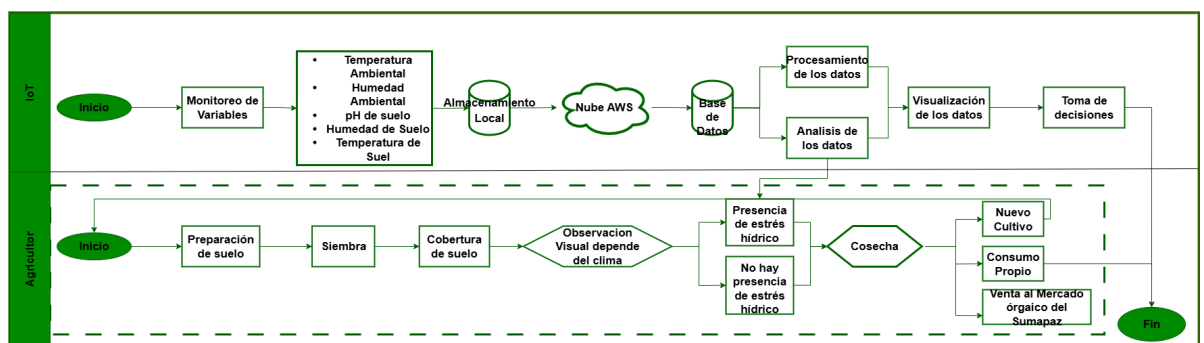


Figura 4: Proceso propuesto con tecnología IoT.

3.2.2. Diseño y caracterización del sistema

3.2.2.1. Sensor de pH Dado que los sensores de pH con conectividad LoRa-WAN disponibles comercialmente presentan costos elevados que dificultan su

implementación, se propuso el diseño y construcción de un sensor de pH de suelo con transmisión LoRaWAN. El dispositivo fue desarrollado utilizando componentes de bajo costo y fácil acceso, con el propósito de ofrecer una alternativa eficiente para el monitoreo remoto de esta variable dentro del sistema IoT implementado, con el fin de:

1. Reducir los costos de implementación de monitoreo remoto.
2. Proveer conectividad de largo alcance adecuada para zonas rurales sin acceso a internet convencional.
3. Asegurar que el dispositivo pueda integrarse en sistemas de trazabilidad agrícola.
4. Asegurar que el dispositivo pueda integrarse en sistemas de trazabilidad agrícola.

En este contexto, se diseñó y construyó un prototipo de sensor de pH LoRaWAN, empleando una arquitectura basada en Raspberry Pi Pico, un sensor de pH de suelo y un módulo LoRaWAN (SX1276). El dispositivo fue desarrollado con el propósito de realizar mediciones continuas del pH del suelo y transmitir los valores obtenidos hacia la red IoT del sistema. Los datos recolectados constituyen la base para el análisis del comportamiento del suelo y su relación con las demás variables, permitiendo evaluar variaciones asociadas al estrés hídrico de los cultivos.

Funcionamiento del dispositivo El funcionamiento del sensor de pH LoRaWAN inicia con la medición directa en el suelo mediante un electrodo modelo PH-V5. Este sensor detecta la concentración de iones de hidrógeno y genera una señal analógica proporcional al nivel de acidez o alcalinidad del terreno [41]. La señal es recibida por el convertidor analógico-digital (ADC) integrado en la Raspberry Pi Pico, donde se transforma en un valor digital y lo procesa por el microcontrolador.

Una vez digitalizada la lectura, la Raspberry Pi Pico aplica la ecuación de calibración obtenida durante la fase experimental con muestras de suelo. Para validar la exactitud, las mediciones fueron confrontadas con un sensor industrial de referencia marca Hanna Instruments, disponible en los laboratorios de la Universidad de Cundinamarca. Esta verificación permitió ajustar los coeficientes de calibración y reducir el error entre el dispositivo desarrollado.

Además, el microcontrolador organiza los datos incluyendo información complementaria como el identificador del dispositivo y la marca temporal de la medición, lo que permite mantener una trazabilidad y análisis histórico. Seguido de esto, los datos son enviados al módulo de comunicación LoRaWAN SX1276, que transmite la información hacia un gateway LoRaWAN mediante la modulación LoRa. Esta tecnología asegura un alcance considerable, que puede superar entre los 10 kilómetros en condiciones rurales abiertas.

De esta forma, estas etapas de funcionamiento permiten que el dispositivo proporcione un monitoreo constante y eficiente del pH del suelo, ofreciendo una alternativa de bajo costo frente a los sensores comerciales existentes y adaptándose a las condiciones reales de la agricultura orgánica.

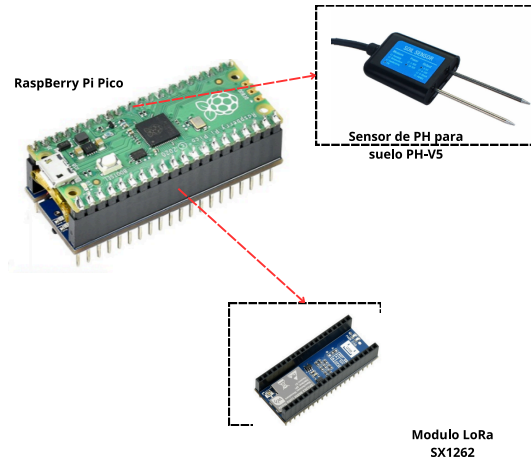


Figura 5: Componentes sensor de pH.
Fuente: autoría propia.

Se observa en la figura 5 el diseño del dispositivo de pH de suelo, el cual se conforma por los siguientes componentes:

1. **Sensor de pH de suelo:** electrodo especializado para medición directa en suelo húmedo, con rango aproximado de 3 a 9 pH.
2. **Microcontrolador Raspberry Pi Pico:** unidad de procesamiento y empaquetamiento de los datos la transmisión.
3. **Módulo LoRaWAN (SX1276):** comunicación inalámbrica por medio de LoRa.
4. **Estructura física:** se encuentra dentro de una caja plástica, la cual evita el contacto directo del circuito con el suelo y el agua, reduciendo el riesgo de corrosión o daños eléctricos.

Diagrama de flujo El diagrama de flujo mostrado en la figura 6 se observa el funcionamiento lógico del sensor, el cual procede a leer el valor crudo del ADC, que luego se transforma en voltaje, se ajusta con el factor divisor y finalmente se convierte en un valor de pH. Este dato se empaqueta en un payload y se envía por LoRaWAN en el puerto asignado; el sistema garantiza un proceso continuo de lectura, cálculo y transmisión de datos del sensor.

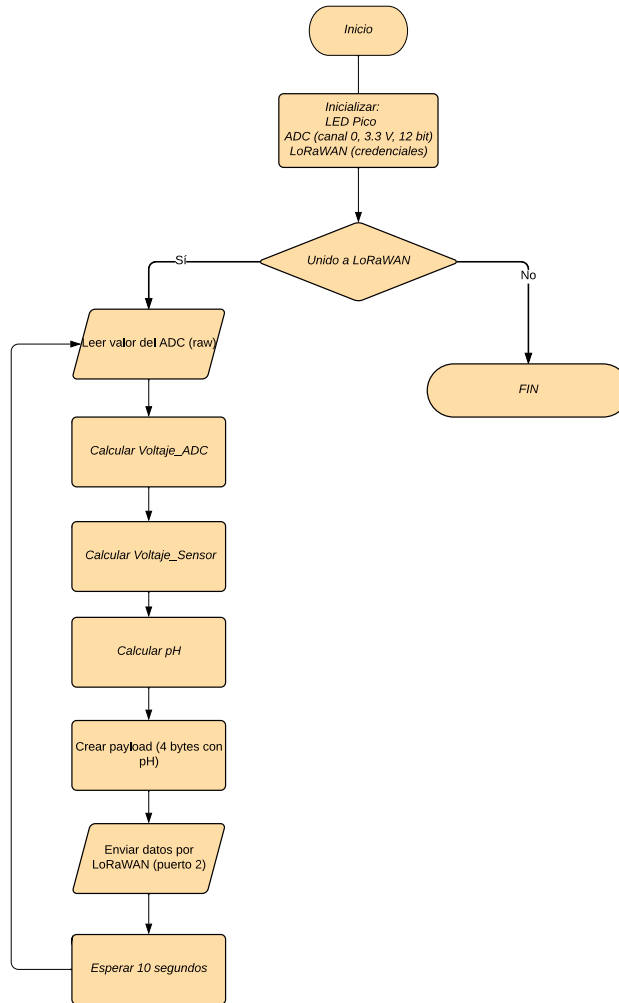


Figura 6: Componentes sensor de pH.

3.2.2.2. Dragino LSN50: humedad y temperatura de suelo: Es un nodo sensor Dragino LSN50 LoRaWAN de temperatura y humedad, opera bajo el protocolo LoRaWAN v1.0.3 Clase A [2].



Figura 7: Sensor Dragino LSN50

El equipo utiliza una sonda externa SHT31 de 3 m de longitud, totalmente calibrada, linealizada y compensada en temperatura. Dicha sonda está protegida por una carcasa impermeable y anticondensación, lo que permite que el sensor sea estable y confiable a largo plazo, incluso en ambientes agrícolas con alta humedad. A continuación en la Tabla 1 se mencionan las especificaciones:

Tabla 1: Especificaciones técnicas del sensor Dragino LSN50v2-S31 [2].

Parámetro	Especificación
Modelo	LSN50v2-S31
Protocolo	LoRaWAN v1.0.3 Clase A
Chip LoRa	Semtech SX1276
Rango de frecuencia	868 / 915 MHz
Rango de temperatura	-40 °C a +80 °C
Precisión (temperatura)	±0.2 °C
Rango de humedad relativa	0 % a 99.9% RH
Precisión (humedad)	±2 % RH
Sonda	Externa SHT31 (3 m, anticondensación)
Grado de protección	IP67
Batería	Li-SOCl ₂ 3.6 V – 8500 mAh
Autonomía estimada	Hasta 10 años
Dimensiones	105 × 50 × 35 mm
Peso	150 g
Aplicaciones	Monitoreo ambiental y agrícola

3.2.2.3. Dragino LHT65N: humedad y temperatura de suelo, temperatura ambiental El Dragino LHT65N es un nodo sensor inalámbrico de largo alcance

diseñado para el monitoreo ambiental mediante comunicación LoRaWAN v1.0.3 Clase A [3]. Incorpora sensores internos de temperatura y humedad y permite conectar un sensor externo de temperatura adicional. Además, integra una función de datalogger, que almacena los datos cuando no hay conexión con la red LoRaWAN, asegurando la integridad del registro.



Figura 8: Sensor Dragino LHT65N.

En la Tabla 2 se muestran algunas especificaciones del sensor LHT65N.

Tabla 2: Especificaciones técnicas del sensor Dragino LHT65N [3].

Parámetro	Especificación
Modelo	LHT65N
Protocolo	LoRaWAN v1.0.3 Clase A
Frecuencia de operación	CN470 / EU868 / US915 / AS923 (según región)
Sensor interno de temperatura	Rango: $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$
Precisión (temperatura interna)	$\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$
Resolución (temperatura interna)	$0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$
Sensor interno de humedad	Rango: 0 % a 96 % RH
Precisión (humedad)	$\pm 3\text{ } \% \text{ RH}$
Resolución (humedad)	$0.04\text{ } \% \text{ RH}$
Sensor externo de temperatura (opcional)	Rango: $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$
Precisión (sensor externo)	$\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$) / $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ fuera de rango
Batería	2400 mAh (no recargable)
Autonomía estimada	Hasta 10 años
Funciones adicionales	Registro de datos (datalogger), actualización de firmware, comandos AT

3.2.2.4. Sistema de cola en Raspberry Pi con ChirpStack: El sistema de cola consiste en un mecanismo de almacenamiento temporal implementado dentro del servidor local (Raspberry Pi) mediante el servicio ChirpStack. Se implementó como una solución a las limitaciones de conectividad presentes en la zona rural donde se realizaron las pruebas.

El funcionamiento del servidor se basa en un proceso secuencial que gestiona la recepción, almacenamiento y posterior envío de los datos capturados por los sensores. En este sistema, los nodos envían los datos al gateway, el cual los reenvía hacia la Raspberry Pi, donde son almacenados de forma ordenada en una base de datos local SQLite bajo una política de cola FIFO (First In, First Out). Este sistema fue diseñado para mantener la integridad de los datos en caso de interrupciones de conectividad. Así, cuando la conexión a Internet se interrumpe, los registros permanecen almacenados en la cola local hasta que el enlace se restablece. Si hay conexión, el sistema envía y depura los registros cada hora; de lo contrario, conserva los datos y reintenta cada 20 minutos, garantizando un reenvío ordenado cuando el enlace vuelve a estar disponible. En ese momento, la información se transmite hacia la nube mediante una conexión con AWS IoT Core, asegurando que los datos lleguen completos y en el orden correcto.

Componentes del sistema de cola: En la Figura 9 se observa el dispositivo, el cual está conformado por varios elementos de hardware y software que trabajan de manera integrada.

- **ChirpStack (Raspberry Pi):** recepción y publicación de mensajes en MQTT.
- **Mosquitto (broker MQTT):** intermediario de publicaciones/suscripciones locales.
- **SQLite (queue.db):** almacenamiento temporal en cola *FIFO*.
- **Scripts de puente:** captura MQTT → cola y sincronización cola → AWS IoT Core con reintentos.

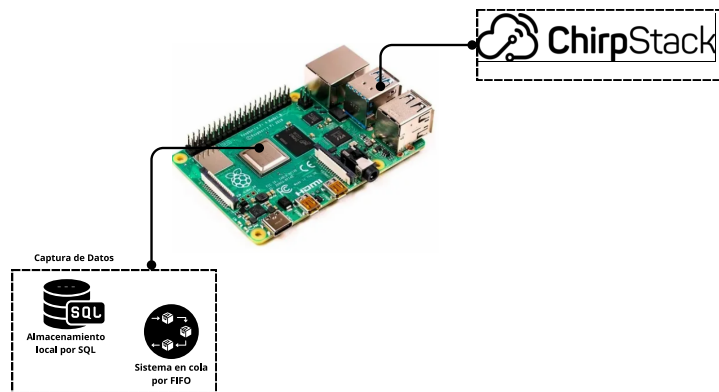


Figura 9: Sistema de Cola
Fuente: autoría propia.

Diagrama de bloques del flujo datos: se representa en la figura 10 el diagrama de bloques correspondiente al recorrido de los datos en el servidor local, teniendo en cuenta la captura de los datos hasta su almacenamiento final en la nube.

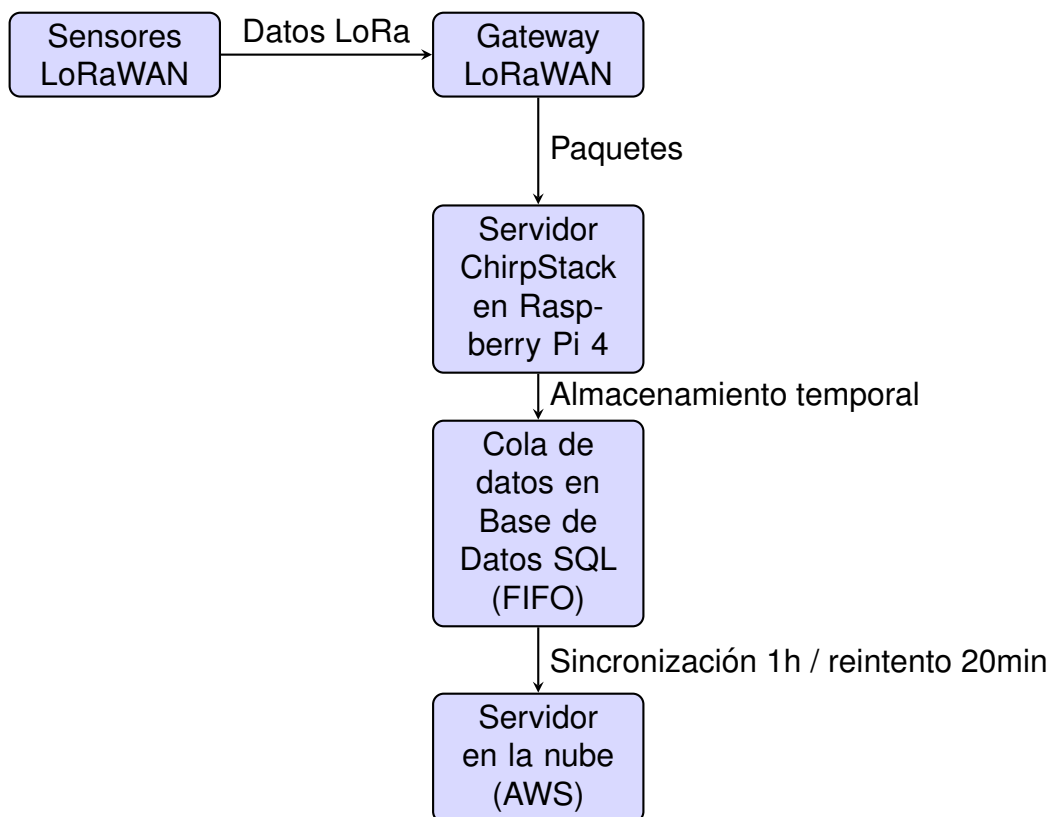


Figura 10: Flujo de datos.

3.2.2.5. Servicio en Nube con AWS: Se presenta primero una propuesta de arquitectura general en AWS para el despliegue de un sistema de monitoreo y analítica en la nube. Posteriormente, se describe la arquitectura específica diseñada para atender los requerimientos del proceso de detección y gestión del estrés hídrico en cultivos orgánicos con cobertura de maíz, detallando los componentes y servicios de AWS seleccionados, así como las interacciones entre ellos para garantizar la captura, el procesamiento, analítica y la visualización de los datos recolectados por los sensores IoT implementados en campo.

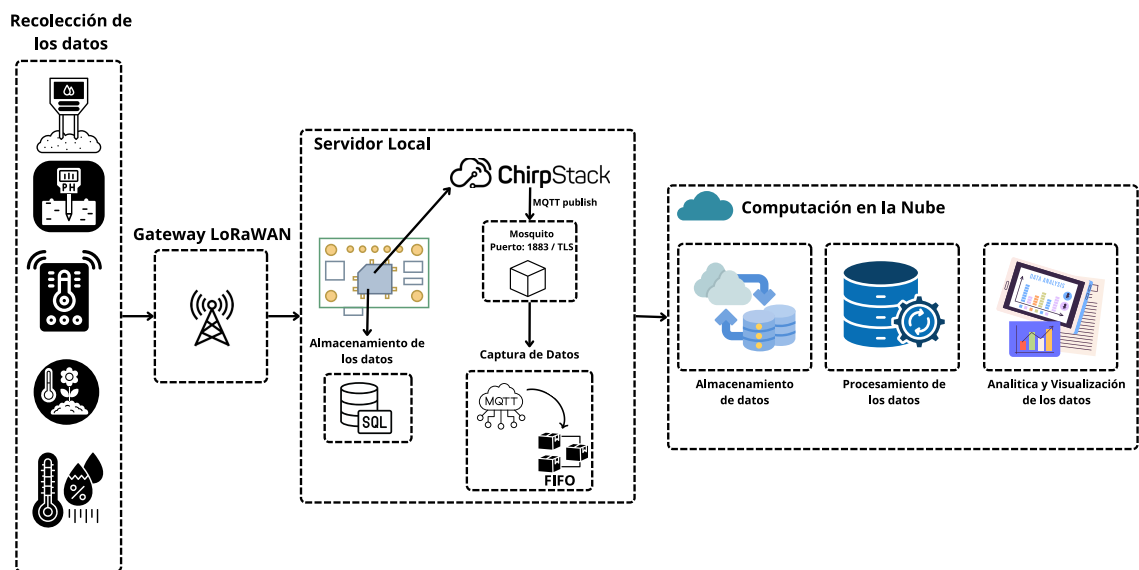


Figura 11: Arquitectura planteada
Fuente: autoría propia.

En la Figura 11 se representa la arquitectura diseñada, la cual se centra en una analítica de datos obtenidos en los cultivos orgánicos de apio y brócoli con dos escenarios de implementación con y sin cobertura de suelo. Esta arquitectura se organiza en cuatro fases:

1. Capa de Recolección de datos: los sensores transmiten los datos por medio de LoRaWAN.

Gateway LoraWAN: Los datos son transmitidos por tramas.

Servidor Local: Los datos son procesados por ChirpStack para ser almacenados para realizar el envío a la nube.

2. Capa de almacenamiento: los datos son registrados en una base de datos y son almacenados.
3. Capa de Procesamiento: los datos son tratados por una función, que ejecuta rutinas de limpieza y organización.

4. **Capa de análisis y visualización:** los datos registros son procesados para identificar tendencias, patrones y correlaciones.

La arquitectura general del sistema se diseñó bajo un enfoque de tres capas principales: **adquisición de datos, procesamiento y almacenamiento, y visualización y análisis**. Este diseño permite garantizar la trazabilidad completa de la información desde los sensores instalados en campo hasta la presentación de los resultados en la nube. Asimismo la gestión en el flujo de datos para la realización de una analítica de datos y la visualización de los datos por el agricultor.

1. **Capa de adquisición de datos:** Esta capa está conformada por los nodos sensores LoRaWAN encargados de capturar las variables físicas del entorno de cultivo: pH del suelo, humedad del suelo, temperatura, luminosidad y humedad relativa del aire. Cada nodo transmite los datos hacia el gateway LoRaWAN MikroTik wAP LR9, que actúa como puente entre la red inalámbrica y la red IP local.

El gateway envía las tramas LoRaWAN al servidor local implementado en una Raspberry Pi 4, donde se ejecuta la plataforma ChirpStack. Este servidor se encarga de decodificar los mensajes LoRa, registrar temporalmente los datos en una base de datos PostgreSQL y preparar su envío hacia la nube mediante el protocolo MQTT.

2. **Capa de almacenamiento y procesamiento:** La capa intermedia se desarrolla en la nube de Amazon Web Services (AWS), donde los datos son recibidos a través del servicio AWS IoT Core. Este funciona como puente de comunicación entre los dispositivos IoT y los servicios AWS. Una vez los datos ingresan a la nube, son procesados por AWS Lambda, que se encarga de clasificar, organizar y almacenar los datos en los servicios Amazon DynamoDB y Amazon S3. DynamoDB conserva los registros más recientes, mientras que S3 almacena el histórico completo de las mediciones en formato CSV.
3. **Capa de visualización y análisis:** La capa final del sistema corresponde a la visualización y análisis de los datos. Los archivos almacenados en Amazon S3 son integrados con el servicio Amazon QuickSight, donde se construyen paneles interactivos que permiten observar la evolución temporal de las variables medidas y comparar los escenarios experimentales con y sin cobertura de suelo (ver Sección 3.3.1)

Adicionalmente, el sistema genera una copia automática del consolidado diario en una carpeta de **Google Drive**, que actúa como repositorio externo y facilita el acceso a la información por parte de los investigadores.

3.3. IMPLEMENTACIÓN

La implementación incluye la identificación de los escenarios y la implementación del sistema de recolección, almacenamiento y analítica de datos.

3.3.1. Identificación de escenarios de medición

La implementación del sistema de caracterización del estrés hídrico se desarrolló en el municipio de Pasca, Cundinamarca, específicamente en la Vereda Guchipas, dentro de la Granja Agroecoturística Semilla Ancestral. La elección de este lugar se dio en que la finca hace parte del Mercado Orgánico del Su-mapaz. El entorno donde se llevo acabo, cuenta con un suelo de textura franco–arcillosa–arenosa, el cual permite la retención de agua y drenaje.

La finca cuenta con una extensión total de 2 hectáreas, pero para el desarrollo del experimento se trabajó únicamente en una surca destinada al cultivo de apio y brócoli, para los dos escenarios. Dentro de esta surca se seleccionó un segmento de aproximadamente 30 cm, donde se realizó la toma completa de datos.

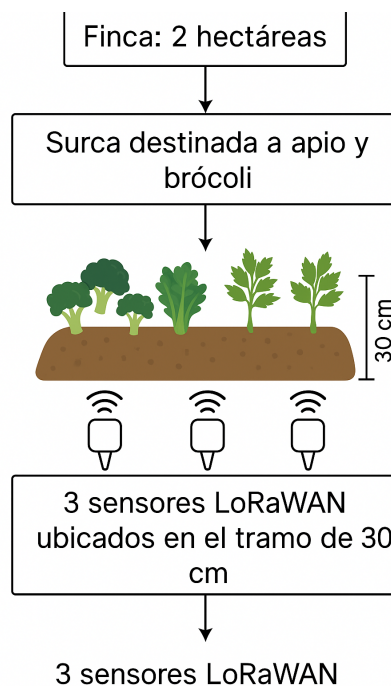


Figura 12: Distribución de sensores
Fuente: autoría propia.

En este tramo reducido se instalaron tres sensores LoRaWAN, ubicados dentro de esos mismos 30 cm, con el objetivo de medir directamente las condiciones del suelo. La elección de concentrar las mediciones en un área pequeña respondió a la necesidad de:

- Reducir la variabilidad interna del terreno.
- Garantizar condiciones de cultivo homogéneas.
- Obtener lecturas consistentes y comparables entre los dos escenarios experimentales planteados.

Este enfoque permitió registrar de manera precisa los cambios en humedad del suelo, temperatura, pH y variables ambientales, asegurando que los datos reflejaran el comportamiento real del cultivo en un punto representativo de la surca.

El entorno donde se llevó a cabo presenta un clima templado–húmedo caracterizado por temperaturas promedio entre 16 °C y 20 °C, humedad relativa superior al 75 %. Estas condiciones favorecen el crecimiento de cultivos de hoja como el apio y el brócoli, pero también generan escenarios de riesgo frente al estrés hídrico, lo cual fundamenta la necesidad de evaluar la cobertura de suelo como estrategia. Con el fin de establecer la comparación experimental, se definieron dos escenarios de medición:

1. **Escenario 1: Preparación del suelo, sin siembra:** En este escenario el suelo se deja al descubierto, sin ningún tipo de cobertura y sin siembra, esta fase corresponde a la preparación del terreno, en la cual se midió el comportamiento de las variables del suelo y del ambiente antes del proceso de siembra.

Para el proceso de preparación del suelo el agricultor aplicó biochar (carbón vegetal) incorporado al suelo con el fin de mejorar sus propiedades, aumentar la porosidad, retener la humedad y controlar plagas como las babosas. Asimismo, se incorporó húmus, utilizado para mejorar la fertilidad del suelo antes de la siembra.

2. **Escenario 2: Con cobertura, suelo con siembra y cobertura de maíz:** se aplicó una capa de rastrojo de maíz seco, distribuida manualmente sobre la superficie del terreno. Este material funciona como una barrera natural que protege el suelo de plagas y enfermedades, ayuda a conservar la humedad, conservación de nutrientes y aporta materia orgánica durante su descomposición.

Con el fin de establecer los parámetros de referencia utilizados en la evaluación de las condiciones de los cultivos, se definieron los rangos óptimos y críticos de las variables ambientales y de suelo para el brócoli y el apio. Estos rangos permiten identificar el nivel de estrés hídrico y el estado fisiológico de cada cultivo.

En la Tabla 3 se presentan los intervalos de humedad del suelo, temperatura del suelo, pH, humedad ambiental y temperatura ambiental que caracterizan cada nivel para los cultivos en estudio. Dichos valores fueron determinados a partir de literatura técnica y observaciones experimentales realizadas durante las pruebas de campo.

Tabla 3: Rangos de humedad, temperatura y pH para cultivos de brócoli y apio [4, 5].

Cultivo	Humedad Suelo	Temperatura Suelo	pH	Humedad Ambiental	Temperatura Ambiental	Rango
Brócoli	$\leq 60\%$	$\leq 16^{\circ}C$	≤ 6.0	$\leq 60\%$	$\leq 15^{\circ}C$	Mínimo
	$60\% < HS \leq 80\%$	$16^{\circ}C < T \leq 18^{\circ}C$	$6.0 < pH \leq 7.0$	$60\% < HA \leq 75\%$	$15^{\circ}C < T \leq 25^{\circ}C$	Normal
	$\geq 80\%$	$\geq 18^{\circ}C$	≥ 7.0	$\geq 75\%$	$\geq 25^{\circ}C$	Máximo
Apio	$\leq 75\%$	$\leq 15^{\circ}C$	≤ 6.0	$\leq 60\%$	$\leq 16^{\circ}C$	Mínimo
	$75\% < HS \leq 80\%$	$15^{\circ}C < T \leq 21^{\circ}C$	$6.0 < pH \leq 6.8$	$60\% < HA \leq 75\%$	$16^{\circ}C < T \leq 21^{\circ}C$	Normal
	$\geq 80\%$	$\geq 21^{\circ}C$	≥ 6.8	$\geq 75\%$	$\geq 21^{\circ}C$	Máximo

3.3.2. Implementación de la red LoRaWAN

Una vez definidos los escenarios de medición, se procedió a la implementación de la red LoRaWAN, la cual permite la captura, transmisión y almacenamiento de los datos obtenidos en los cultivos de apio y brócoli. Esta red se diseñó con el objetivo de garantizar conectividad de largo alcance en la zona rural y minimizar la pérdida de datos durante las mediciones.

3.3.2.1 Sensores LoRaWAN: Para la captura de los datos se hizo uso de tres sensores, cada uno de estos hace uso de tecnología LoRaWAN. En la Figura 13 se observan los tres sensores empleados en la implementación y las variables que mide cada uno.

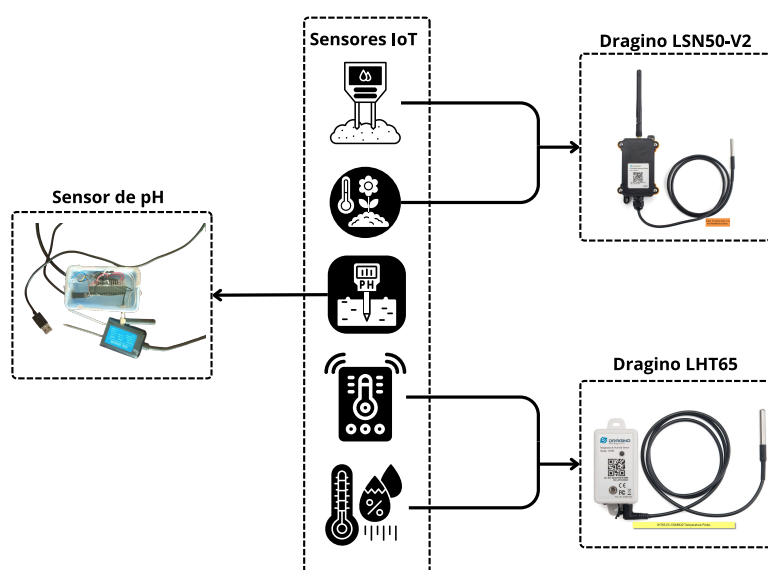


Figura 13: Sensores IoT
Fuente: autoría propia.

En la tabla 4 se definen claramente cómo se presentan los sensores LoRaWAN utilizados en la implementación del sistema, junto con sus principales características y parámetros de operación. Estos nodos fueron configurados con un intervalo de muestreo de 30 minutos, garantizando la recolección continua de datos en los dos escenarios definidos:

Tabla 4: Definición operacional de las variables del estudio.

Variable	Tipo	Instrumento / Sensor	Unidad de medida	Frecuencia de registro
Temperatura del suelo	Cuantitativa continua	Sensor Dragino LSN50	°C	1 dato/30 min
Humedad del suelo	Cuantitativa continua	Sensor Dragino LSN50	%	1 dato/30 min
pH del suelo	Cuantitativa continua	Sensor desarrollado (Raspberry Pi Pico + LoRa SX1276)	pH	1 dato/30 min
Temperatura ambiente	Cuantitativa continua	Sensor LHT65N	°C	1 dato/30 min
Humedad relativa ambiental	Cuantitativa continua	Sensor LHT65N	%	1 dato/30 min

Los sensores fueron previamente calibrados para garantizar las mediciones antes de su implementación en campo. Las calibraciones detalladas de cada sensor se presentan en los anexos, donde se documenta el procedimiento.

3.3.2.2. Configuración de sensores en el servidor: La configuración de los sensores se realiza bajo el modo LoRaWAN OTAA Clase A. En este esquema, OTAA (Over-The-Air Activation) corresponde al método de activación dinámica y segura que permite que un dispositivo se una a la red LoRaWAN mediante el intercambio de claves únicas de sesión. Por su parte, la Clase A define la forma en que el nodo transmite y recibe información [42].

El proceso de transmisión de datos y la secuencia de comunicación entre el nodo y el servidor LoRaWAN, se da por medio En este un mensaje Uplink. Posteriormente, el nodo abre dos breves ventanas de recepción denominadas RX1 y RX2, que ocurren aproximadamente uno y dos segundos después del envío, con el fin de escuchar posibles mensajes de respuesta (Downlink) provenientes del servidor. Si se recibe un mensaje, el dispositivo ejecuta los comandos; en lo contrario, continúa su ciclo normal entrando en modo Sleep para minimizar el consumo energético. Una vez transcurrido el intervalo programado, el nodo se despierta y repite el proceso, manteniendo así una comunicación periódica dentro de la red LoRaWAN.

Teniendo en cuenta esto, cada sensor debe ser registrado en el servidor ChirpStack, para establecer la comunicación entre los nodos y la red LoRaWAN. Este registro permite que el servidor identifique y autorice la conexión del dispositivo mediante el método OTAA. Para ello, se entra en Application y se crea una aplicación dentro del entorno de ChirpStack.

Seguido, se debe añadir cada sensor como un dispositivo independiente, asignándole sus identificadores únicos: **DevEUI**, **AppEUI** y **AppKey**. Estos parámetros son utilizados durante el proceso de activación para generar las claves de sesión que garantizan la comunicación cifrada entre el nodo y el servidor. Una vez completado el registro, los sensores pueden transmitir sus datos a través de mensajes uplink, los cuales son recibidos, decodificados y almacenados en la plataforma para su posterior análisis.

Finalmente, dentro del apartado Device Profiles del servidor, se observan los perfiles de los sensores previamente registrados en la aplicación. Igualmente, se ve la configuración tales como, la región de operación, la versión del protocolo LoRaWAN, la clase de dispositivo y el tipo de activación soportada. En la Figura 14 se muestran los tres sensores mencionados anteriormente, todos configurados bajo la región AU915, con versión LoRaWAN 1.0.3 y pertenecientes a la Clase A con soporte para el método de activación OTAA.

Name	Region	MAC version	Revision	Supports OTAA	Supports Class-B	Supports Class-C
Sensores PH	AU915	LoRaWAN 1.0.3	A	yes	no	no
Isrn50	AU915	LoRaWAN 1.0.3	A	yes	no	no
sensorht65	AU915	LoRaWAN 1.0.3	A	yes	no	no

Figura 14: Perfiles de los dispositivos registrados en el servidor ChirpStack.

3.3.2.3. Gateway LoRaWAN: El siguiente componente fue el nodo Mikrotik wAP LR9 Kit, el cual maneja tecnología LoRaWAN que es el encargado de recibir las tramas transmitidas por los sensores y retransmitir la información al servidor local. El gateway cumple con dos funciones principales:

1. **Receptor local de tramas LoRa:** decodifica las señales moduladas en LoRa enviadas por los sensores Dragino y el prototipo de pH.
2. **Enlace hacia el servidor de red:** transmite los datos hacia la Raspberry Pi 4 por medio del puerto UDP 1700, que ejecuta el ChirpStack, donde se registraron los dispositivos y el encolado de mensajes para su posterior sincronización con la nube de AWS.

Configuración y registro del gateway: Para la recibir los paquetes LoRa que vienen desde los sensores se utilizo un gateway Mikrotik wAP LR9 Kit [43], la cual incluye una antena LoRa integrada y una interfaz administrativa basada en el sistema operativo RouterOS.

1. **Acceso a Mikrotik wAP LR9 Kit:** Para acceder al dispositivo se hizo uso de **Winbox**, una aplicación que permite administrar y configurar dispositivos de red MikroTik RouterOS mediante una interfaz gráfica.

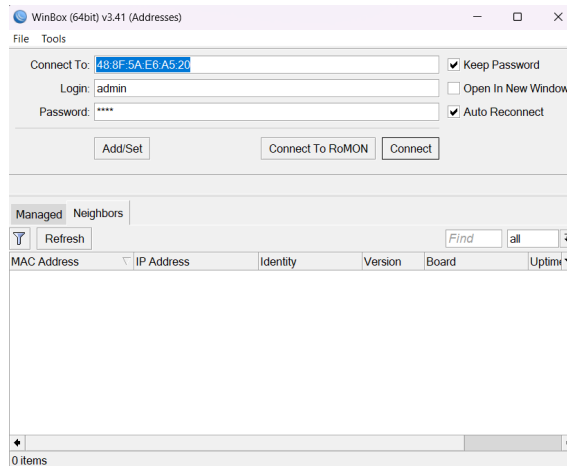


Figura 15: Ingreso a Mikrotik wAP LR9 Kit por Winbox

2. **Configuración de red en el Gateway por medio de Winbox:** Dentro del menú LoRa del sistema operativo RouterOS, se habilitó la opción Semtech UDP Packet Forwarder, un protocolo que permite el envío de los paquetes recibidos por el gateway hacia un servidor externo mediante una conexión UDP mediante el puerto 1700. Para esta configuración en la Figura 16 se especificaron los siguientes parámetros:

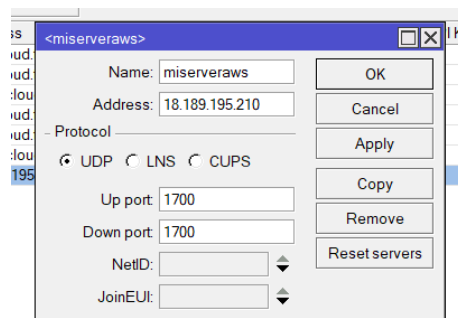


Figura 16: Configuración de UDP hacia ChirpStack

- **Address:** la dirección IP de la Raspberry Pi 4 donde está instalado ChirpStack.
- **Uplink Port:** 1700 (puerto por defecto para tramas ascendentes).
- **Downlink Port:** 1700 (puerto para tramas descendentes).
- Finalmente, se activa el servidor para permitir la transmisión continua de datos.

Una vez configurado el reenvío de paquetes mediante el protocolo **Semtech UDP Packet Forwarder**, se procedió al registro del gateway dentro de la plataforma **ChirpStack**, instalada localmente en la Raspberry Pi 4.

3. **Registro de Gateway en ChirpStack:** Para ello, se accedió a la interfaz web de ChirpStack desde un computador conectado a la misma red local, ingresando en el navegador la dirección IP del servidor (`http://192.168.88.254:8080`). Desde el panel principal, se seleccionó la opción Gateways y posteriormente Add Gateway, completando los siguientes parámetros:

- **Gateway ID:** dirección MAC del Mikrotik wAP LR9 kit, obtenida previamente desde WinBox.
- **Name:** Gateway.
- **Network Server:** servidor local configurado con la banda AU915.

Después de guardar los cambios, el gateway quedó registrado y activo en la lista de dispositivos dentro de ChirpStack. Para validar el correcto funcionamiento del gateway se supervisaron los registros del packet forwarder y el panel Live LoRa Frames de ChirpStack, confirmando la recepción continua de tramas *uplink* provenientes de los nodos (LSN50, LHT65 y pH). Asimismo, se comprobó la conectividad IP entre el gateway y la Raspberry Pi (puerto UDP 1700), sin pérdidas apreciables durante la transmisión de datos. Finalmente, en la Tabla 5 se presentan los parámetros utilizados para la configuración del gateway.

Tabla 5: Parámetros de configuración del Gateway LoRaWAN

Parámetro	Configuración
Banda de operación	AU915 (916.8 – 918.2 MHz)
Modulación	LoRa (Spread Spectrum)
Potencia máxima de transmisión	16 dBm
Servidor de red	ChirpStack en Raspberry Pi 4
Función principal	Receptor de tramas LoRa y reenvío al servidor local

3.3.2.4. Servidor local (ChirpStack en Raspberry Pi 4): Para la gestión de los datos capturados por los nodos, se implementó un servidor local en una Raspberry Pi 4, configurada con la plataforma **ChirpStack** utilizando contenedores Docker. Este servidor actúa como intermediario entre el gateway y la nube, asegurando la recepción, decodificación, almacenamiento temporal y posterior envío de los datos hacia los servicios de AWS.

Instalación de ChirpStack en Docker: La instalación de ChirpStack se realizó utilizando contenedores **Docker**, con el fin de facilitar el despliegue modular de los servicios. En la Raspberry Pi se instalaron los paquetes Docker Engine y Docker Compose, permitiendo levantar los contenedores correspondientes al Network Server, Application Server, Gateway Bridge y la base de datos PostgreSQL. Cada servicio se definió en un archivo `docker-compose.yml`, especificando las imágenes de ChirpStack, los puertos de comunicación (1700 para UDP y 8080

para la interfaz web) y los volúmenes de persistencia de datos. Una vez configurado, se ejecutó el comando:

```
sudo docker compose up -d
```

Con esto, los servicios de ChirpStack quedaron en funcionamiento como se observa en la Figura 17, permitiendo recibir los paquetes provenientes del gateway y gestionar la red local de sensores. [44]

```
albeiro@raspberrypi:~ $
albeiro@raspberrypi:~ $
albeiro@raspberrypi:~ $ git clone https://github.com/chirpstack/chirpstack-docker.git
cd chirpstack-docker
Clonando en 'chirpstack-docker'...
remote: Enumerating objects: 572, done.
remote: Counting objects: 100% (422/422), done.
remote: Compressing objects: 100% (115/115), done.
remote: Total 572 (delta 368), reused 307 (delta 307), pack-reused 150 (from 1)
Recibiendo objetos: 100% (572/572), 97.36 KiB | 823.00 KiB/s, listo.
Resolviendo deltas: 100% (398/398), listo.
albeiro@raspberrypi:~/chirpstack-docker $ ls
configuration  docker-compose.yml  LICENSE  Makefile  README.md
albeiro@raspberrypi:~/chirpstack-docker $ sudo nano docker-compose.yml
albeiro@raspberrypi:~/chirpstack-docker $ ^C
albeiro@raspberrypi:~/chirpstack-docker $ sudo apt-get update
sudo apt-get install docker.io docker-compose -y
```

Figura 17: Instalación de Docker para ChirpStack en Raspberry Pi

Integración del sistema MQTT: Para enlazar ChirpStack con el sistema de procesamiento local, se utilizó el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). ChirpStack publica los mensajes de cada dispositivo LoRaWAN en el tópico `application/+device/+event/up`, en la Figura 18 se observa la recepción de los datos que llegan, estos contienen la información de los sensores en formato JSON.





2025-10-24 16:57:52	 up	DR: 5	Data: 2500000021623a189a010000deb88a40a0bd94c2	FCnt: 38	FPort: 2
2025-10-24 16:57:36	 up	DR: 5	Data: 240000000c233a189a010000f4b78a40a4bd94c2	FCnt: 37	FPort: 2
2025-10-24 16:57:20	 up	DR: 5	Data: 23000000c5e539189a010000f4b78a4096bd94c2	FCnt: 36	FPort: 2
2025-10-24 16:57:01	 up	DR: 5	Data: 22000000449e39189a01000041b78a4088bd94c2	FCnt: 35	FPort: 2

Figura 18: Publicación de mensajes en ChirpStack

Con el fin de capturar estos mensajes y almacenarlos localmente antes de su envío a la nube, se desarrolló un script en figura 20, que actúa como puente MQTT entre ChirpStack y la base de datos SQLite. Este script escucha los mensajes, los decodifica y los guarda en una tabla denominada **queue**.

Igualmente, el Docker despliega el contenedor Eclipse Mosquitto este utiliza el puerto 1883 para gestionar las publicaciones y suscripciones MQTT dentro de la Raspberry Pi. De esta forma, actúa como broker MQTT local dentro de la arquitectura. Este servicio permite la comunicación entre: Application Server de

ChirpStack y con el sistema de procesamiento local encargado de la encolación de datos.

```
vale@raspberrypi:~$ docker ps
CONTAINER ID   IMAGE                                COMMAND                  CREATED        STATUS        PORTS
e923f06cd142   chirpstack/chirpstack-rest-api:4    "/usr/bin/chirpstack..." 7 weeks ago   Up 2 weeks   0.0.0.0:8090->8090/tcp, :::8090->8090/tcp
e55a7ad471ae   chirpstack/chirpstack:4            "/usr/bin/chirpstack..." 7 weeks ago   Up 2 weeks   0.0.0.0:8080->8080/tcp, :::8080->8080/tcp
7810b2fc8ca    chirpstack/chirpstack-gateway-bridge:4  "/usr/bin/chirpstack..." 7 weeks ago   Up 2 weeks   0.0.0.0:1700->1700/udp, :::1700->1700/udp
1             1                                     "                        7 weeks ago   Up 2 weeks   0.0.0.0:3001->3001/tcp, :::3001->3001/tcp
43fd09844d9d   chirpstack/chirpstack-gateway-bridge:4  "/usr/bin/chirpstack..." 7 weeks ago   Up 2 weeks   0.0.0.0:3001->3001/tcp, :::3001->3001/tcp
basicstation_1
53ea0fd5beaa   postgres:14-alpine                "docker-entrypoint.s..." 7 weeks ago   Up 2 weeks   5432/tcp
8ee197e7c697   redis:7-alpine                    "docker-entrypoint.s..." 7 weeks ago   Up 2 weeks   6379/tcp
6279862b1553   eclipse-mosquitto:2               "/docker-entrypoint..." 7 weeks ago   Up 2 weeks   0.0.0.0:1883->1883/tcp, :::1883->1883/tcp
vale@raspberrypi:~$
```

Figura 19: Contenedores activos en la Raspberry Pi 4 tras la instalación de ChirpStack mediante Docker.

En la Figura 19 se muestran los contenedores activos en la Raspberry Pi 4. Se identifican los siguientes contenedores:

- **chirpstack** y **chirpstack-rest-api**: gestionan el *Network Server* y el *Application Server*, responsables de la administración de dispositivos y aplicaciones LoRaWAN.
- **chirpstack-gateway-bridge**: recibe las tramas LoRaWAN provenientes del gateway y las reenvía al servidor mediante el protocolo MQTT interno.
- **postgres**: almacena la información de red, configuraciones y registros de dispositivos.
- **redis**: actúa como sistema de mensajería interna para la comunicación entre los diferentes módulos de ChirpStack.
- **mosquitto**: corresponde al **broker MQTT local** encargado de publicar los mensajes generados por ChirpStack y distribuirlos a los suscriptores, entre ellos el script Python que gestiona la cola de datos (`aws-chirpstack-bridge`).

La correcta ejecución de estos contenedores confirma el correcto funcionamiento del entorno local donde realiza la captura, almacenamiento y retransmisión de los datos generados por los sensores. De esta manera, los datos decodificados por ChirpStack son publicados en el tópic y posteriormente capturados por el script Python que guarda la información en la base de datos SQLite bajo una estructura FIFO (First In, First Out); el proceso se representa en el diagrama de flujo.

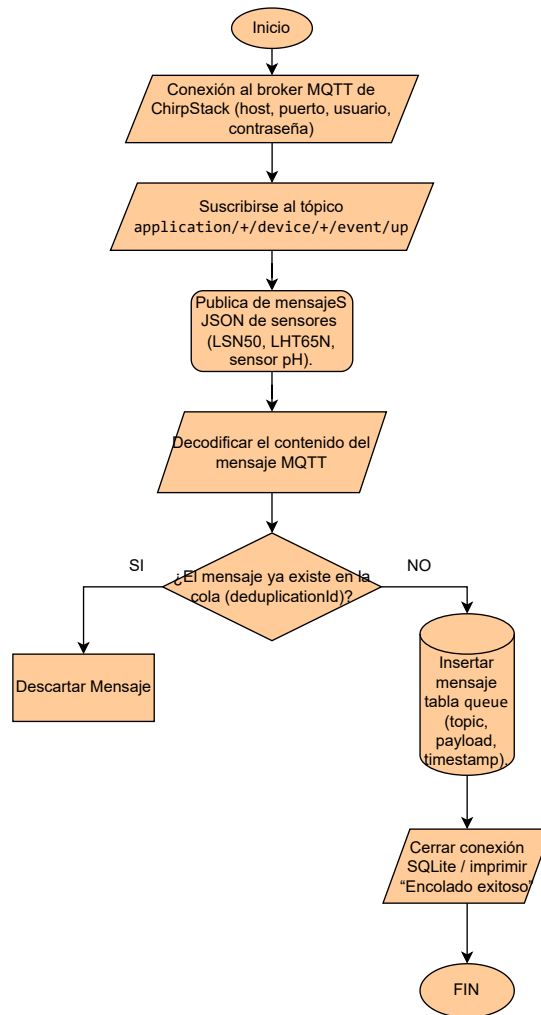


Figura 20: Flujo captura de datos desde ChirpStack a la base de datos local.

Implementación del sistema en cola y conexión con AWS: Finalmente, se realiza la conexión del servidor local con AWS, mediante un segundo script de Python que permite ejecutar un ciclo continuo de publicación. Este proceso establece una conexión mediante TLS (Transport Layer Security) con el servicio AWS IoT Core, por medio de los certificados digitales. Los datos almacenados en la base local se publican en bloques.

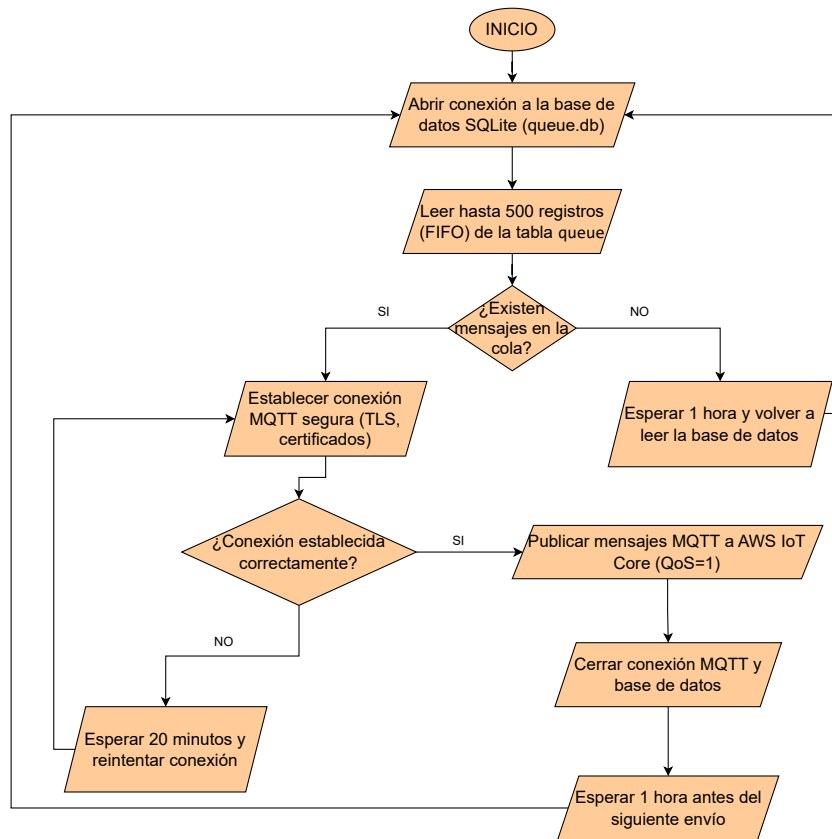


Figura 21: Flujo de datos desde la base local hacia AWS IoT Core mediante el sistema en cola.

La Figura 21 representa el funcionamiento del sistema en cola encargado de la publicación de datos desde la base local hacia AWS IoT Core. El proceso inicia con la lectura de los registros almacenados en la base de datos SQLite, donde se conservan temporalmente las mediciones provenientes de los sensores.

Primero, se establece una conexión con la base de datos local y consulta los mensajes pendientes en orden FIFO (First In, First Out). Si no existen registros por enviar, el sistema entra en un estado de espera de una hora antes de volver a consultar la cola. En caso de que se detecten datos pendientes, el proceso intenta establecer una conexión con AWS IoT Core. De manera que, el sistema publica los mensajes de forma secuencial. Si ocurre un fallo de conexión, el sistema activa un mecanismo de reintento automático cada 20 minutos hasta restablecer la comunicación.

Finalmente, tras completar el envío de todos los registros, el proceso entra en un modo de espera de una hora antes de iniciar nuevamente el ciclo de verificación y publicación. Este esquema permite mantener la integridad de los datos y asegurar su transmisión confiable hacia la nube, incluso en entornos con conectividad inestable. En la Tabla 6 se presentan los parámetros finales del servidor

local.

Tabla 6: Parámetros del servidor local con ChirpStack en Raspberry Pi 4

Parámetro	Configuración
Hardware	Raspberry Pi 4 Model B (4GB RAM)
Software principal	ChirpStack (Network & Application Server)
Base de datos	PostgreSQL con sistema de cola FIFO
Política de almacenamiento	First In, First Out (FIFO)
Frecuencia de sincronización	1 hora (reintento cada 20 min)
Función principal	Recepción, encolado temporal y envío de datos a la nube AWS

3.3.3 Implementación de la arquitectura en la nube AWS: En la Figura 22 se muestra la arquitectura que se realizó en el entorno de **Amazon Web Services (AWS)**, integrando los servicios de IoT Core, Lambda, DynamoDB, S3 y QuickSight para garantizar el procesamiento y almacenamiento automatizado de los datos provenientes de los sensores instalados en campo. A diferencia de la arquitectura general planteada en el diseño, esta implementación incluye las reglas, protocolos y disparadores que permiten la comunicación entre las diferentes capas del sistema.

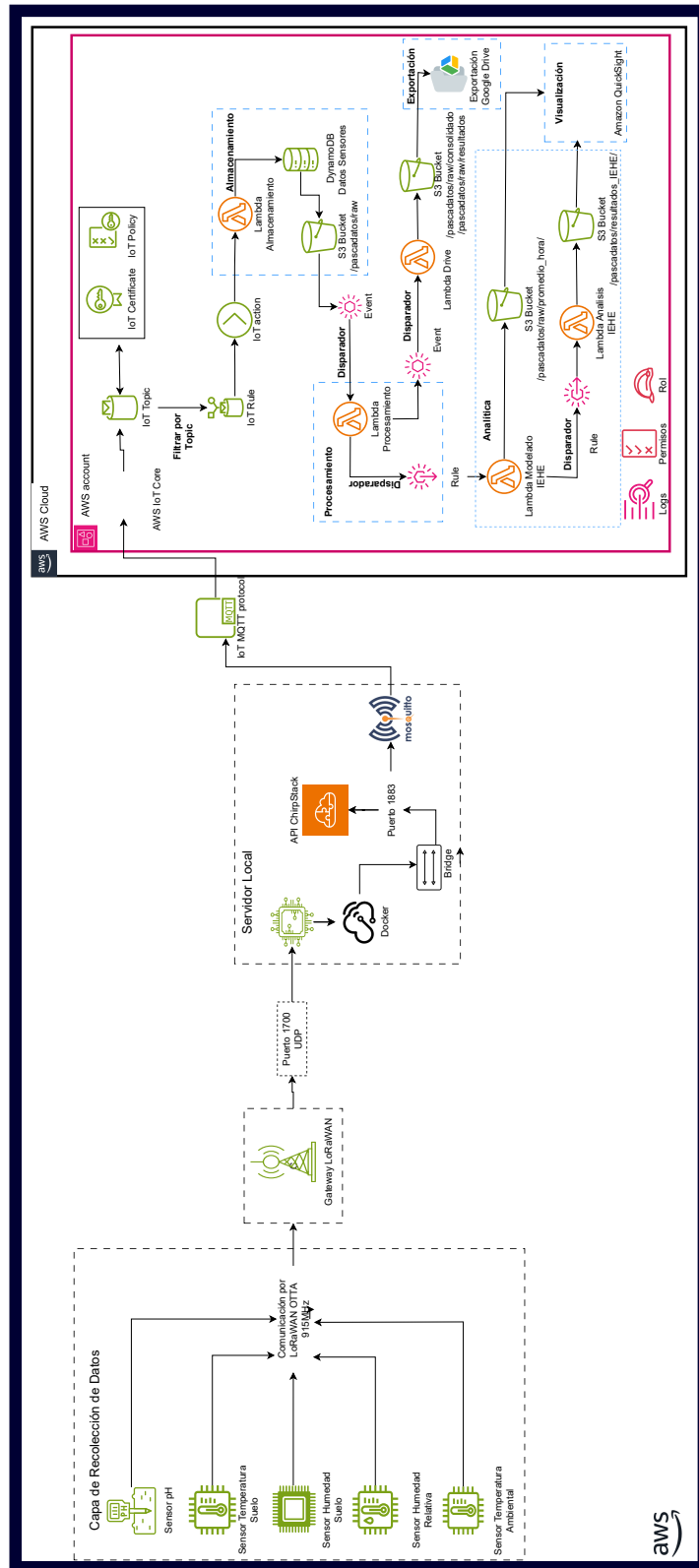


Figura 22: Arquitectura implementada en AWS.
Fuente: autoría propia.

- **Capa de recolección:** los nodos LoRaWAN (pH, temperatura, humedad del suelo, humedad relativa y temperatura ambiental) transmiten los datos mediante el protocolo LoRaWAN OTAA hacia el Gateway. Este dispositivo reenvía los paquetes hacia el servidor local Raspberry Pi 4, donde ejecuta la plataforma de ChirpStack. El servidor decodifica los mensajes, los almacena temporalmente en una base de datos y los publica hacia la nube mediante el protocolo MQTT, utilizando el certificado IoT y la política IoT de autenticación.
- **Capa de almacenamiento en AWS:** los mensajes son recibidos por el servicio de AWS IoT Core, donde una IoT Rule filtra los datos por el topic y ejecuta una función nombrada **Lambda Almacenamiento**, como se observa en la figura 23. Esta función decodifica los paquetes, clasifica las variables y almacena los registros tanto en la base de datos DynamoDB y bucket S3 en formato (.csv).

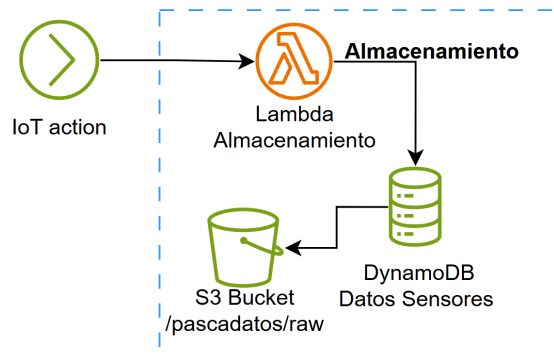


Figura 23: Proceso de Almacenamiento en AWS.

Para comprender el funcionamiento interno de la primera función, encargada del almacenamiento inicial de los datos, se presenta en la figura 24 el diagrama de flujo. En este proceso, la función realiza la decodificación de los mensajes JSON, convierte los datos en formatos compatibles con DynamoDB y guarda los registros tanto en la base de datos como en el servicio de almacenamiento S3. Además, genera dos archivos individuales en formato JSON y CSV nombrado *consolidado.csv*, el cual se actualiza cada hora.

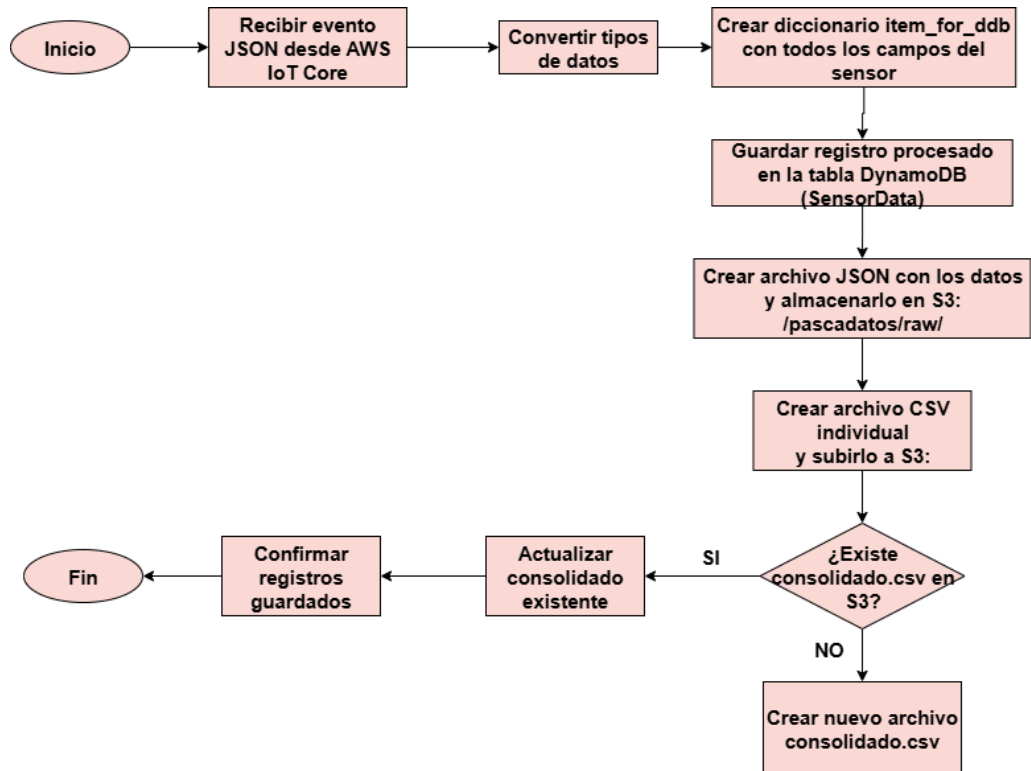


Figura 24: Diagrama de Flujo de la Lambda Almacenamiento.

- Procesamiento de los datos:** Mediante una regla programada en Amazon EventBridge, se activa una segunda función nombrada **Lambda Procesamiento** figura 25, encargada de verificar la integridad de los datos, eliminar duplicados, ordenar cronológicamente los registros y generar el consolidado final, almacenado en S3.

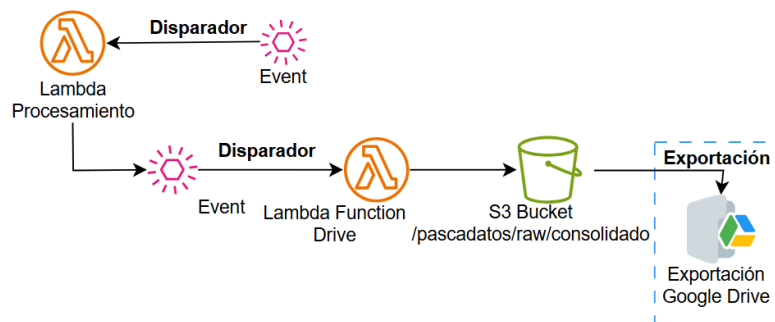


Figura 25: Procesamiento de los datos en AWS.

En la Figura 26 se muestra el diagrama de flujo que describe las principales etapas del proceso de validación y reconstrucción del consolidado.

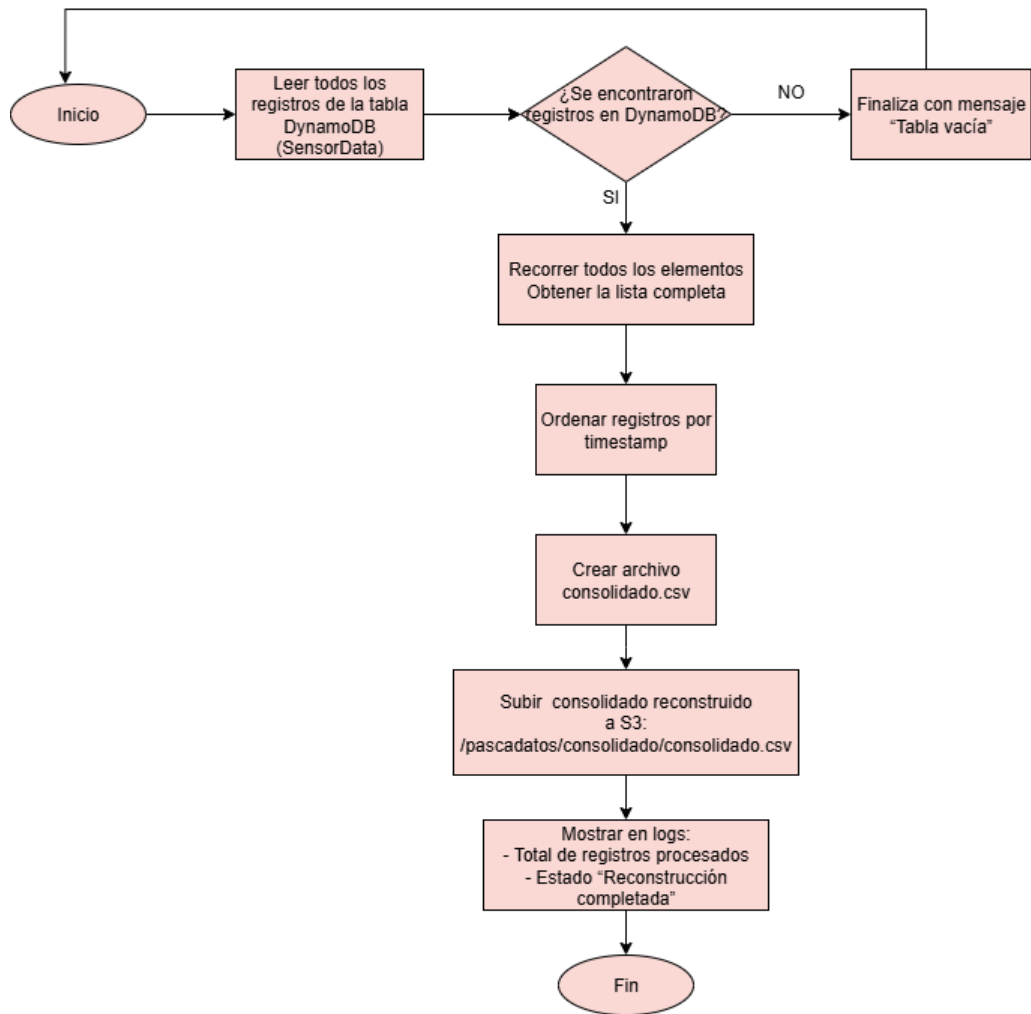


Figura 26: Diagrama de flujo de la función Lambda Procesamiento.

Al finalizar su ejecución, se dispara cada hora una tercera función, **Lambda Function Drive**; realiza la exportación automática del archivo consolidado hacia una carpeta de **Google Drive**, actuando como copia de respaldo y acceso externo a la información, la cual se actualiza cada hora.

- **Capa de Analítica:** Seguido se ejecuta una cuarta función llamada **Lambda Modelado IEHE**, cumple el rol de procesar, analizar y generar indicadores de estrés hídrico a partir de los datos recolectados por los sensores del cultivo.

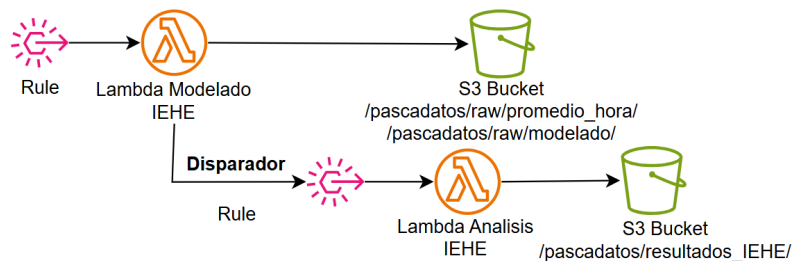


Figura 27: Capa analítica modelado del IEHE.

Su funcionamiento inicia al leer el consolidado almacenado en Amazon S3, el cual contiene todos los registros de las variables. Una vez obtenidos los datos, convierte las marcas de tiempo en horario de Colombia. Posteriormente, agrupa los valores por fecha, hora y marca de tiempo final, calculando el promedio de todas las variables y generando un archivo promedio en formato .xlsx y .csv, que se almacenan en el Bucket de S3.

A partir de estos promedios, se realiza el cálculo del Índice Empírico de Estrés Hídrico (IEHE), separando los datos en dos etapas experimentales: sin cobertura y con cobertura. Para cada conjunto, calcula la presión de vapor de saturación y real, el déficit de presión de vapor (VPD) y las variables normalizadas de temperatura y humedad del suelo, con las que obtiene el valor del IEHE y su clasificación en tres niveles:

1. **Bajo:** menor de 0.5
2. **Moderado:** entre 0.5 a 0.7
3. **Alto:** Mayor de 0.7

Por ende, los resultados se almacenan en la carpeta modelado/, generando dos archivos con los resultados del estrés hídrico con y sin cobertura. Igualmente, la función incluye un bloque de notificaciones automáticas que envía una alerta mediante Amazon SNS, notificando al agricultor sobre las condiciones críticas del cultivo, que se activa con los siguientes parámetros:

1. Nivel alto de estrés hídrico.
2. Nivel bajo de estrés hídrico.
3. pH por encima de 7.0 y menor de 5.0

Los umbrales definidos para estas alertas fueron establecidos con base en la experiencia del agricultor, quien indicó que el estrés hídrico alto se asocia principalmente a un exceso de agua en el suelo que puede afectar el suelo. Igualmente, con bajo estrés hídrico, ya que presenta un déficit de estrés, mientras que las variaciones del pH son un indicador importante del

estado del suelo, ya que valores demasiado ácidos o alcalinos alteran la disponibilidad de nutrientes y la salud general del cultivo.

Finalmente, en la figura 27 se observa la activación de una quinta función, nombrada **Lambda Análisis IEHE**, la cual complementa el procesamiento analítico del sistema, al realizar un estudio estadístico sobre la dinámica temporal del Índice Empírico de Estrés Hídrico (IEHE), con los escenarios sin cobertura y con cobertura. En la figura 28 se tiene el diagrama de flujo implementado para esta función.

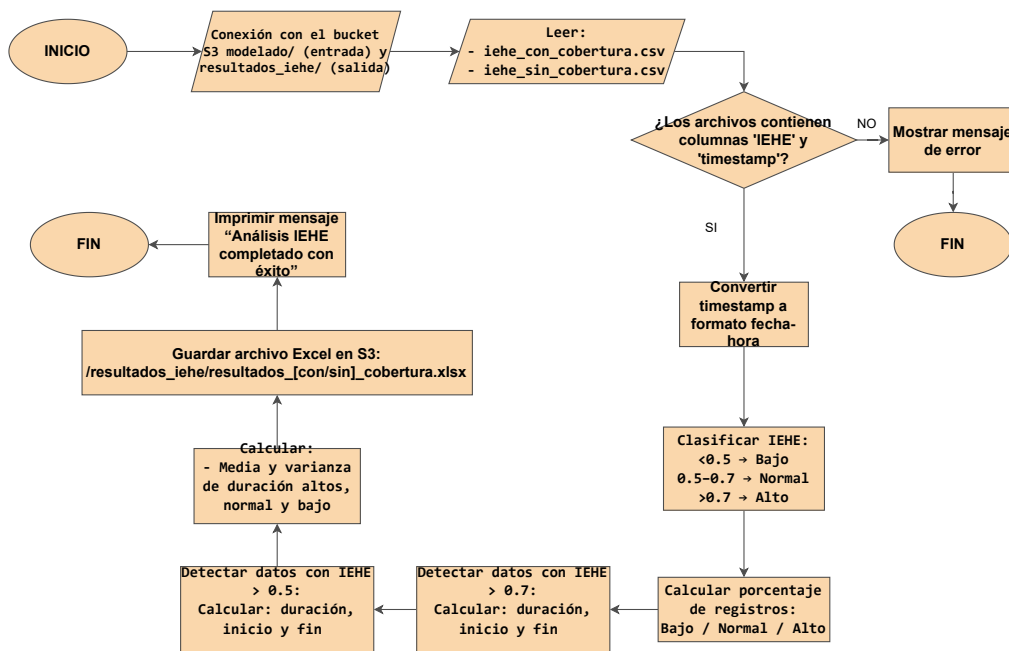


Figura 28: Capa de análisis estadístico con la función Lambda Análisis IEHE.

La **Lambda Análisis IEHE** accede a la carpeta de modelado ubicada en el bucket de S3, donde se encuentra el cálculo del IEHE separado por escenario. Su ejecución inicia al descargar ambos conjuntos de datos desde Amazon S3 y convertir la columna de tiempo (timestamp) en un formato unificado que permita organizar cronológicamente los registros. A partir de los valores del IEHE, la función clasifica cada lectura en tres niveles mencionados anteriormente (bajo, normal y alto).

Posteriormente, identifica los periodos en los que el IEHE se mantiene por encima de 0.7 y por debajo de 0.5, calculando para cada evento su tiempo de inicio, final y duración en horas. Esto permite obtener indicadores representativos del comportamiento hídrico, como el tiempo promedio y la varianza de los periodos de estrés alto y estrés bajo, así como las medias y varianzas de los valores dentro del rango normal (0.5–0.7). Por ultimo, se genera un archivo formato excel, el cual se guarda en la carpeta dentro del

mismo bucket S3.

- **Capa de Visualización:** los datos procesados son utilizados por Amazon QuickSight para construir paneles analíticos interactivos que representan la evolución temporal de las variables medidas y comparan los escenarios de cultivo con y sin cobertura de suelo. Para el control de seguridad y trazabilidad, se integraron los servicios de AWS Identity and Access Management (IAM) y Amazon CloudWatch, responsables de la gestión de permisos, registros de logs y monitoreo del rendimiento de las funciones Lambda.

3.3.4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Las pruebas de funcionamiento tuvieron como propósito validar el desempeño operativo del sistema IoT diseñado para la caracterización del estrés hídrico en cultivos orgánicos. En esta etapa se comprobó la correcta transmisión, recepción y procesamiento de los datos a través de toda la arquitectura del sistema, desde la adquisición de las variables por los sensores hasta su almacenamiento y análisis en la nube.

El proceso experimental se centró en verificar la comunicación efectiva entre los distintos componentes del sistema: los nodos sensores, gateway LoRaWAN, servidor local y AWS. Para ello, se realizaron pruebas de conexión, transmisión y recepción de datos, midiendo la estabilidad del enlace y la continuidad del flujo de información durante períodos prolongados de operación.

3.3.4.1 Procesamiento y limpieza de datos en la nube AWS: En esta fase se implementaron servicios Amazon Web Services (AWS) con el propósito de realizar la exportación, organización y limpieza de los datos recopilados, correspondientes a las actividades 1 y 2 de la Fase 3.

Procesamiento de los datos: Una vez que las lecturas provenientes de los sensores son recibidas por el servidor local ChirpStack, los paquetes LoraWAN son decodificados y almacenados temporalmente. A continuación, la Raspberry Pi sincroniza dichos registros con la nube utilizando el servicio AWS IoT Core. Este servicio gestiona las conexiones mediante el protocolo MQTT, validando la autenticación, autorización y seguridad de cada mensaje.

Cada paquete de datos recibido por IoT Core activa una función en AWS Lambda (Lambda 1). Esta función cumple la tarea de almacenar y procesar los datos, extrayendo las variables de interés de cada registro en formato JSON 29.

```

{
  "sensor_id": "a84041595185b277",
  "timestamp": "2025-09-20T23:27:00.272128+00:00",
  "BatV": 3.659,
  "Data_time": "2025-09-20 23:27:06",
  "deviceName": "sensorlsn50",
  "deviceProfileName": "lsn50",
  "Door_status": "OPEN",
  "EXTI_Trigger": "FALSE",
  "Hum_SHT31": 96.5,
  "Node_type": "LSN50-S31",
  "TempC_SHT31": 17.9
}

```

Figura 29: Formato JSON, como llegan los datos.

Entre las principales variables se encuentran:

- Variables de suelo: pH, humedad del suelo y temperatura de suelo.
- Variables medioambientales: temperatura ambiental y humedad relativa.
- Datos técnicos: identificador del dispositivo, marca temporal (timestamp), latitud, longitud y nivel de RSSI.

Una vez que las variables son extraídas, la función almacena en la base de datos de Amazon DynamoDB, en la Figura 30 se observa el almacenamiento de los datos, organizados por su identificador, asimismo el timestamp, permitiendo así realizar consultas rápidas y flexibles sobre grandes volúmenes de datos.

<input type="checkbox"/>	sensor_id (Cadena)	timestamp (Cadena)	Bat_status	BatV	Data_time	deviceNa...	deviceProfileName
<input type="checkbox"/>	a84041595185b277	2025-09-15T11:12:08....		3.659	2025-09-1...	sensorlsn50	lsn50
<input type="checkbox"/>	a84041595185b277	2025-09-15T11:17:08....		3.659	2025-09-1...	sensorlsn50	lsn50
<input type="checkbox"/>	a84041595185b277	2025-09-15T11:22:08....		3.659	2025-09-1...	sensorlsn50	lsn50
<input type="checkbox"/>	a84041595185b277	2025-09-15T11:27:08....		3.659	2025-09-1...	sensorlsn50	lsn50
<input type="checkbox"/>	a84041595185b277	2025-09-15T11:32:08....		3.659	2025-09-1...	sensorlsn50	lsn50
<input type="checkbox"/>	a84041595185b277	2025-09-15T11:37:08....		3.659	2025-09-1...	sensorlsn50	lsn50
<input type="checkbox"/>	a84041bb1d5ba0f0	2025-09-20T22:29:53....	3	3.081		sensorlht65	sensorlht65
<input type="checkbox"/>	a84041bb1d5ba0f0	2025-09-20T22:49:53....	3	3.082		sensorlht65	sensorlht65
<input type="checkbox"/>	a84041bb1d5ba0f0	2025-09-20T23:09:52....	3	3.081		sensorlht65	sensorlht65
<input type="checkbox"/>	a84041bb1d5ba0f0	2025-09-20T23:29:52....	3	3.083		sensorlht65	sensorlht65
<input type="checkbox"/>	a84041bb1d5ba0f0	2025-09-20T23:49:52....	3	3.082		sensorlht65	sensorlht65
<input type="checkbox"/>	a84041bb1d5ba0f0	2025-09-21T00:09:52....	3	3.082		sensorlht65	sensorlht65
<input type="checkbox"/>	a84041bb1d5ba0f0	2025-09-21T00:29:51....	3	3.082		sensorlht65	sensorlht65

Figura 30: Tabla de datos en DynamoDB.

En paralelo, la misma función genera archivos .csv con la información estructurada y los exporta al servicio Amazon Simple Storage Service (S3), donde los registros se almacenan siguiendo una jerarquía basada en tipo de sensor y la fecha:

```
/pascadatos/raw/0000000000000001/2025-08-27.csv  
/pascadatos/raw/a84041595185b277/2025-08-27.csv  
/pascadatos/raw/a84041bb1d5ba0f0/2025-08-27.csv
```

Esta organización en S3 permite mantener trazabilidad y facilita la comparación de datos históricos, además de servir como respaldo para el análisis de tendencias y correlaciones entre las variables de suelo y ambientales.

Limpieza y depuración de los datos: Para garantizar la confiabilidad e integridad de la información recopilada, se implementó una segunda función denominada AWS Lambda 2, encargada del proceso de limpieza, validación y reconstrucción del consolidado principal de datos. Esta función se ejecuta automáticamente cada hora.

La función accede al bucket de Amazon S3, lee los archivos generados por Lambda 1, y realiza una verificación completa de los registros para garantizar que todos los datos hayan sido transferidos correctamente desde el servidor local hacia la nube. En caso de detectar inconsistencias como paquetes incompletos, valores perdidos o lecturas fuera de rango, la función ejecuta un proceso de reconstrucción del consolidado, asegurando que el archivo resultante contenga la totalidad de las mediciones registradas por los sensores LoraWAN. Durante este proceso, la función aplica un conjunto de filtros de validación para garantizar la coherencia de la información:

1. Verifica que los valores de los sensores sean válidos.
2. Eliminación de registros duplicados o nulos que puedan generarse durante la transmisión LoraWAN.
3. Verificación de sincronización de paquetes entre el archivo original y el consolidado reconstruido, asegurando que no existan pérdidas de datos entre el servidor local y AWS.

Seguido de esto, los datos limpios son almacenados nuevamente en el consolidado final:

```
/pascadatos/consolidado/
```

Una vez completado el proceso de reconstrucción y verificación, se ejecuta la función que activa la exportación del consolidado, hacia una carpeta compartida en Google Drive, asegurando la disponibilidad de los datos para su análisis externo y garantizando el respaldo fuera del entorno AWS.

Posteriormente, se ejecuta una tercera función, la cual toma como entrada el archivo consolidado y genera un nuevo documento de análisis en formato **Excel**

(.xlsx). En este archivo, la función agrupa los datos por intervalos de una hora, calculando los promedios correspondientes de cada variable registrada. Asimismo, calcula el índice empírico del estrés hídrico (IEHE), generando dos archivos con y sin cobertura, los cuales se actualizan cada hora.

```
/pascadatos/promedios_excel/  
/pascadatos/modelado/con_cobertura.csv/  
/pascadatos/modelado/sin_cobertura.csv/
```

Teniendo esta arquitectura, el sistema mantiene la coherencia temporal, evita pérdidas de información y ofrece un entorno de monitoreo robusto para la caracterización del estrés hídrico en los cultivos orgánicos de apio y brócoli.

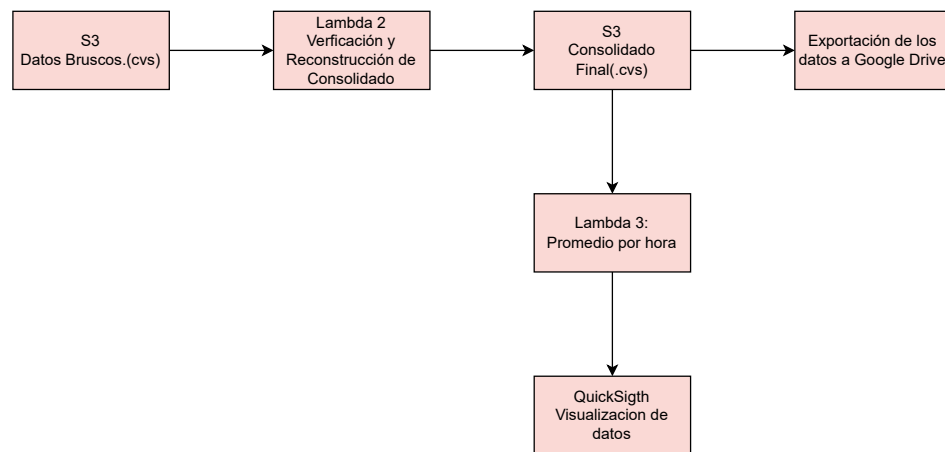


Figura 31: Flujo de limpieza, reconstrucción y visualización de datos en AWS.

Visualización de datos en Amazon QuickSight: Una vez generado los archivos en el bucket de Amazon S3, se importan los datos de la carpeta de promedios y del modelado. De esta forma, se realiza directamente la conexión en QuickSight por medio de S3. Esta visualización facilita identificar el comportamiento hídrico en función de la cobertura orgánica de maíz, evidenciando patrones en la retención de humedad, la estabilidad térmica, la variación del pH a lo largo del día y el nivel de estrés hídrico.

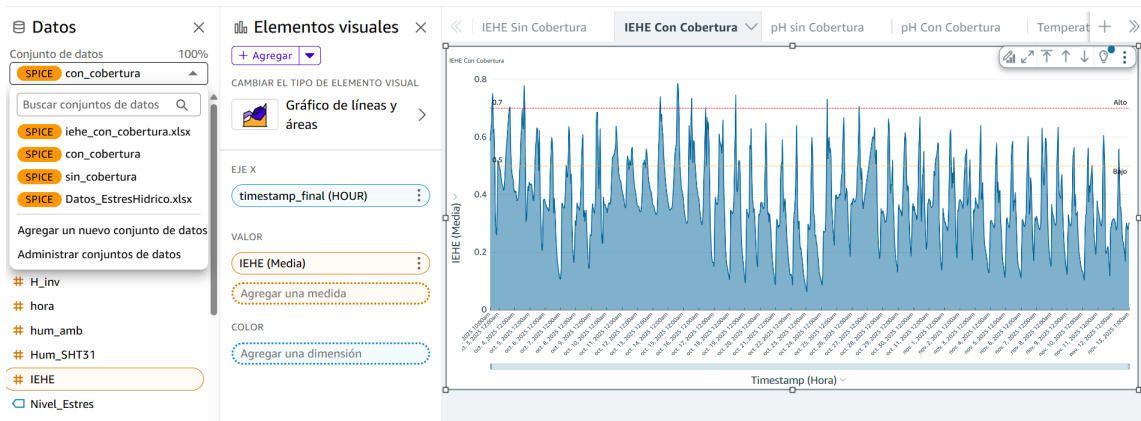


Figura 32: Base de Datos en QuickSight

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de los datos recolectados por la red de sensores IoT instalada en los dos escenarios experimentales: con y sin cobertura de suelo. El análisis tiene como propósito evaluar el comportamiento de las variables de temperatura y humedad del suelo, temperatura y humedad ambiental, y el índice empírico de estrés hídrico (IEHE), con el fin de determinar la influencia de la cobertura orgánica en la reducción del estrés en los cultivos. Las mediciones se realizaron en dos procesos diferentes de acuerdo con los requerimientos solicitados por el agricultor. Primero, se realizaron mediciones sin cobertura de suelo para evaluar la preparación o descanso del suelo sin cobertura y sin siembra. Segundo, se evalúa la cobertura con la siembra y la cobertura (mulch de maíz).

4.1. ANÁLISIS DEL SUELO EN PROCESO DE PREPARACIÓN DEL SUELO SIN COBERTURA

Las mediciones en el proceso de preparación de suelo buscan establecer al agricultor el estado del suelo antes de realizar la siembra y la aplicación de la cobertura. En el análisis se incluyen humedad de suelo, temperatura de suelo y pH, para ello se tomaron al rededor de 4320 datos, cada uno de los sensores tomo medidas cada 30 minutos durante un mes.

4.1.1. Humedad de Suelo

La Figura 33 presenta el comportamiento temporal de la humedad del suelo sin cobertura durante el periodo del 27 de agosto y el 2 de octubre del año actual. En este escenario, el terreno se mantuvo completamente expuesto, sin la aplicación de mulch de maíz para el proceso de preparación del suelo.

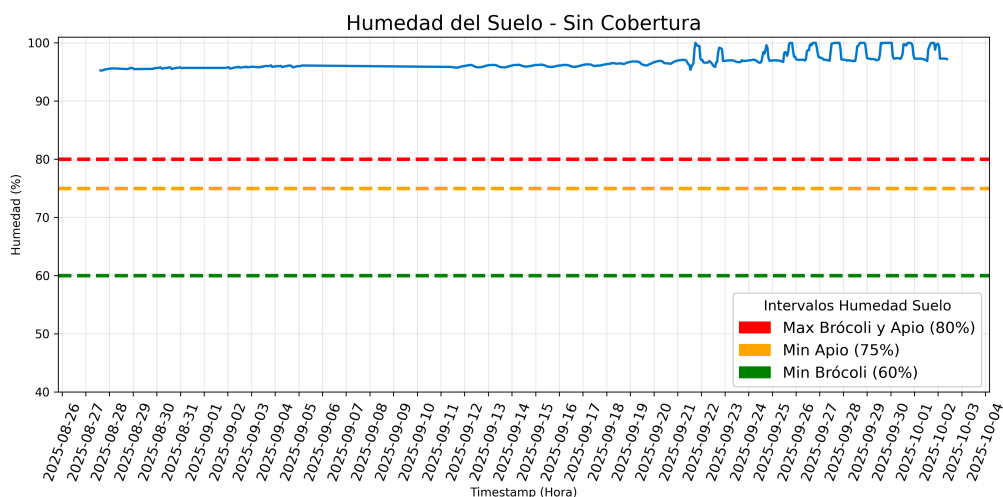


Figura 33: Humedad de suelo sin cobertura

Durante el periodo de medición, los valores de humedad se mantuvieron por en-

cima del 90 %, alcanzando el 100 % en algunos días. Asimismo, se evidencian pequeñas variaciones hacia el final de la medición, donde la humedad desciende de forma leve y vuelve a recuperarse rápidamente.

4.1.2. Temperatura de Suelo

Se muestra el comportamiento de la temperatura del suelo sin cobertura en la figura 34. Se observa una mayor oscilación, entre 14 °C y 22 °C. Durante el día, la temperatura del suelo aumenta por la radiación solar, mientras que durante la noche y madrugada, los valores descienden de forma notoria. Sin embargo, algunos están por debajo del límite inferior, como valores por encima del umbral establecido para los cultivos de apio y brócoli lo que podría afectar su desarrollo si se mantienen durante periodos prolongados.

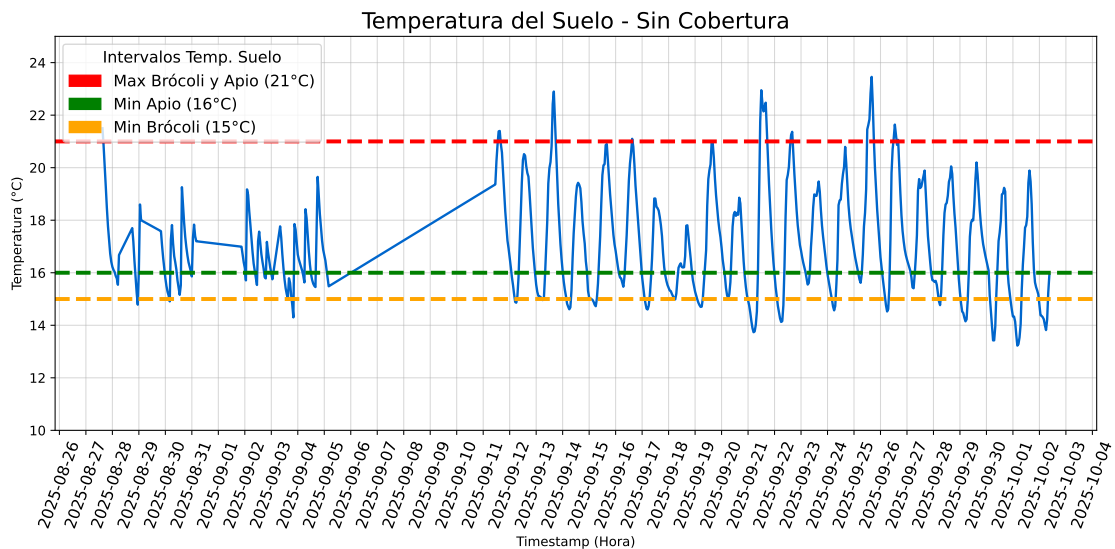


Figura 34: Temperatura del suelo sin cobertura

4.1.3. pH del Suelo

Se presenta el pH del suelo sin la cobertura en el proceso de preparación del suelo para la siembra, donde los valores registrados se ubicaron principalmente entre 5.0 y 6.3, aunque en varios momentos se observaron descensos por debajo de 5, lo que indica una acidez elevada. En el caso del brócoli y el apio, el rango ideal de pH se encuentra entre 6.0 y 7.0, sin embargo, los valores menores representan condiciones poco favorables para su desarrollo.

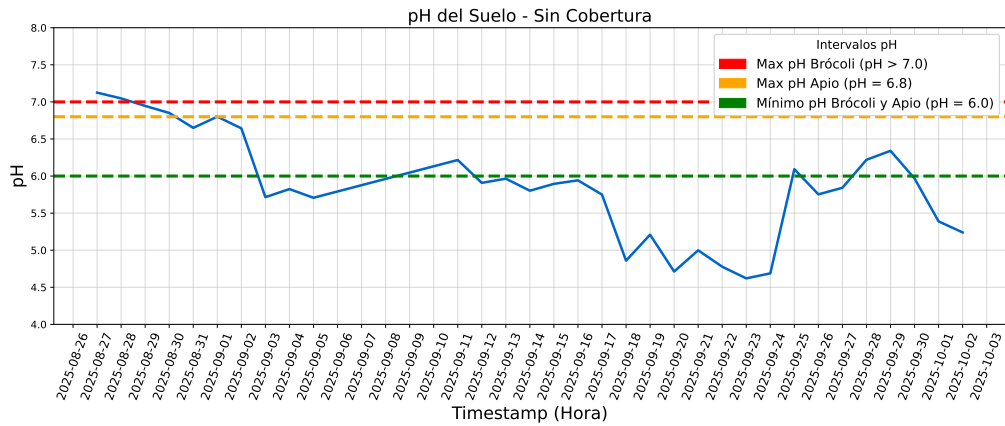


Figura 35: pH del suelo sin cobertura

4.2. ANÁLISIS DEL SUELO CON SIEMBRA Y COBERTURA

En el análisis con siembra y con la cobertura se analizaron variables como humedad e suelo, temperatura de suelo y pH. Con el fin de revisar el comportamiento del suelo con el cultivo y las practicas como la cobertura. Por ende, se tomaron al rededor de 5760 datos, cada uno de los sensores tomo medidas cada 30 minutos.

4.2.1. Humedad de Suelo

Como se aprecia en la figura 36, los valores de humedad del suelo con cobertura se mantuvieron dentro de un rango más estable durante el periodo comprendido entre el 2 y el 31 de octubre. En este caso, el terreno fue cubierto con cobertura de maíz, que ayuda a conservar la humedad y reducir la evaporación. Durante el periodo de registro, la humedad se mantuvo por encima del 90 %, alcanzando en varios momentos valores cercanos al 100 %.

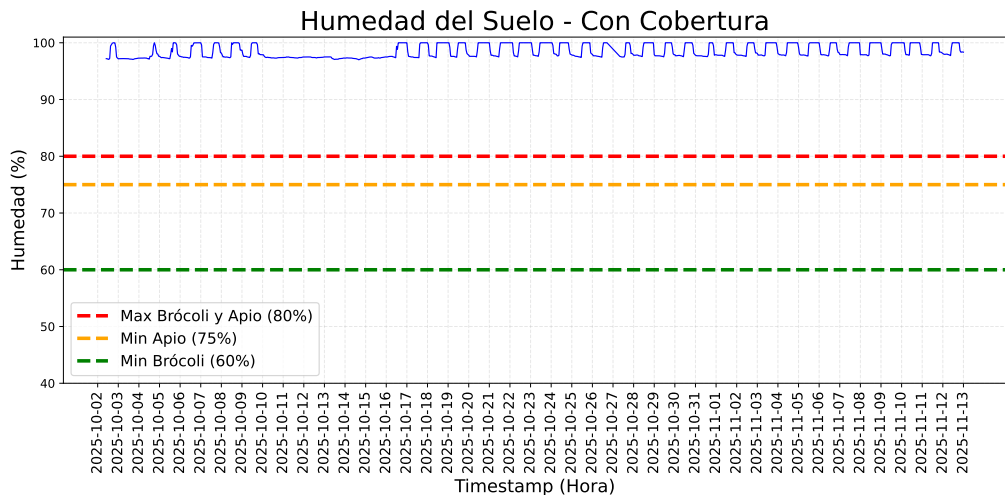


Figura 36: Humedad del suelo con cobertura

4.2.2. Temperatura de suelo

En la figura 37 se observa el comportamiento de la temperatura del suelo con la cobertura de maíz. Los registros muestran que la temperatura del suelo se mantuvo entre 15°C y 21°C, con una tendencia más uniforme y sin variaciones bruscas a lo largo del tiempo. Durante horas de tarde donde se presentan valores cercanos a los 21°C, mientras que en las noches y madrugadas las temperaturas descendieron hasta aproximadamente 15°C. De esta forma, al comparar estos valores con los rangos óptimos de los cultivos de interés, la temperatura del suelo se mantuvo dentro del rango ideal para el apio, cuyo valor mínimo recomendado es de 15°C, y ligeramente por encima del rango máximo del brócoli.

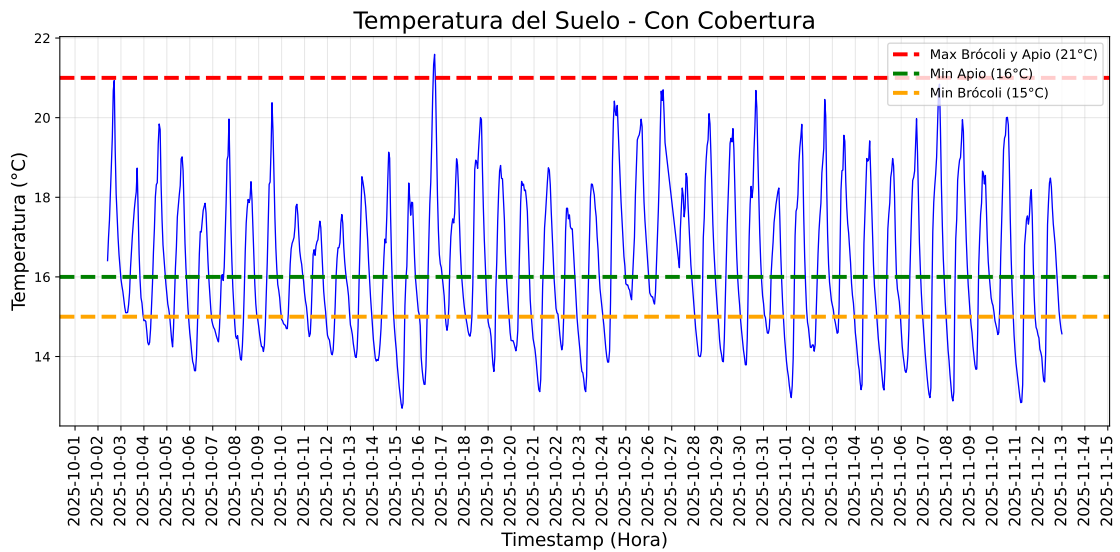


Figura 37: Temperatura del suelo con cobertura

4.2.3. pH del suelo:

Los valores registrados se mantuvieron principalmente entre 6.0 y 7.2, sin presentar niveles de acidez. Se observó en la figura 38 que el pH tendió a ser más bajo en las primeras horas de la mañana y durante la madrugada, alcanzando valores cercanos a 6.0, mientras que en las horas del mediodía y la tarde los valores se elevaron ligeramente, llegando incluso a superar el valor de 7. Esto se debe, a que durante la noche y la madrugada el suelo retiene más humedad, lo que aumenta ligeramente su acidez; en cambio, durante el día la evaporación tienden a elevar el pH.

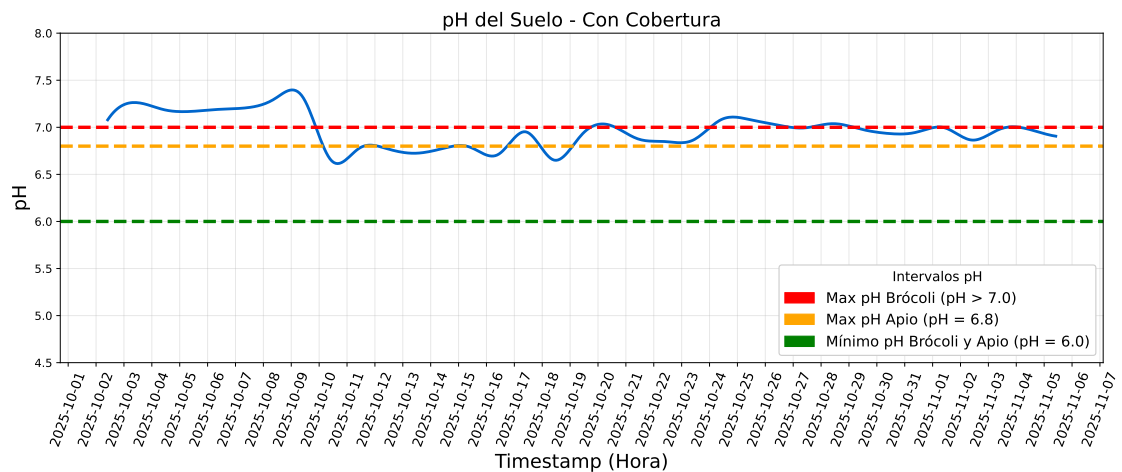


Figura 38: pH del suelo con cobertura

Al comparar la humedad del suelo respecto a los dos procesos sin cobertura (i.e. preparación de suelo) con cobertura (i.e. con siembra). Se observa que el cultivo con cobertura presentó una media de 98.35 % y una varianza de 1.35, mientras que sin la cobertura obtuvo una media de 96.86 % y una varianza de 1.61. Reflejando así, que el uso de cobertura orgánica mantiene un nivel de humedad más alto y estable a lo largo del periodo de medición. En cambio, en el suelo sin cobertura se registraron ligeras disminuciones de humedad.

Al realizar la comparación de la temperatura de suelo se observa que sin la cobertura se registró una media de 17.07°C y una varianza de 4.22. Contrario al escenario con cobertura donde se obtiene una media de 16.13°C y una varianza de 3.17.

Finalmente, se observa una diferencia al relacionar en el comportamiento del pH, el cual presentó una media de 6.78 y una varianza de 0.38 con la cobertura de suelo, mientras que el sin cobertura obtuvo una media de 5.38 y una varianza de 1.72. De esta manera, el suelo sin cobertura presenta niveles de acidez más altos, con valores que llegaron incluso por debajo de 5.0, acompañados de una mayor variación a lo largo del tiempo. Por el contrario el uso de cobertura ayudó a mantener el pH dentro de un rango más neutro y estable, adecuado para el desarrollo de los cultivos. En las mediciones se observó un pH entre 6.0 y 7.2, con ligeras variaciones a lo largo del día. Este comportamiento muestra una buena capacidad del suelo para conservar el equilibrio entre acidez y alcalinidad.

4.3. ANÁLISIS DEL ÍNDICE EMPÍRICO DE ESTRÉS HÍDRICO (IEHE)

Para el análisis del comportamiento del Índice Empírico de Estrés Hídrico (IEHE), se establecieron varios indicadores estadísticos que permiten comprender la dinámica temporal del estrés hídrico y evaluar la estabilidad del sistema en los

diferentes escenarios de prueba. Para su interpretación, los valores del IEHE tienen tres indicadores: Bajo (< 0.5), Normal ($0.5-0.7$) y Alto (> 0.7). Con base en estos rangos, se realizó un proceso de análisis para identificar (i) el porcentaje de datos en los dos procesos (i.e. preparación de suelo y siembra con cobertura) de las mediciones que se encuentran en rangos normales y (ii) los tiempos que demora el suelo en estabilizarse nuevamente a los rangos normales ($0.5-0.7$).

En la Figura 39 se muestra la variación temporal del Índice Empírico de Estrés Hídrico (IEHE) correspondiente al escenario con cobertura de suelo. También, en la Tabla 7 se muestran la comparación con cobertura y sin cobertura de suelo en los valores inferiores, normal y alto de Índice Empírico de Estrés Hídrico.

Tabla 7: Porcentaje de categorías del estrés hídrico con y sin cobertura.

Métrica	Sin Cobertura (%)	Con Cobertura (%)
Porcentaje Bajo	84.50	74.37
Porcentaje Normal	13.09	23.41
Porcentaje Alto	2.39	2.22

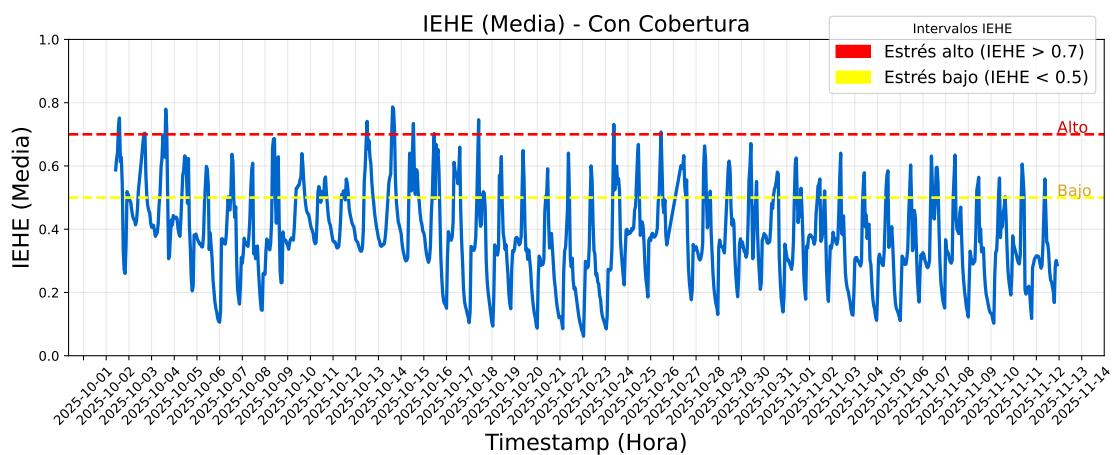


Figura 39: Índice Empírico de Estrés Hídrico (IEHE) con cobertura de suelo

En el escenario sin cobertura, el suelo mostró mayores variaciones. Durante la mayor parte del tiempo, los valores del índice se mantuvieron por debajo de 0.5, lo que evidencia un déficit hídrico constante y una pérdida rápida de humedad. Dicho lo anterior, el suelo permaneció un 84.50 % del tiempo en condiciones bajas, un 13.09 % en el rango normal y un 2.39 % en condiciones de estrés alto. De este modo se refleja un comportamiento que limita la capacidad de retención de agua y una rápida respuesta ante las variaciones de temperatura y humedad ambiental.

En contraste, el escenario con cobertura de suelo presentó un comportamiento más estable, con un porcentaje del tiempo en déficit hídrico que se redujo a 74.37 %, mientras que el rango normal aumentó a 23.40 %. Finalmente, las

condiciones de estrés alto se redujeron ligeramente a 2.22 %, lo que evidencia un equilibrio mas favorable en el contenido de agua del suelo.

Por otro lado, el escenario con cobertura de suelo presentó un comportamiento mucho más estable y equilibrado. Donde el tiempo en condiciones bajas disminuyó a 74.37 %, mostrando una reducción de más de 10 puntos porcentuales respecto al escenario sin cobertura. A su vez, las condiciones normales aumentaron a 23.40 %.

4.3.1 Análisis de tiempo de recuperación del suelo

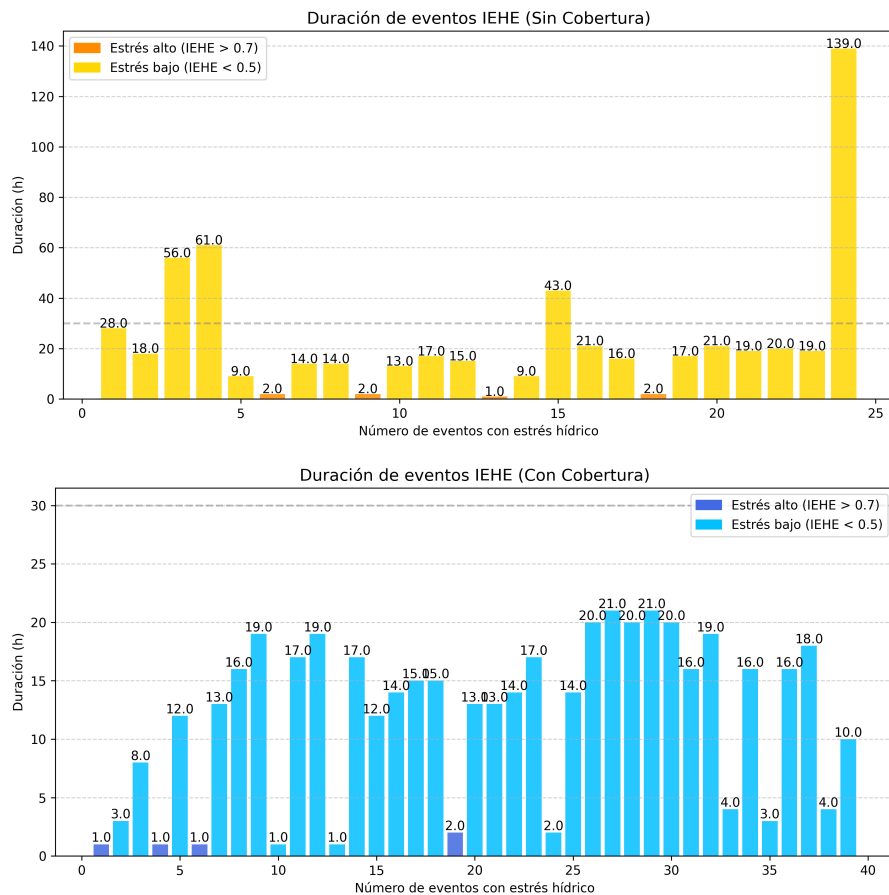


Figura 40: Duraciones de los eventos del Índice Empírico del Estrés Hídrico (IEHE)

En la figura 40 se observan las duraciones de los eventos de estrés hídrico (IEHE) identificados en los escenarios sin y con cobertura de suelo, detectados según los umbrales establecidos en alto, normal y bajo.

El escenario sin cobertura mostró un comportamiento irregular. En la gráfica amarilla se aprecian los eventos de estrés, donde los valores altos (> 0.7) mantuvieron una duración promedio de 1.75 horas. Sin embargo, los eventos por déficit

de humedad (< 0.5) se prolongaron con una duración promedio de 28.45 horas, lo que evidencia que el suelo, al estar expuesto, pierde humedad con mayor rapidez y tarda más tiempo en recuperarla. Esto refleja una mayor vulnerabilidad ante periodos secos y una menor capacidad del suelo para conservar el agua.

Por el contrario, el escenario con cobertura presentó un comportamiento más estable. Los eventos de estrés alto fueron pocos y de corta duración, con un promedio de apenas 1.25 horas, lo que demuestra que la cobertura orgánica ayuda a mantener la humedad del suelo y a evitar que se presenten cambios bruscos. En cuanto al déficit de humedad, los eventos mostraron una duración media de 13.2 horas, distribuidos de forma más uniforme y sin superar las 21 horas.

Con esto, se demuestra que la cobertura reduce las variaciones del IEHE, permitiendo que el suelo permaneciera dentro del rango normal durante un 23.4 % del periodo total. De esta forma, se puede decir que la presencia de cobertura actúa como un regulador natural, ayudando a disminuir la pérdida de humedad y a mantener el equilibrio hídrico por más tiempo. Además, se puede interpretar que el suelo con cobertura tiene una mejor capacidad de adaptación frente a los cambios del clima, mientras que el suelo sin cobertura es más propenso a sufrir periodos prolongados de sequedad.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se abordan las conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo del proyecto y los trabajos futuros que se proponen para ampliar y profundizar en la investigación.

5.1. CONCLUSIONES

1. La implementación de un sistema en una finca del Mercado Orgánico del Sumapaz, ubicada en el municipio de Pasca (Cundinamarca), permitió recopilar información precisa de variables ambientales y del suelo, evidenciando el impacto del uso de coberturas orgánicas a base de rastrojo de maíz (mulch) frente a escenarios sin cobertura.
2. El flujo de información desde los nodos hasta la nube mantuvo estabilidad y permitió procesar los datos, generando archivos consolidados y promedios horarios que facilitaron la interpretación del comportamiento hídrico del cultivo.
3. El análisis comparativo entre los escenarios con y sin cobertura evidenció diferencias significativas en las variables de humedad, temperatura y pH del suelo:
 - a) Humedad del suelo: El mulch de maíz favoreció la retención de humedad y redujo las pérdidas por evaporación, manteniendo valores más estables a lo largo del día.

- b) Temperatura del suelo: La cobertura atenuó las variaciones térmicas, disminuyendo los picos de temperatura durante el día y evitando el enfriamiento excesivo en la noche.
 - c) pH del suelo: El material orgánico contribuyó a mantener niveles adecuados de acidez, mejorando la disponibilidad de nutrientes y la salud del suelo.
 - d) Índice Empírico de Estrés Hídrico (IEHE): Los valores promedio del IEHE fueron menores bajo cobertura, lo que indica una menor exposición del cultivo a condiciones de déficit hídrico.
4. En el escenario sin cobertura, los periodos de recuperación fueron prolongados y poco uniformes, con un promedio de 28.45 horas para volver a niveles normales, lo que refleja una baja capacidad del suelo para retener agua.
 5. Estos resultados validan la eficacia de las prácticas tradicionales campesinas y su compatibilidad con herramientas modernas de monitoreo basadas en IoT.
 6. El estudio representa un aporte significativo al Mercado Orgánico del Sumapaz, al proporcionar una herramienta tecnológica que respalda científicamente el uso de coberturas tradicionales como estrategia de conservación del agua y mejoramiento del suelo.
 7. Asimismo, la incorporación de tecnologías IoT y servicios de analítica en la nube ofrece a los agricultores la posibilidad de tomar decisiones basadas en datos reales, optimizar el riego y fortalecer la sostenibilidad productiva de los cultivos.
 8. Este proyecto, además de su relevancia técnica, promueve la articulación entre saberes ancestrales campesinos y tecnologías emergentes, consolidando un modelo replicable en otras comunidades agrícolas del país.

5.2. TRABAJOS FUTUROS

A partir de los resultados obtenidos, se proyecta ampliar el sistema a más fincas del Mercado Orgánico del Sumapaz, con el propósito de comparar los resultados en distintos tipos de suelo, cultivos y condiciones climáticas. Esto permitirá fortalecer la red de monitoreo y generar información más completa sobre el comportamiento del estrés hídrico en la región.

También se plantea continuar con el desarrollo de nuevos prototipos de sensores, en especial el sensor de pH creado como parte de este trabajo. Este dispositivo busca ser una alternativa económica y adaptable a las necesidades de los agricultores.

Otro objetivo importante es la validación del sistema en conjunto con proyectos institucionales, como el servicio IoT para caracterización de variables medioambientales, con el fin de crear una plataforma integral que beneficie a más agricultores del Sumapaz y de otras regiones del país.

Por último, se busca continuar con procesos de formación y apropiación del conocimiento, capacitando a las comunidades campesinas en el uso de las herramientas tecnológicas y promoviendo el trabajo colaborativo entre universidad, productores y comunidad.

Apéndice 1: CALIBRACIÓN DE SENSORES

Anexo A. Calibración del sensor de pH

Para el sensor de pH LoRaWAN se realizó la calibración de manera experimental utilizando tres muestras de suelo diferentes. En cada caso se emplearon 100 mg de suelo con 100 ml de agua destilada; de esta forma se midió el pH de referencia con un sensor industrial Hanna Instruments HI98103, perteneciente a la Universidad de Cundinamarca, y simultáneamente se registró el voltaje leído por el microcontrolador a través del conversor analógico-digital (ADC). De esta manera se obtuvieron datos de voltaje y pH que permitieron realizar una calibración adecuada del sensor desarrollado.

$$V = \frac{ADC}{4095} \times 3.3 \quad (9)$$

En la Ecuación 9 obtiene el voltaje, que corresponde a la lectura digital del ADC y el valor de referencia de alimentación, en este caso 3.3V. Posteriormente, en la Ecuación 10 establece el modelo matemático que relaciona dicho voltaje con el valor de pH de la muestra, a partir de un ajuste lineal con los datos obtenidos en las tres muestras de calibración:

$$pH = a \cdot V + b \quad (10)$$

donde:

- pH : valor estimado del suelo,
- V : señal de entrada (en voltaje o lectura del ADC),
- a : pendiente obtenida en la calibración (factor de conversión),
- b : intercepto o corrección de offset.

En la Figura 41 se observa la respuesta obtenida en la muestra 1. El sensor de pH presenta una tendencia ascendente, alcanzando valores superiores a pH 9, mientras que el sensor industrial permanece estable alrededor de pH 6. Esta diferencia evidencia que la calibración inicial del sensor propio aún no reflejaba de manera adecuada las condiciones reales del suelo.

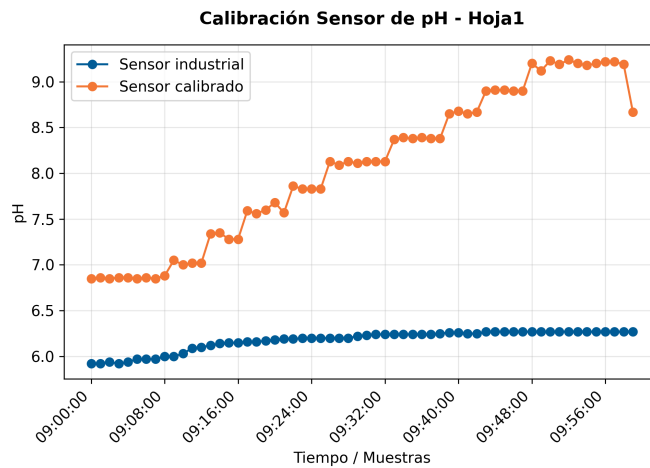


Figura 41: Comparación entre el sensor industrial y el sensor de pH en la muestra 1.

Ahora en la Figura 42 se presenta la muestra 2. En este caso, la lectura del sensor de pH se aproxima de forma mucho más consistente al valor registrado por el sensor industrial, ambos tienen el pH en 6.3. Sin embargo, se presentan algunas diferencias con el sensor de pH.

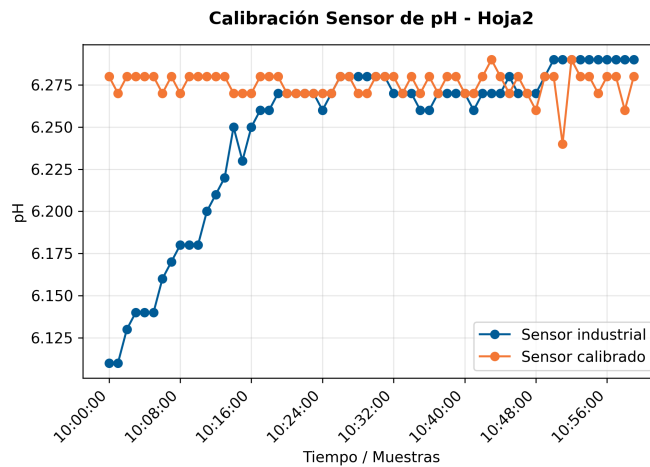


Figura 42: Comparación entre el sensor industrial y el sensor de pH en la muestra 2.

Finalmente, en la Figura 43 se muestra una a mayor coincidencia entre ambos equipos: tanto el sensor industrial como el sensor de pH se mantienen en el rango de 6.2 a 6.4.

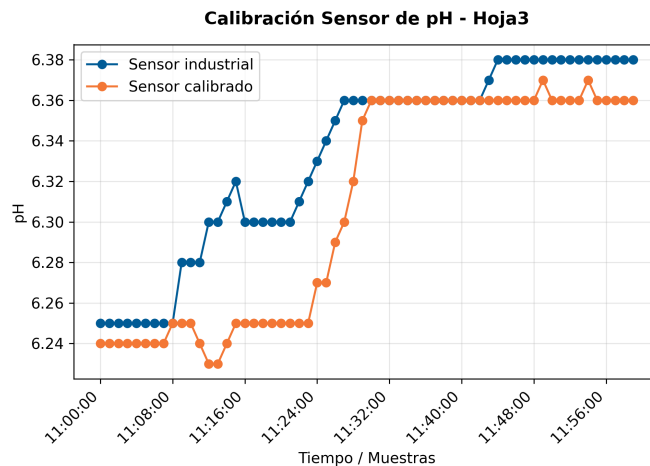


Figura 43: Comparación entre el sensor industrial y el sensor de pH en la muestra 3.

Teniendo en cuenta el análisis de las tres gráficas se observar que las Muestras 1 y 2 presentan ligeras variaciones en la linealidad de la respuesta, mientras que la muestra 3 mostró un comportamiento más estable de la respuesta real del sensor bajo las condiciones de prueba. Por esta razón, se consideró la Muestra 3 como la referencia principal para la calibración final. Tras el procesamiento de todos los datos experimentales, se determinó la ecuación de calibración definitiva que fue implementada en el código del microcontrolador: se obtuvo como resultado la Ecuación 11 específica de calibración:

$$pH = 0.0643 \cdot V + 6.231 \quad (11)$$

La adopción de esta ecuación permite convertir la señal de voltaje registrada por el sensor, en valores de pH confiables, integrando de manera precisa esta variable en el sistema de monitoreo desarrollado.

Anexo B. Calibración del sensor Dragino LSN50

Con el fin de validar la precisión del sensor *Dragino LSN50v2-S31*, se realizó un proceso de ajuste comparativo frente a equipos de referencia industrial. Para ello, se emplearon los instrumentos Hanna Instruments HI8424 para la medición de temperatura de suelo y Soil Moisture Meter MO750 para la humedad del suelo, ambos pertenecientes al laboratorio de instrumentación de la Universidad de Cundinamarca, las mediciones se llevaron a cabo de manera simultáneas con los tres sensores (LSN50, HI8424 y MO750) en intervalos de 5 minutos durante una hora.

Para la calibración del sensor se utilizó un decodificador de ChirpStack interpretando el payload que envía el sensor. Dicho proceso consistió en aplicar las fórmulas de conversión provistas por el fabricante, de modo que los valores binarios fueran traducidos a unidades físicas: porcentaje de humedad (%) y temperatura en grados Celsius (°C), asegurando así que los valores recibidos sean correctos.

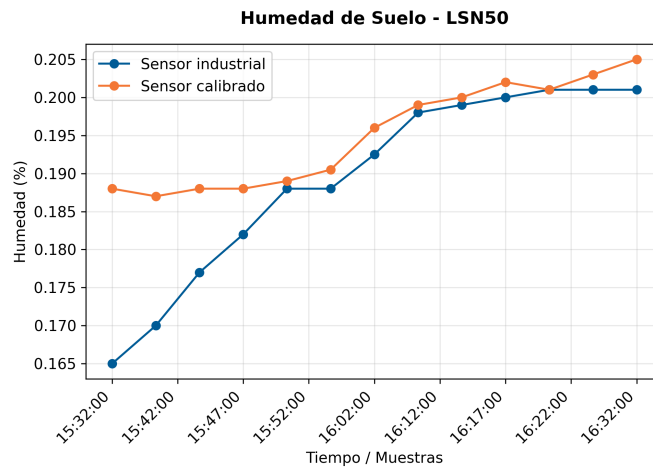


Figura 44: Comparación de humedad entre el sensor industrial y LSN50.

La Figura 44, correspondiente a la humedad de suelo, se puede ver que tanto el sensor LSN50 marca al inicio valores un poco más altos, alrededor de un 2% por encima del sensor de referencia, pero con el paso de los minutos esa diferencia se va cerrando hasta que prácticamente coinciden en el 20%, indicando así que el sensor LSN50 refleja bien los cambios de humedad y los mediciones son confiables.

Igualmente, la Figura 45 muestra la temperatura de suelo donde el comportamiento de ambos sensores es parecido, con una diferencia que rara vez supera un grado. Esa cercanía entre las dos curvas demuestra que el LSN50 es estable y ofrece registros de temperatura muy próximos a los del sensor industrial, lo que lo hace adecuado para el monitoreo en campo.

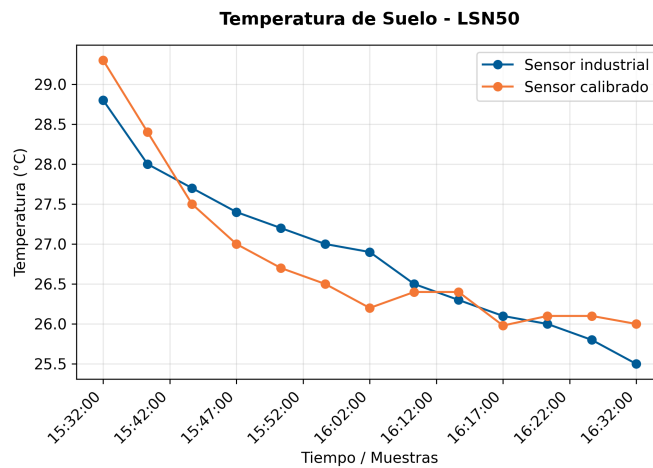


Figura 45: Comparación de temperatura entre el sensor industrial y LSN50.

Anexo C. Calibración del sensor Dragino LHT65N

Para la validación del sensor Dragino LHT65, se realizó el mismo procedimiento. Sin embargo, en este caso se analizaron tres parámetros: temperatura de suelo, humedad ambiental y temperatura ambiental, registrando datos en intervalos de cinco minutos durante una hora. Los resultados obtenidos se presentan en las siguientes gráficas:

Temperatura Ambiental: El sensor LHT65N frente al sensor industrial presentan una diferencia mínima, casi siempre por debajo de 0,5 °C, lo que refleja una alta coherencia en las mediciones en la Figura 46.

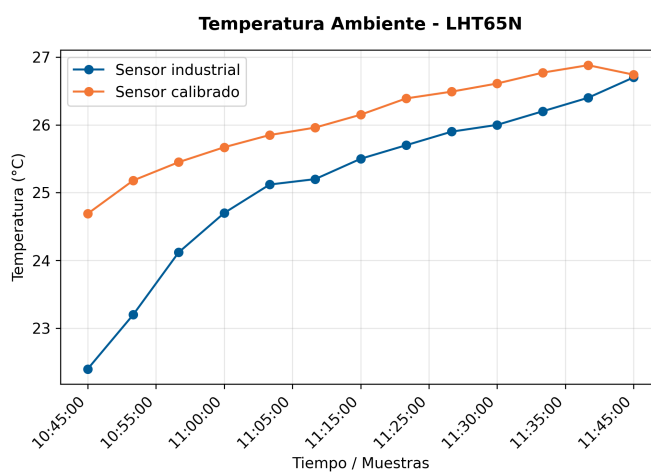


Figura 46: Calibración sensor LHT65.

Humedad Ambiental: En la Figura 47 al inicio los registros son bajos que el sensor industrial, pero a medida que transcurre el tiempo ambas curvas tienden acercarse y coinciden en la parte final del periodo. Esto indica que, aunque el LHT65N presenta una ligera subestimación inicial, logra seguir adecuadamente la tendencia real de la variable.

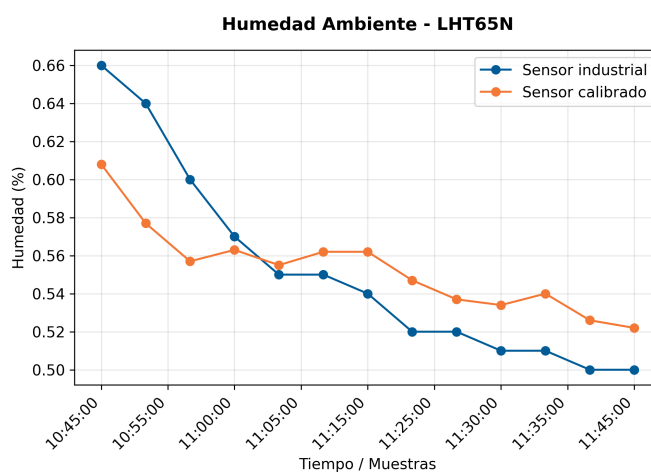


Figura 47: Calibración sensor LHT65N humedad relativa.

Temperatura de Suelo: reporta valores levemente más altos durante todo el tiempo, pero las curvas siguen el mismo patrón de incremento. Aun así, la estabilidad del sensor demuestra que es adecuado para registrar la variación de la temperatura ambiental en condiciones reales observe la figura 48.

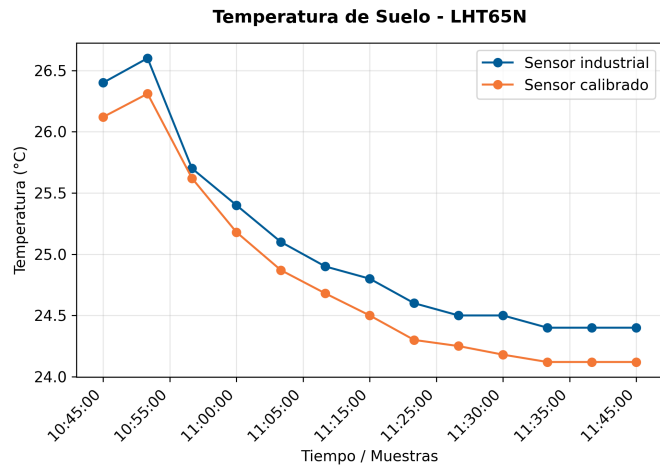


Figura 48: Calibración sensor LHT65 temperatura de suelo.

Referencias

- [1] S. S. S. of America, "Triángulo de textura del suelo." [Online]. Available: [file:///C:/Users/valen/Downloads/soil-texture-triangle-triangulo-de-textura-del-suelo%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/valen/Downloads/soil-texture-triangle-triangulo-de-textura-del-suelo%20(1).pdf)
- [2] Dragino Technology Co., Limited, *LSN50v2-S31 LoRaWAN Temperature & Humidity Sensor*, 2023, datasheet del sensor de temperatura y humedad LoRaWAN. [Online]. Available: <https://www.dragino.com/products/temperature-humidity-sensor/item/169-lsn50v2-s31.html>
- [3] —, *LHT65N LoRaWAN Temperature & Humidity Sensor*, 2023, datasheet técnico del sensor LHT65N. [Online]. Available: <https://www.dragino.com/products/temperature-humidity-sensor/item/224-lht65n.html>
- [4] V. Cherlinka. (2024) Cultivo de brócoli: Selección de tipo y cuidado básico. EOS Data Analytics. [Online]. Available: <https://eos.com/es/blog/cultivo-de-brocoli>
- [5] E. E. INTAGRI, "El cultivo de apio," Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura, Tech. Rep., 2021.
- [6] "Páramo de sumapaz en colombia: características y datos." [Online]. Available: <https://encolombia.com/educacion-cultura/geografia-colombiana/paramo-de-sumapaz-colombia/>
- [7] "Mercado orgánico del sumapaz by katerin rodríguez on prezi." [Online]. Available: https://prezi.com/omiu-_rr6pl9/mercado-organico-del-sumapaz/
- [8] "Agricultura orgánica en colombia: una oportunidad." [Online]. Available: <https://www.elcolombiano.com/medio-ambiente/agricultura-organica-en-colombia-y-emprendimientos-paisas-sostenibles-NB14620814>
- [9] "Agricultura orgánica: el modelo agrícola y sus principios." [Online]. Available: <https://eos.com/es/blog/agricultura-organica/>
- [10] M. del Rosario Iglesias, "Estimación de evapotranspiración real en trigo con distintas condiciones de estrés hídrico: aplicación de modelos y sensores remotos," Ph.D. dissertation, Universidad Nacional de Córdoba, 2020.
- [11] K. R. Z. F. and F. G. Vásquez, "Efectos del riego deficitario en el rendimiento del cultivo del apio (*Apium graveolens*), variedad kelvin rz f1 en la molina," Ph.D. dissertation, Universidad Nacional Agraria La Molina, 2024.
- [12] J. M. A. Carate, "Efecto de cuatro mulchs orgánicos en las propiedades del suelo en el desarrollo del cultivo de apio (*Apium graveolens*) salache 2022," Ph.D. dissertation, Universidad Técnica de Cotopaxi, 8 2022.

- [13] B. Et-Taibi, M. R. Abid, E. M. Boufounas, A. Morchid, S. Bourhnane, T. A. Hamed, and D. Benhaddou, "Enhancing water management in smart agriculture: A cloud and iot-based smart irrigation system," *Results in Engineering*, vol. 22, 6 2024.
- [14] A. Ali, T. Hussain, N. Tantashutikun, N. Hussain, and G. Cocetta, "Application of smart techniques, internet of things and data mining for resource use efficient and sustainable crop production," 2023.
- [15] G. Codeluppi, A. Cilfone, L. Davoli, and G. Ferrari, "Lorafarm: A lorawan-based smart farming modular iot architecture," *Sensors*, vol. 20, no. 7, 2020.
- [16] A. E. R. Buitrago, M. E. Cabrera, and B. del Pilar Royero Benavides, "Propuesta de un servicio iot para el mercado orgánico del sumapaz," Universidad de Cundinamarca, Tech. Rep., 2024.
- [17] A. J. M. Guerra and Y. C. Q. Álvarez, "Propuesta de una arquitectura de computación en la nube para un servicio iot de tenencia de semillas," Ph.D. dissertation, Universidad de Cundinamarca, 2024.
- [18] Seipasa, "Estrés hídrico en las plantas: qué es y cómo evitarlo," <https://www.seipasa.com/es/blog/estres-hidrico-en-las-plantas>, 2023.
- [19] F. G. Nature. (2024) El 'mulching', una práctica con potencial para enfrentar los desafíos del cambio climático en la agricultura. Consultado el día XXX. [Online]. Available: <https://fundacionglobalnature.org/mulching-practica-potencial-enfrentar-desafios-cambio-climatico-agricultura/>
- [20] C. Ganadero. (2022) ¿cuáles son las opciones para hacer cobertura de suelos? Publicado el 25 de abril de 2022, consultado el XXX. [Online]. Available: <https://www.contextoganadero.com/agricultura/cuales-son-las-opciones-para-hacer-cobertura-de-suelos>
- [21] "Agricultura orgánica: el modelo agrícola y sus principios." [Online]. Available: <https://eos.com/es/blog/agricultura-organica/>
- [22] "Para qué sirve el monitoreo ambiental." [Online]. Available: <https://www.alsglobal.com/es/news-and-publications/2022/06/para-qu-sirve-el-monitoreo-ambiental>
- [23] "De qué se trata un monitoreo ambiental — sgs Perú." [Online]. Available: <https://www.sgs.com/es-pe/noticias/2022/12/que-es-monitoreo-ambiental>
- [24] "Rotaciones de cultivos - rodale institute." [Online]. Available: <https://rodaleinstitute.org/es/why-organic/organic-farming-practices/crop-rotations/>
- [25] "Policultivos: plantas que trabajan en equipo para mejorar la cosecha — ecomandanga." [Online]. Available: <https://ecomandanga.wordpress.com/2018/02/15/policultivos-plantas-que-trabajan-en-equipo-para-mejorar-la-cosecha/>

- [26] “Policultivos - sistemas hortícolas almería.” [Online]. Available: <https://www.sistemashorticolasalmeria.com/blog/policultivos/>
- [27] “Conservación del suelo en la agricultura: técnicas y manejo.” [Online]. Available: <https://eos.com/es/blog/conservacion-del-suelo/>
- [28] “Disponibilidad de nutrientes y el ph del suelo — intagri s.c.” [Online]. Available: <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/disponibilidad-de-nutrientos-y-el-ph-del-suelo>
- [29] “Qué es la temperatura — swegon.” [Online]. Available: <https://www.swegon.com/es/guias/La-guia-del-clima-interior/Factores-que-afectan-al-clima-interior-y-al-ser-humano/temperatura-que-es-temperatura/>
- [30] “Qué es la humedad — airthings.” [Online]. Available: <https://www.airthings.com/es/what-is-humidity>
- [31] “Humedad del suelo: métodos e instrumentos de medición.” [Online]. Available: <https://eos.com/es/blog/humedad-del-suelo/>
- [32] “Influencia de la luz en los cultivos.” [Online]. Available: <https://www.paraled.cl/blog/influencia-luz-en-los-cultivos>
- [33] “La importancia del análisis de datos en el sector agrícola — comercio acelerapyme.” [Online]. Available: <https://comercio.acelerapyme.gob.es/novedades-comercio/p%C3%ADdora/la-importancia-del-an%C3%A1lisis-de-datos-en-el-sector-agr%C3%ADcola->
- [34] “Qué es el análisis de datos - aws.” [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/es/what-is/data-analytics/>
- [35] Becolve Digital. (2020) Qué es lorawan. [Online]. Available: <https://becolve.com/blog/que-es-lorawan>
- [36] IFOAM. (2025) The four principles of organic agriculture. Consultado el 3 de octubre de 2025. [Online]. Available: <https://www.ifoam.bio/why-organic/shaping-agriculture/four-principles-organic>
- [37] Vasyi Cherlinka. (2025) Rotación de cultivos: qué es, beneficios y tipos. EOS Data Analytics. [Online]. Available: <https://eos.com/es/blog/rotacion-de-cultivos>
- [38] FAO, “Agricultura de conservación,” 2022. [Online]. Available: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/332a1683-0e11-47ab-b008-b9a9cba9b615/content>
- [39] R. López López, R. Arteaga Ramírez, M. A. Vázquez Peña, I. López Cruz, and I. Sánchez Cohen, “Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas,” *Agricultura Técnica en México*, 2009. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60835110>

- [40] N. I. R. CARRILLO, "Investigacion historica y geografica de la region del sumapaz nubia isabel rojas carrillo m," Universidad de los Andes, Tech. Rep., 8 2002.
- [41] Peacefair, *Sensor de pH para suelo PH-V5 - Hoja de datos*, 2023, consultado el 2 de noviembre de 2025. [Online]. Available: <https://www.peacefair.com/products/sensor-de-ph-para-suelo-ph-v5>
- [42] T. T. Network. (2025) Device classes: The lorawan® specification defines three device types: Class a, class b, and class c. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/classes/>
- [43] *wAP LR9 Kit: LoRa® Gateway – Manual Técnico y Especificaciones*, MikroTik, Riga, Latvia, 2025, consultado el 14 de noviembre de 2025. [Online]. Available: https://mikrotik.com/product/wap_lr9_kit
- [44] C. authors, "Chirpstack: open-source lorawan® network server," 2025. [Online]. Available: <https://www.chirpstack.io/>